

ББК 32.816-04-2

Т38

УДК 621.865.8.005 : 681.586.5

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Авторы: В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов,  
Ю. Г. Якушников

Рецензент д-р техн. наук В. Л. Левшин

Техническое зрение роботов/В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушников; Под общ. ред. Ю. Г. Якушеникова. — М.: Машиностроение, 1990. — 272 с.: ил.  
ISBN 5-217-00467-3

Рассмотрены принципы построения, выбора структуры, аппаратных, программных и аппаратно-программных средств систем технического зрения (СТЗ) промышленных роботов. Даны основы проектирования и расчета важнейших узлов СТЗ и их сопряжения с системами управления роботов. Приведены алгоритмы обработки и анализа видеoinформации. Сформулированы основные требования к СТЗ адаптивных роботов.

Для инженерно-технических работников, занимающихся созданием и применением средств робототехники, а также систем обработки информации.

Т 2402020000—156  
038 (01)—90 156—90

ББК 32.816-04-2

ISBN 5-217-00467-3

© В. И. Мошкин, А. А. Петров,  
В. С. Титов и др., 1990

Решение актуальных задач автоматизации производства с учетом ускорения темпов научно-технического прогресса требует серьезной перестройки существующей структуры отечественного парка промышленных роботов. Наряду с преобладающими сегодня простейшими промышленными роботами, функционирующими по жестким (не меняющимся в процессе работы) программам, в широкую практику должны войти робототехнические системы качественно иного класса, обладающие адаптивными возможностями и элементами искусственного интеллекта. Адаптивные роботы, снабженные различными средствами очувствления — сенсорными системами и способные гибко перестраивать свои действия в соответствии с воспринимаемой информацией о рабочей среде, являются одним из важнейших компонентов гибких производственных систем (ГПС), без них немыслима роботизация непромышленной сферы, проведение многих работ в космосе, под водой и в других экстремальных средах.

При создании адаптивных роботов весьма существенная роль среди возможных средств очувствления отводится системам технического зрения (СТЗ), обеспечивающим восприятие видеoinформации об окружающей среде, автоматическую обработку и анализ изображений рабочих сцен в целях формирования команд управления роботом в процессе его работы. В настоящее время во всем мире расширяется серийный выпуск самых различных СТЗ, активно ведутся разработки новых методов и средств визуального очувствления роботов. В нашей стране этими проблемами занимается целый ряд научных центров и предприятий Москвы, Ленинграда, Киева, Томска, Рыбинска, Ростова-на-Дону и других городов.

Вопросы создания и применения СТЗ роботов интересуют многих специалистов, причастных к проектированию, внедрению и эксплуатации роботизированных технологических комплексов и ГПС. Хотя советскими издательствами за последнее время выпущено несколько оригинальных и переводных книг и сборников, в которых затрагиваются отдельные аспекты теории, построения и использования СТЗ роботов (см. например [9, 30, 34, 39, 40, 41, 43, 47, 49]), существенная часть информации по этой

проблеме остается недоступной широкому кругу читателей, поскольку сосредоточена в узкоспециализированных периодических изданиях (в большинстве своем — на иностранных языках), материалах зарубежных фирм и международных выставок, трудах множества конференций, таких, как Международные конференции по техническому зрению и управлению оцувствленными роботами *ROVISEC*, тематические симпозиумы международных федераций по промышленным роботам, технологии промышленного производства, автоматическому управлению, обработке информации и др. Если учесть, что значительное число разработчиков и пользователей робототехнических систем ранее не были профессионально знакомы с проблемами технического зрения, становится очевидной потребность в систематизированном изложении современных принципов построения, основ проектирования, алгоритмического и программного обеспечения СТЗ роботов различного назначения, методов использования видеоинформации для управления роботами, а также необходимость в рассмотрении примеров эффективного практического применения роботов с техническим зрением, перспектив развития этого научно-технического направления.

Разработчики СТЗ роботов во многом опираются на опыт более традиционных применений технического зрения в устройствах промышленной автоматики и телемеханики, телевидении, дефектоскопии, при обработке фотоснимков, изображений биологических препаратов, текстов и т. п. В ряде случаев удается использовать те или иные из созданных ранее технических средств, методических решений, алгоритмов и программ или же приспособить их к задачам робототехники с небольшой модификацией. Однако часто специфика робототехнических приложений не позволяет непосредственно воспользоваться накопленным арсеналом методов и средств и требует развития оригинальных подходов к созданию СТЗ с учетом новых функциональных задач, конкретных возможностей реализации и условий работы в составе робототехнических систем.

В связи с этим при написании данной книги представлялось целесообразным рассмотреть проблему в обоих аспектах. С одной стороны, считая датчики внешней видеоинформации робота (видео-сенсоры) частным случаем более широкого класса оптико-электронных приборов (ОЭП), авторы стремились сохранить преемственность общих методов, принятых при проектировании ОЭП, показать возможность распространения на случай СТЗ роботов целого ряда хорошо зарекомендовавших себя принципов расчета, выбора структурных и функциональных схем, элементной базы. Это позволило опустить подробное описание многих традиционных процедур, адресовав читателя к известной литературе по ОЭП.

С другой стороны, особое внимание уделено недостаточно освещенным в этой литературе вопросам, которые характерны именно для СТЗ роботов: обеспечению универсальности и повышенной

степени гибкости, высокого быстродействия, устойчивости к воздействиям окружающей среды, необходимости миниатюризации и ориентации на широкодоступную элементную базу, совместности с существующими устройствами управления роботов и т. п. В то же время в книге сделана попытка обобщить методы выбора и расчета основных типовых блоков, необходимых для визуального оцувствления робота вне зависимости от его конкретного назначения. На основе единого системного подхода рассмотрены требования к организации рабочей сцены робота с СТЗ, видеосенсорам, включающим оптическую систему, преобразователь оптической информации о наблюдаемой сцене в соответствующий электрический сигнал (видеосигнал), электронный тракт предварительной обработки этого сигнала, блокам ввода изображений в вычислительное устройство, их обработки, сегментации, описания и анализа, а также связи СТЗ с системой управления робота. При изложении путей реализации этих требований упор делается на необходимость рационального сочетания аппаратных и программных средств.

Научно-технический уровень разработок СТЗ роботов в мире повышается очень высокими темпами, их элементная база постоянно обновляется — этим объясняется сравнительно малый объем, отводимый в книге описанию используемых сегодня элементов и специальных технических решений в конкретных применениях. Авторам хотелось избежать описательности и перечисления характеристик и особенностей многочисленных СТЗ, созданных в нашей стране и за рубежом, что свойственно некоторым книгам, вышедшим в последнее время.

Главная цель настоящей книги — дать одно из первых пособий разработчикам СТЗ роботов ближайшего будущего и помочь специалистам, которым предстоит применять их для решения разнообразных практических задач.

Книгу написали: В. И. Мошкин (пп. 3.1, 3.4, 4.3, 4.4, 5.1—5.3, 5.5, 6.4—6.8), А. А. Петров (предисловие, гл. 1, 2, 7), В. С. Титов (пп. 3.2, 4.1, 4.2, 5.4, 5.7, 5.8), Ю. Г. Якушенков (пп. 3.1, 3.3, 3.4, 5.6, 6.1—6.3).

# ГЛАВА 1

## СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Роботы, снабженные СТЗ, достаточно широко и успешно применяются во многих отраслях промышленности на таких операциях, как контроль и отбраковка различных деталей и изделий по внешнему виду, загрузка обрабатывающих станков деталями с конвейеров или из бункеров, сортировка и ориентированная укладка в кассеты деталей и заготовок, в том числе неупорядоченно движущихся по конвейеру или поступающих в таре навалом, сборка и комплектация узлов, сварка, окраска, упаковка изделий, монтаж электронных схем и других СТЗ используют также для обеспечения условий техники безопасности на роботизированных рабочих местах, организации учета и складирования предметов производства, маршрутизации материалопотоков в гибких производственных системах, управления транспортными мобильными роботами.

Роль адаптивных роботов с техническим зрением и элементами искусственного интеллекта еще более возрастает при расширении процесса роботизации в таких областях, как горнодобывающая промышленность, строительство, сельское и лесное хозяйство, коммунальные службы, быт, где рабочая среда носит сложный, плохо структурированный характер. СТЗ необходимы роботам, предназначенным для исследования космического и подводного пространства, используемым для тушения пожаров и при других стихийных бедствиях. В подобных приложениях СТЗ должна обеспечивать не только данные для непосредственной выработки сигналов обратной связи при управлении движениями робота и передачу сведений об окружающей среде человеку-оператору, но и информацию для формирования роботом модели рабочей среды в целях автоматического планирования действий.

Функциональное назначение СТЗ робота в зависимости от области и конкретных условий его применения довольно многообразно. Наиболее типичными функциями, выполняемыми СТЗ в робототехнике, являются следующие: регистрация наличия объекта в поле зрения датчика внешней (по отношению к роботу) видеoinформации — *видеосенсор*; подсчет числа объектов, находящихся в поле зрения или прошедших перед видеосенсором;

считывание и расшифровка меток (цветовых или штриховых кодов, буквенно-цифровых символов, этикеток и других маркеров); обнаружение препятствий, мешающих движениям робота; измерения геометрических и физических параметров объектов; контроль изделий на наличие видимых дефектов, полноту комплектации, соответствие эталонам; классификация (распознавание) объектов; определение местоположения и ориентации объектов в рабочей зоне робота; поиск нужных объектов на рабочей сцене; измерение скорости движущихся объектов; слежение за перемещениями и изменениями скорости объектов; визуальное определение изменений во времени наблюдаемых физических и технологических процессов; обеспечение информации для задания и коррекции траекторий рабочего органа робота в адаптивном режиме; навигация и наведение мобильных роботов; визуальный контроль правильности выполнения операций роботом; калибровка геометрических параметров манипулятора, привязка его системы координат к системе координат рабочего пространства; обеспечение требований техники безопасности.

Функциональные задачи СТЗ, характерные для робототехнических приложений, можно условно разделить по уровню их относительной сложности. К элементарным задачам обычно относят: обнаружение наличия объекта; измерение расстояния до объекта, его линейных или угловых перемещений, скорости; измерение геометрических параметров объекта (линейных и угловых размеров, площади и т. п.); определение физических характеристик излучения от объекта (интенсивности, спектрального состава и пр.); подсчет числа объектов и др.

Более сложный круг задач выполняет, например, СТЗ, которая снабжает систему управления манипуляционного робота информацией, необходимой для захватывания неупорядоченных объектов. В число этих задач входят: обзор рабочей сцены (плоской или пространственной) для поиска представляющего интерес объекта — одиночного или одного из нескольких, лежащего изолированно от других или соприкасающегося (перекрывающегося) с ними; определение местоположения и ориентации этого объекта; его классификация (если имеется несколько различных классов объектов). При этом объекты могут различаться не только размерами и формой (силуэтом), но и текстурой, цветом и т. п., покоиться или находиться в движении. Этот пример иллюстрирует тот факт, что относительная сложность функциональных задач СТЗ характеризуется целым рядом признаков, среди которых можно выделить следующие.

*Размерность рассматриваемой сцены.* Пространственные задачи, требующие анализа трехмерных сцен, как правило, намного сложнее «плоских» задач, в которых достаточно обработки изображения одной двумерной проекции сцены на картинную плоскость. Промежуточное положение занимают квазиплоские задачи («размерности 2,5»), где рассматривается картинная плоскость

с добавлением информации о «глубине» (дальности) видимых точек изображения.

**Степень изолированности объектов.** По этому признаку задачи СТЗ классифицируются так (в порядке возрастания сложности): задачи с одиночным объектом; задачи с несколькими изолированными (т. е. несоприкасающимися) объектами на изображении; задачи с соприкасающимися (но не перекрывающимися) изображениями объектов; задачи с перекрытием одних объектов рабочей сцены другими.

**Однородность объектов.** Этот признак характеризует сложность задач классификации, стоящих перед СТЗ. Если все объекты, которые могут быть предъявлены СТЗ, идентичны, эта проблема вообще не возникает. При наличии ряда неодинаковых объектов задача их классификации тем сложнее, чем более «похожи» друг на друга их изображения, т. е. чем больше классифицирующих признаков необходимо для однозначного описания отличий каждого объекта от всех остальных.

**Стационарность рабочей сцены.** Изображения покоящихся объектов обрабатывать и анализировать проще, чем изображения объектов, которые перемещаются относительно видеосенсоров (например, при движении деталей по конвейеру, зрительном очувствовании мобильного робота, работе СТЗ типа «глаз на руке»).

**Число элементов изображения.** Чем больше размеры поля зрения и чем выше требуемая разрешающая способность СТЗ, тем сложнее задача, поскольку приходится обрабатывать больше элементов получаемого изображения (*пикселей*).

**Число градаций яркости.** Задачи, в которых достаточно анализировать силуэтные очертания объектов, т. е. работать с двухградационными (бинарными) изображениями, как правило, решаются проще задач, требующих анализа многоградационных (*полутонных*) изображений.

**Спектральный состав видеосигнала.** Наделить робот способностью воспринимать цветные изображения, вообще говоря, сложнее, чем снабдить его монохроматическим зрением.

Кроме того, на сложность тех или иных задач СТЗ существенное влияние оказывают такие факторы, как качество освещения рабочей сцены, его стабильность, уровень оптических и электрических помех, контрастность объектов относительно фона, отражающие свойства их поверхности, и др.

Чем более сложные задачи с учетом всей совокупности описанных критериев способна решать СТЗ, тем выше уровень функциональной гибкости («интеллекта») робота может быть обеспечен с ее помощью.

Для выполнения своего функционального назначения СТЗ робота в общем случае должна обеспечивать: восприятие оптического сигнала и формирование изображения; предварительную обработку изображения в целях ослабления влияния шумов, улучшения контрастности, коррекции искажений, сжатия инфор-

мации и т. д.; сегментацию изображения сцены на составные части — выделение нужных объектов, их фрагментов или характерных особенностей; описание изображений — расчет их геометрических и иных характеристик, вычисление классифицирующих признаков, определение местоположения и ориентации; анализ изображения с распознаванием образов или классификацией объектов и интерпретацией сцен на основе модели проблемной среды; передачу полученных результатов в систему управления робота.

Создание СТЗ робота, отвечающей ее конкретному функциональному назначению, включает следующие этапы: 1) постановку задачи на содержательном уровне и составление технического задания на СТЗ; 2) выбор структурной и функциональной схем СТЗ; 3) математическую формулировку задач функциональных блоков СТЗ; 4) разработку алгоритмов решения функциональных задач; 5) выбор средств реализации алгоритмов и конкретизации технических характеристик аппаратных, аппаратно-программных и программных блоков СТЗ в соответствии с техническим заданием; 6) разработку аппаратного и программного обеспечения СТЗ.

Прежде чем перейти к рассмотрению этих вопросов, остановимся на особенностях работы роботов с техническим зрением.

## 1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

Общая функциональная схема очувственного робота, снабженного СТЗ (возможно, вместе с другими датчиками внешней информации), может быть представлена так, как показано на рис. 1.1. Сенсорная система робота должна снабжать его систему управления информацией о текущей ситуации во внешней среде: наличии, типе, параметрах, местоположении и ориентации объектов манипулирования (воздействия); правильности и качестве выполнения роботом технологических операций и/или других действий; существовании препятствий и путях их обхода и т. д. В систему управления поступают также задания (команды) роботу от человека-оператора, других роботов, ЭВМ высших уровней, технологического оборудования или иных устройств.

В современных робототехнических системах наиболее предпочтительна многоуровневая иерархическая структура управления [35, 41].

В соответствии с приведенной схемой информация от СТЗ, вообще говоря, может поступать на разные уровни системы управления. Например, данные о расположении препятствий бывают нужны на *вышем* уровне для построения модели рабочей среды в целях планирования действий робота; результаты классификации объектов могут потребоваться на *стратегическом* уровне для расчленения общего плана действий на конкретные манипуляционные операции, задания их последовательности и параметров; сведения о местоположении и ориентации объектов необходимы

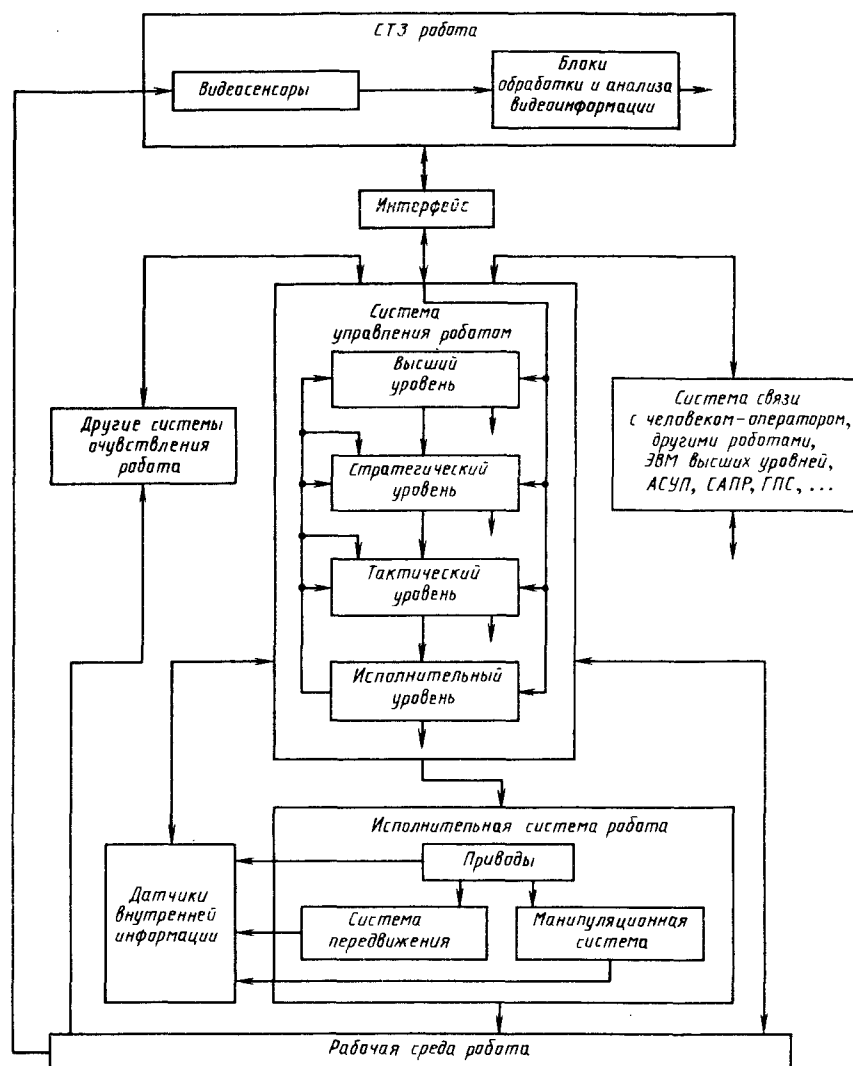


Рис. 1.1.1. Функциональная схема очувствления робота

для формирования на *тактическом* уровне требуемых движений рабочего органа и звеньев манипулятора, по которым, в свою очередь, строятся программные законы согласованного изменения соответствующих степеней подвижности; информация об отклонении фактической траектории (скажем, сварного шва) от запрограммированной может быть использована непосредственно на *исполнительном* уровне для выработки управляющих сигналов на приводы при отработке программы в целях коррекции перемещения рабочего органа робота.

В реальных робототехнических системах часто трудно разграничить задачи описанных уровней управления. Функции верхних уровней во многом берет на себя человек-оператор. Нижний уровень управляющей системы физически может быть реализован непосредственно в силовых блоках исполнительных устройств, а другие уровни обычно строятся на базе универсальных или специализированных вычислительных блоков.

Общая функциональная схема, представленная на рис. 1.1, соответствует случаю подключения СТЗ к существующим устройствам программного управления роботом, которые обычно принято разделять на устройства циклового, позиционного, контурного и позиционно-контурного управления. Роботы с *цикловым* программным управлением — это простейшие позиционные роботы, управляющая программа которых содержит сведения о последовательности (цикле) действий, а геометрическая информация для команд программы, определяющая собственно перемещение исполнительных механизмов, задается настройкой упоров, выключателей, реле времени и т. п. В *позиционных* системах числового программного управления программируется конечное положение рабочего органа робота — точка позиционирования — для каждого рабочего шага (кадра) и, возможно, скорость перехода в нее. При *контурном* управлении состояние рабочего органа определено в любой момент времени, т. е. управляющая программа полностью задает желаемую пространственно-временную траекторию движения робота. *Позиционно-контурные* (комбинированные) устройства сочетают два последних способа программного управления.

Следует выделить в особую группу контрольно-измерительные роботы, в которых видеосенсоры и/или другие датчики внешней информации устанавливаются на рабочем органе манипулятора, что позволяет проводить измерения с помощью этих датчиков в требуемых местах рабочей зоны робота по заданной программе. Информация от СТЗ в собственной системе управления контрольно-измерительного робота может непосредственно и не использоваться, а просто передаваться человеку-оператору или ЭВМ высшего уровня. В связи с этим рассмотрим способы включения СТЗ в робототехнические комплексы. Если СТЗ мобильных роботов обычно устанавливаются на самой движущейся платформе и перемещаются вместе с роботом, то при зрительном очувствлении манипуляционных роботов используются два основных метода установки видеосенсоров.

В большей части промышленных робототехнических систем с техническим зрением видеосенсоры устанавливаются изолированно от манипулятора (обычно их располагают неподвижно сверху или сбоку рабочей сцены). Можно использовать несколько видеосенсоров для осмотра сцены с разных точек, возможные управляемые перемещения «линий зрения» сенсоров [65]. Независимая от манипуляционного робота установка видеосенсоров обладает тем

достоинством, что геометрические соотношения, связывающие их системы координат с системой координат рабочего пространства, не меняются в процессе работы. Кроме того, многие операции СТЗ и управляющего устройства манипуляционного робота можно выполнять параллельно, когда манипулятор выходит из поля зрения видеосенсора. С другой стороны, именно при захватывании объектов, когда их видеть важнее всего, рука робота загораживает часть рабочей сцены.

В этом смысле определенное преимущество имеют СТЗ типа «глаз на руке»: в них сам манипулятор никогда не попадает в поле зрения видеосенсора. Важно также, что они позволяют наводить рабочий орган на объект без измерения абсолютных координат последнего. Тем не менее роботы с «глазом на руке» пока распространены сравнительно нешироко, в первую очередь, вследствие большой сложности «привязки» получаемой количественной информации о геометрии объектов к неподвижной координатной системе. Сдерживающим фактором до последнего времени являлся также дефицит датчиков видеоинформации достаточно малых размеров и массы, пригодных для установки на руке робота. Наиболее перспективными представляются адаптивные робототехнические комплексы, в которых сочетаются обе рассмотренные выше схемы установки видеосенсоров, а также используются комбинации СТЗ с сенсорами других модальностей в единой мультисенсорной системе [67].

Однако независимо от способа размещения видеосенсоров полученная с их помощью информация используется для управления адаптивным роботом в соответствии с одним из двух следующих принципов. Первый базируется на непрерывном (или квазинепрерывном) поступлении видеосигнала обратной связи для коррекции траектории движения рабочего органа робота. По этому принципу действуют сервосистемы, минимизирующие отклонения текущего состояния рабочего органа от желаемого, которое определяется по данным визуального наблюдения за целевым объектом. Второй принцип основан на вводе информации от СТЗ в устройство управления робота дискретными порциями. Каждая такая порция служит для выработки программных движений на очередной интервал времени, в течение которого робот перемещается в следующее целевое положение «вслепую», т. е. без непрерывной визуальной обратной связи.

Каждый из указанных принципов использования видеоинформации для управления роботами имеет свою сферу приложения. Так, адаптивные сварочные роботы, визуально определяя стык свариваемых деталей, корректируют движение головки вдоль шва при непрерывном поступлении сигнала обратной связи. Такой способ находят применение при взятии движущихся деталей с конвейера, слежении за полосой, направляющей движения мобильного робота, поддержании заданного расстояния от краскопульта до окрашиваемой поверхности и т. п. В рамках этого под-

хода в последние годы разрабатываются методы визуального сервоуправления непосредственно по виду получаемого СТЗ изображения или по параметрам, рассчитываемым в результате его обработки. Так, в системе «глаз на руке» сервопривод перемещает манипулятор до тех пор, пока не будут достигнуты нужные значения таких параметров, как положение какой-либо выбранной точки объекта в системе координат «глаза», площадь изображения определенной грани объекта, отношение площадей соседних граней и т. п. Хотя системы с «визуальным сервоуправлением», несомненно, перспективны, до сих пор намного шире распространены СТЗ, основанные на втором из описанных выше принципов — «целуказании». Рассмотрим несколько подробнее методы использования зрительной информации в таких СТЗ роботов.

В простейшем случае по результатам работы СТЗ на основании априорно указанных условий принимается решение только о запуске или останове (прерывании) заранее заданной программы действий робота, уходе на ту или иную жесткую подпрограмму, изменении последовательности выполнения команд управляющей программы, полная информация о каждой из которых должна быть внесена в управляющее устройство еще до начала работы робота.

Более широкие возможности обеспечиваются при адаптивном изменении самих управляющих программ робота в соответствии с фактической обстановкой, определяемой по информации от СТЗ. Адаптивные роботы способны автоматически формировать движения в процессе работы без необходимости априорного указания человеком детальных законов изменения всех управляемых координат.

Рассмотрим, например, сравнительно несложную задачу адаптивного позиционирования манипулятора при захватывании предварительно неориентированной детали, лежащей на рабочей плоскости. Робот должен взять объект, положение и ориентация которого на рабочей плоскости определяются СТЗ по информации с телекамеры, неподвижно укрепленной над сценой (рис. 1.2). Введем следующие системы координат:  $O_a X_a Y_a Z_a$  — абсолютная;  $O_o X_o Y_o Z_o$  — связанная с объектом;  $O_p X_p Y_p Z_p$  — связанная с основанием робота;  $O_s X_s Y_s Z_s$  — связанная с захватным устройством (рабочим органом) робота;  $O_k X_k Y_k Z_k$  — связанная с телекамерой, точнее — с ее картинной плоскостью, на которую отображается изображение рабочего поля.

При расчете переходов из одной системы координат в другую очень удобен математический аппарат однородных координат [36]. Однородными координатами точки в трехмерном пространстве называются четыре числа  $h_1, h_2, h_3, h_4$ , не равные все одновременно нулю и связанные с ее декартовыми координатами  $x, y, z$  соотношениями  $x = h_1/h_4$ ;  $y = h_2/h_4$ ;  $z = h_3/h_4$ . Например, точке  $(x, y, z)$  можно поставить в соответствие вектор однородных координат  $(h_1, h_2, h_3, 1)^T$ . С помощью однородных координат мо-

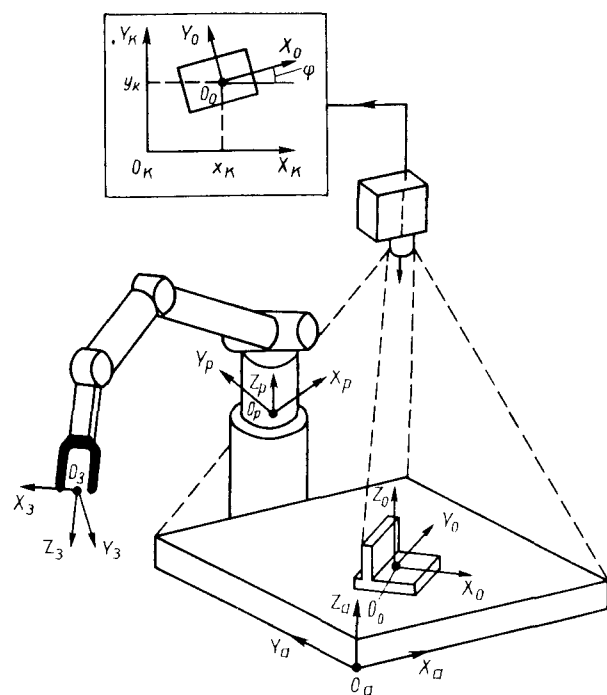


Рис. 1.2. Пример задачи взятия роботом неориентированного объекта по информации от СТЗ

жно компактно описать переход из некоторой координатной системы  $O_0XYZ$  в систему  $O_1X'Y'Z'$ , сдвинутую и повернутую относительно первой:

$$\mathbf{h}' = T_0^I \mathbf{h},$$

где  $\mathbf{h}'$  — вектор однородных координат в новой системе;  $\mathbf{h}$  — вектор однородных координат в старой системе, а матрица перехода имеет вид

$$T_0^I = \begin{pmatrix} x_{x'} & y_{x'} & z_{x'} & O_{0x'} \\ x_{y'} & y_{y'} & z_{y'} & O_{0y'} \\ x_{z'} & y_{z'} & z_{z'} & O_{0z'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь последний столбец представляет собой вектор однородных координат начала исходной системы в новой координатной системе, а  $3 \times 3$ -матрица, стоящая в верхнем левом углу, описывает поворот старой системы относительно новой (ее элементами являются координаты единичных векторов осей исходной системы в новой после совмещения их начал путем параллельного переноса).

Чтобы выполнить задание, в рассматриваемом примере робот должен вывести захватное устройство в такое положение, при котором объект оказался бы между его губками, а их ориентация обеспечивала надежное удерживание объекта. Положение и ориентацию захватного устройства можно описать в виде  $4 \times 4$ -матрицы перехода  $T^R$ , определяющей поворот и параллельный перенос системы  $O_3X_3Y_3Z_3$  относительно какой-либо выбранной координатной системы, в которой наиболее удобно задавать требуемое состояние захватного устройства. Для каждого конкретного типа объекта манипулирования (и для каждого устойчивого положения этого объекта в рабочей плоскости) можно заранее выбрать наиболее удобное номинальное положение захватывания, т. е. выписать матрицу перехода  $T_o^o$ , задающую требуемое (целое) положение системы координат захватного устройства  $O_3X_3Y_3Z_3$  в системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$ , связанной с объектом.

На основании рис. 1.2 можно заключить, что положение системы  $O_0X_0Y_0Z_0$  в картинной плоскости телекамеры (т. е. в системе координат  $O_KX_KY_KZ_K$ ) в данном случае удастся описать матрицей

$$T_o^K = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & x_K \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & y_K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\varphi$  — угол ориентации объекта в рабочей плоскости, который может быть найден СТЗ в реальном времени, как и координаты  $x_K$ ,  $y_K$  геометрического центра силуэта объекта.

При установке и калибровке телекамеры с помощью специальных методик можно определить матрицу перехода  $T_K^a$  из системы  $O_KX_KY_KZ_K$  в абсолютную систему координат  $O_aX_aY_aZ_a$ . Аналогично должны быть известны местонахождение основания робота и его пространственная ориентация, т. е. преобразование  $T_a^p$  из абсолютной системы  $O_aX_aY_aZ_a$  в систему  $O_pX_pY_pZ_p$ .

Напомним, что именно в системе координат  $O_pX_pY_pZ_p$ , связанной с основанием робота, решается обратная кинематическая задача: по заданному состоянию (положению и ориентации) захватного устройства определяются требуемые («программные») значения всех управляемых координат робота. Зная матрицы перехода  $T_a^p$ ,  $T_K^a$ ,  $T_o^K$ ,  $T_3^o$ , путем их последовательного перемножения слева можно рассчитать требуемое состояние захватного устройства в системе  $O_pX_pY_pZ_p$  как суперпозицию перечисленных преобразований:  $(T^K)_p = T_a^p T_K^a T_o^K T_3^o$ .

Заметим, что можно сразу произвести калибровку телекамеры, так, чтобы, миновав промежуточные переходы в абсолютную систему координат, получить матрицу, связывающую системы  $O_KX_KY_KZ_K$  и  $O_pX_pY_pZ_p$ . С использованием этой матрицы  $T_K^p$



расчет программного состояния захватного устройства по очередной порции информации о координатах  $x_k, y_k$  и ориентации  $\varphi$  объекта, поступающей от СТЗ, несколько упрощается:  $(T^R)_p = = T_k^p T_0^k T_3^0$ .

Итак, в данном примере СТЗ обеспечила целеуказание системе управления робота, которая по матрице  $(T^R)_p$  может решить задачу адаптивного позиционирования, т. е. определить программные значения всех управляемых координат робота для текущего рабочего интервала и выработать управляющие воздействия на исполнительные приводы для отработки оперативно сформированных программных значений, что и позволяет вывести захватное устройство (уже в отсутствие постоянной визуальной обратной связи) в нужную точку пространства с требуемой ориентацией.

Попеременное выполнение аналогичных описанным выше этапов целеуказания от СТЗ, определения следующего желаемого состояния рабочего органа и решения обратной кинематической задачи для упорядоченной последовательности «опорных» точек дает возможность осуществить адаптивное формирование пространственной траектории движений робота (в том числе с обходом препятствий). Если выбрать достаточно малый интервал между соседними точками, то с использованием соответствующих методов интерполяции можно в адаптивном режиме обеспечить контурное управление роботом, позволяющее перемещать его рабочий орган по требуемому пространственно-временному закону (например, вести сварку с заданной скоростью на основании видеоинформации о фактическом расположении серии точек стыка свариваемых деталей). Очевидно, что такой способ является альтернативой подходу с непосредственной визуальной коррекцией траектории в контуре непрерывной визуальной обратной связи без промежуточного расчета программных движений.

Способы использования видеоинформации в системах управления мобильных роботов в принципе можно свести к тем же вариантам, которые были рассмотрены выше для манипуляционных роботов:

изменение последовательности выполнения действий, каждое из которых полностью определено своей жесткой программой, на основании сигналов от СТЗ в соответствии с заранее указанными условиями;

адаптивная коррекция заданной траектории перемещения мобильного робота на основании видеоинформации, характеризующей его отклонение от требуемого пути;

целеуказание (определение с помощью СТЗ относительного положения робота и цели) для адаптивного наведения робота;

адаптивное формирование маршрута (прокладка трассы) мобильного робота в реальном времени по данным текущего осмотра местности;

управление исполнительными механизмами шагающих аппаратов (с теми же вариантами использования данных от СТЗ).

В заключение следует отметить, что, хотя использование видеоинформации в системах управления роботами позволяет обеспечить им широкий круг дополнительных функциональных возможностей, целесообразно выделить два принципиально различных класса роботов с визуальным оучувствлением.

Один класс составляют роботы, у которых в процессе работы изменяется только последовательность выполнения команд заранее заданной управляющей программы в зависимости от наличия или отсутствия сигналов СТЗ. Организация условных переходов для оперативного воздействия на ход жестких программ может быть обеспечена путем подключения СТЗ к устройствам как циклового, так и позиционного, контурного и позиционно-контурного управления. Несмотря на наличие средств внешнего оучувствления, такие роботы, как известно, относятся к роботам с *программным* (а не адаптивным) управлением [35, 41].

Роботы с *адаптивным* управлением, составляющие другой класс оучувствленных роботов, отличаются способностью автоматического изменения (формирования) управляющих программ непосредственно в процессе работы на основе информации (в том числе видеоинформации) о контролируемых параметрах внешней среды. В адаптивном режиме можно организовать как позиционирование рабочего органа робота, так и его движение по желаемой траектории, сопрягая СТЗ соответственно с позиционными или контурными (позиционно-контурными) устройствами программного управления. Перейдем к рассмотрению специфики методов и средств визуального оучувствления, обусловленной проблемой создания адаптивных роботов с техническим зрением.

### 1.3. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗРЕНИЮ АДАПТИВНЫХ РОБОТОВ

Специфика робототехнических задач обусловлена наличием множества ограничивающих факторов. Некоторые из них пришлось учитывать и в традиционных применениях технического зрения, но действие сразу всей совокупности ограничений во многих случаях определяет качественно новый уровень сложности визуального оучувствления роботов. К числу основных требований, предъявляемых к СТЗ адаптивных роботов, в первую очередь можно отнести следующие.

*Повышенная степень универсальности.* В отличие от традиционных средств технического зрения, применяемых в узкоспециализированных устройствах автоматизации, СТЗ универсальных роботов по своей сути должны обеспечивать решение возможно более широкого круга разнообразных функциональных задач (например, указанных в п. 1.1) и быть пригодными для работы в различных, в том числе нестационарных, условиях.



*Гибкость.* Это важное для робототехнических приложений понятие включает в себя: возможность частой сменяемости решаемых задач, быстроту и удобство перехода к новым типам сцен и классам объектов, в том числе путем переобучения СТЗ (как методом «показа», так и с помощью автономного перепрограммирования); способность работать с объектами, размеры, форма и другие параметры которых меняются в широком диапазоне; желательность целенаправленного выбора точности измерений, разрешающей способности, поля зрения, числа градаций яркости и прочих характеристик на разных стадиях осмотра сцены; простоту оперативной перестройки (вплоть до автоматической) при изменениях освещенности, контрастности фона, расстояния до объектов, угла обзора и т. п.

*Высокое быстроедействие.* Если недостаточная скорость СТЗ во многих традиционных приложениях приводит лишь к снижению общей ее производительности, то несвоевременное поступление результатов обработки и анализа видеoinформации в устройство управления робота может не просто ухудшить технико-экономические характеристики робототехнической системы, но и оказаться абсолютно несовместимым с требованиями технологии и техники безопасности. СТЗ робота должна удовлетворять жестким требованиям работы в реальном времени, т. е. не задерживать действия робота и не снижать темп роботизируемого процесса.

*Устойчивость к воздействиям окружающей среды.* Одной из основных побудительных причин роботизации является необходимость выполнения работ в тяжелых, а часто и вредных условиях — в горячих цехах и на холоде, в зонах повышенной радиации, высокого и низкого давления, в атмосфере агрессивных паров, сильной запыленности, в экстремальных средах (в космосе, под водой, в местах пожаров и т. п.). Поэтому при визуальном чувствовании роботов необходимо принимать специальные меры по защите видеоаппаратуры от воздействия этих факторов, а также по повышению устойчивости СТЗ к влиянию электромагнитных наводок и оптических помех, механических толчков и вибраций, влажности и других неблагоприятных воздействий.

*Необходимость миниатюризации.* Элементы СТЗ, устанавливаемые на подвижных звеньях манипуляторов («глаз на руке»), а также на мобильных роботах, должны иметь как можно меньшие размеры и массу, чтобы не ухудшать маневренность и динамические характеристики робота.

*Сильная ограниченность допустимых средств реализации.* Обычно из экономических соображений в СТЗ роботов приходится использовать широкодоступную элементную базу, устройства, не обладающие очень высокими техническими характеристиками, сравнительно маломощные вычислительные средства. Проблема осложняется и тем, что в отличие от многих других случаев применения ЭВМ для обработки видеoinформации, здесь на тех же вычислительных средствах бывает необходимо полностью или

частично решать одновременно другие — не менее важные — задачи (планирование действий роботов, расчет программных траекторий, управление движениями, обеспечение связи), которые также требуют значительной доли общих вычислительных ресурсов.

*Связь с существующими устройствами управления роботов.* Требуется обеспечить аппаратную и программную совместимость со стандартными системами управления роботов, соответствие характеристикам применяемых вычислительных средств, возможность эффективного сопряжения с имеющимися интерфейсами.

Несколько менее специфичны, но также весьма важны такие требования, как: большая разрешающая способность и точность измерений; высокая надежность; простота и удобство эксплуатации, технического обслуживания, ремонта; по возможности низкая стоимость.

С другой стороны, наличие в едином комплексе с СТЗ столь гибкого устройства, как робот, открывает определенные дополнительные возможности, которые в ряде случаев могут существенно облегчить процессы восприятия и анализа видеoinформации. Так, с помощью робота можно осуществлять активные воздействия на внешнюю среду в целях более эффективного осмотра сцен: убирать предметы, загромождающие нужные участки поля зрения, изолировать соприкасающиеся объекты друг от друга, подносить осматриваемые объекты к видеосенсору, поворачивать их, фиксируя в пространстве требуемым образом. При этом важно, что воздействие на среду формируется сразу же в процессе сбора видеoinформации по результатам ее оперативной обработки и анализа.

Робот может также обеспечить для СТЗ режим динамического восприятия сцены, либо осуществляя управляемые движения объектов относительно неподвижного видеосенсора, либо целенаправленно перемещая сами видеосенсоры (типа «глаз на руке»). Это позволяет вводить видеoinформацию путем последовательного сканирования рабочей области, осматривать сцены с разных точек зрения, находить и отслеживать характерные особенности объектов (края, места стыков, отверстия и т. п.). Имеется возможность выводить в нужные точки пространства источники освещения, укрепляемые на звеньях робота, организовывать управляемую подсветку объектов рассеянным, направленным или структурированным светом с разных сторон.

Кроме того, СТЗ при решении своих функциональных задач может использовать дополнительную информацию от других систем чувствования робота: тактильных, силомоментных, локационных. Например, при определении текстуры поверхности объекта число вариантов анализа изображений снижается, если имеются данные о шероховатости материала, полученные от датчика проскальзывания.

Совокупность перечисленных выше особенностей как осложняющих, так и упрощающих использование технического зрения в робототехнике, необходимо комплексно учитывать при формулировании технического задания на разработку СТЗ для конкретных робототехнических приложений. Такое техническое задание должно включать: полное техническое описание решаемых функциональных задач; требования к гибкости перестройки, перепрограммирования, возможности развития системы; сведения об объектах; данные о геометрии рабочей зоны, освещенности сцены, контрастности фона; метрологические требования; требования к быстродействию СТЗ; необходимые характеристики систем управления роботом и применяемых вычислительных средств, с которыми должна быть обеспечена аппаратная и программная совместимость СТЗ; требования к надежности и ремонтпригодности; эксплуатационные требования, характеристики условий функционирования; конструктивно-технологические требования; требования эргономики и технической эстетики; технико-экономические требования.

Комментируя отдельные пункты технического задания, прежде всего нужно подчеркнуть, что с самого начала формулирования функциональных задач для СТЗ следует стремиться максимально их упрощать. Методики упрощения функций СТЗ базируются на следующих принципах:

сведение трехмерных сцен к двумерным проекциям: используется то обстоятельство, что рассматриваемые объекты часто лежат на опорной плоскости и имеют конечное число устойчивых состояний либо фиксируются в пространстве (иногда самим же роботом), что позволяет надлежащим образом выбрать фокальную плоскость видеосенсора;

механическое разделение «навала» объектов на неперекрывающиеся и даже несоприкасающиеся объекты, для чего разработан целый ряд хорошо отлаженных технологий; здесь также можно использовать робот;

переход от многоградационных изображений к бинарным, поскольку во многих приложениях почти вся полезная информация об объекте заключена в его контуре (в этих целях целесообразно использовать специальные способы освещения);

перемещение объектов относительно видеосенсоров (и наоборот) для извлечения дополнительной информации: используются как неуправляемые (например, на конвейере), так и целенаправленные (с помощью робота или координатного стола) движения объектов, система типа «глаз на руке», сканирующие устройства;

применение специального освещения: рассеянный свет, устраняющий тени и блики; управляемая поочередная подсветка с разных сторон, позволяющая использовать их как дополнительную информацию; встречная подсветка, облегчающая переход к бинарным изображениям; структурированное освещение пространственно модулированным светом, дающее информацию о вносимых

объектом искажениях регулярных точек, полос или сеток, проектируемых на рабочую сцену; импульсное освещение, обеспечивающее «мгновенное» изображение движущихся объектов, и т. п.;

использование в процессе обработки и анализа изображений в СТЗ информации от других систем осязания роботов, а также модельных представлений робота о рабочей среде, базы данных САПР и др.

Требования к функциональной гибкости СТЗ должны формулироваться на основе данных о предполагаемой частоте сменяемости заданий роботу, связанной с его назначением (в крупносерийном, среднесерийном, мелкосерийном или единичном производстве, в непромышленной сфере, в специальных применениях). При определении потребностей в перестройке и развитии СТЗ должны учитываться перспективы аппаратных изменений (возможность перестановки и подключения новых видеосенсоров, необходимость в резервных разъемах, каналах связи, местах для установки дополнительных электронных плат и т. п.), степень возможных модификаций алгоритмического и программного обеспечения, требования к простоте и удобству переобучения СТЗ на новые виды объектов как путем автономного перепрограммирования (если имеется их формальное описание и оператор обладает достаточной квалификацией), так и путем «показа» (если это проще по условиям работы и доступны средства автоматического формирования классифицирующих признаков).

Описывая в техническом задании объекты, с которыми предстоит работать СТЗ, следует указывать диапазон их геометрических размеров, возможные формы, физические параметры (цвет, текстуру, отражательную способность и др.), различные характерные особенности, выявление которых способствует классификации объектов. При необходимости задают эталонные образцы объектов и разброс характеристик относительно эталона, данные о всех устойчивых положениях каждого объекта на опорной плоскости, наличии ржавых или масляных пятен, дефектов и т. п.

Размеры и форма рабочей зоны вместе с информацией об объектах и метрологическими данными во многом определяют выбор типа и мест установки видеосенсоров и осветительных устройств. При этом необходимо учитывать не только абсолютные, но и относительные размеры объектов и рабочей зоны, а также ее геометрию, чтобы обеспечить восприятие изображений нужных участков сцены с требуемыми метрологическими характеристиками. Важно также не создавать помех движениям исполнительных органов робота и технологического оборудования и наоборот — не загромождать поля зрения видеосенсора при выполнении манипуляционных операций.

Метрологические требования характеризуют выполнение СТЗ функций измерений геометрических или физических параметров объектов, их поиска, локализации и классификации. Они задают диапазоны изменений измеряемых величин, разрешающую спо-

способность (цену деления, число элементов изображения), меру и класс точности, стандартную и предельно допустимую погрешности при измерениях, приемлемые вероятности ошибок первого и второго рода (ложная тревога и необнаружение) при поиске, контроле и классификации.

Требования к быстродействию при обработке и анализе видеоинформации определяют допустимые временные затраты на решение всей функциональной задачи, т. е. производительность СТЗ. Они формулируются с учетом скоростных характеристик робота и темпов роботизируемых процессов или существенных изменений в окружающей среде, чтобы гарантировать работу СТЗ в реальном времени. Производительность СТЗ современных промышленных роботов достигает тысяч изображений в минуту. Типичное время обработки и анализа данных об одном объекте в зависимости от конкретных приложений меняется от миллисекунд до секунд.

Данные, необходимые для сопряжения разрабатываемой СТЗ с системой управления робота, контроллерами другого внешнего оборудования, а также с вычислительными устройствами роботизированного комплекса и с ЭВМ верхнего уровня, должны включать конструктивные характеристики используемых стоек, модулей, плат и разъемов, значения напряжений, токов и мощностей источников питания, уровни аналоговых и цифровых сигналов, их временные характеристики, типы интерфейсов, принципы, способы и режимы обмена информацией, вид организации связей, количество, частотные и нагрузочные характеристики линий связи и другую информацию об аппаратной совместимости. Для обеспечения программной совместимости необходимо знать стандарт применяемого кода, протокол обмена информацией, имеющиеся средства системного обеспечения, включая операционную систему, систему отладки, а также языковые средства, библиотечные программы, семантические и программометрические характеристики существующих пакетов пользовательских программ.

В числе требований к надежности и ремонтпригодности следует указывать приемлемые значения времени наработки на отказ, среднее время восстановления или вероятность восстановления за заданное время (с учетом желаемого состава и объема ЗИП), средний срок службы и другие характеристики сохраняемости, возможность нагруженного и ненагруженного резервирования, потребность в самоконтроле и самодиагностировании.

Эти требования тесно связаны со следующим пунктом технического задания, где должны быть описаны ожидаемые условия функционирования СТЗ робота и соответствующие эксплуатационные параметры, определяющие характер пользования системой, сроки, процедуры и удобство ее технического обслуживания. Необходимо в явном виде формулировать потребности в защите всех элементов СТЗ от вредных факторов внешней среды (радиации, теплоты, влажности, агрессивных газов, брызг красителей или

расплавленного металла, электромагнитных полей, оптических помех, вибраций и других механических воздействий).

Конструктивно-технологические и эргономические требования формулируются на основе действующих стандартов, а также правил техники безопасности с учетом перечисленных выше специфических особенностей СТЗ роботов, обуславливающих необходимость снижения размеров и массы, повышения гибкости, надежности и защищенности систем. Желательно ориентироваться на общедоступные технологии и элементную базу, шире использовать агрегатно-модульный принцип построения, позволяющий компоновать систему из унифицированных блоков, гибко учитывая особенности конкретной решаемой задачи.

Технико-экономические требования задают допустимую стоимость СТЗ, срок ее окупаемости, а также приемлемые затраты (средств, времени, материалов фондов) на ее разработку, изготовление, установку, наладку, испытания и эксплуатацию. Важно сопоставлять эти показатели с соответствующими затратами на робот и весь роботизированный комплекс, сравнивая интегральные технико-экономические характеристики работы роботов без визуального очувствления с вариантами возможного использования СТЗ, различающихся стоимостью и функциональными возможностями.

#### 1.4. ОБОБЩЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

Изучив требования технического задания, разработчик СТЗ робота должен прежде всего определить ее структурную и функциональную схемы, раскрывающие суть всех принципиальных операций по формированию, обработке и анализу изображений и устанавливающие порядок и условия преобразования видеоинформации, а также организацию взаимосвязи различных подсистем и блоков.

Кратко охарактеризуем основные группы функциональных операций обобщенной СТЗ робота.

*Формирование изображения:*

освещение рабочей сцены, включая управление порядком и временем включения и выключения осветительных приборов, направленностью и интенсивностью источников света, выбор вида структурированного освещения, изменение расположения осветителей;

автоматизированная настройка системы: наведение видеосенсора; фокусировка; выбор объективов и светофильтров; калибровка СТЗ и ее «привязка» к абсолютной системе координат или к системе координат робота;

аналоговые преобразования видеосигнала: фильтрация, линейное и нелинейное усиление, смещение нулевого уровня и другие

преобразования, обеспечивающие требуемые амплитудные и частотные характеристики, отношение сигнал—шум, электрические параметры;

ввод изображения в вычислительное устройство: выбор последовательности и частоты опроса видеосенсоров, пространственных точек съема видеoinформации (схемы сканирования); определение порога бинаризации (при вводе двухградационных изображений) или уровней квантования видеосигнала (для многоградационных изображений); собственно оцифровка видеосигнала с помощью аналого-цифровых преобразователей или компараторов; запоминание всего изображения или его части; пересылка данных в соответствующие блоки обработки видеoinформации;

предварительная обработка формируемых изображений: удаление шумов путем цифровой фильтрации и сглаживания; повышение контрастности (преобразование шкалы интенсивности, обострение перепадов, подчеркивание границ); коррекция геометрических и оптических искажений; вспомогательные математические операции над изображением (дифференцирование, логическое сравнение и т. п.); сжатие (кодирование) информации и пр.

#### *Сегментация изображения:*

декомпозиция изображения рабочей сцены на составляющие ее объекты, их группы, фрагменты и другие части;

выбор одного или нескольких «окон»;

разбиение изображения на характерные участки: выделение и прослеживание контуров; нахождение однородных областей;

выявление типичных особенностей изображений (углков, отверстий, выступов, выемок, меток, цветовых и текстурных неоднородностей).

#### *Описание изображения:*

проведение измерений и расчетов для получения количественных характеристик (признаков) объектов;

определение качественных (логических, «лингвистических») признаков для классификации объектов;

установление местоположения объектов (координат геометрического центра и/или других характерных точек);

нахождение ориентации объектов в рабочей области.

#### *Анализ изображения:*

распознавание образов или классификация объектов (сопоставлением с эталонными изображениями, принятием решения на основе дискриминирующих функций, структурно-синтаксическими и другими методами);

интерпретация сцены;

построение (уточнение) модели проблемной среды;

принятие решений о дальнейших операциях СТЗ.

*Связь с системой управления робота:*

обмен логическими сигналами (командными, синхронизирующими, блокирующими, прерывающими и др.); поддержка протокола обмена данными;

получение от системы управления робота запросов на выполнение функциональных задач технического зрения;

сообщение системе управления робота типов распознанных (классифицированных) объектов;

передача координат и параметров ориентации объектов и других количественных результатов обработки видеoinформации;

передача результатов интерпретации сцен и необходимых сведений о модели проблемной среды;

посылка требований на выполнение воздействий на среду в целях облегчения зрительного восприятия.

В конкретных СТЗ, применяемых в робототехнике, удельный вес каждой из описанных операций неодинаков, те или иные из них могут отсутствовать, объединяться с другими, выполняться в различной последовательности.

По характеру организации процесса прохождения информации через систему функциональные схемы СТЗ можно разделить на три следующие группы: 1) разомкнутые с неизменяемой последовательностью операций, когда видеoinформация регистрируется фиксированным способом, обрабатывается и анализируется по жестко определенной линейной цепочке алгоритмов; 2) с условными переходами, в которых в зависимости от условий внешней среды и/или от результатов текущей операции предусмотрено изменение порядка выполнения различных процедур формирования, обработки и анализа изображений, повторение уже пройденных этапов, установка новых значений определенных параметров системы, прохождение иных ветвей выполнения алгоритмов (при этом все условия переходов и решающие правила однозначно задаются еще до начала работы СТЗ, алгоритмы и параметры системы выбираются из заранее фиксированного набора); 3) адаптивные с обратной связью между различными этапами процесса технического зрения, позволяющей оперативно использовать новую информацию, приобретаемую по ходу их выполнения; автоматически настраивать аппаратную часть СТЗ, оптимизировать условия освещения, положения видеосенсоров, целенаправленно модифицировать классифицирующие признаки, гибко перестраивать алгоритмы в целях максимального приспособления к особенностям конкретной задачи.

Чем более высокий уровень функциональной гибкости требуется от робота с техническим зрением, тем более глубокая обратная связь необходима между всеми основными операциями СТЗ.

Процедуры формирования, обработки, сегментации, описания и анализа изображений целесообразно строить итеративно так, чтобы в зависимости от результатов данной фазы происходил

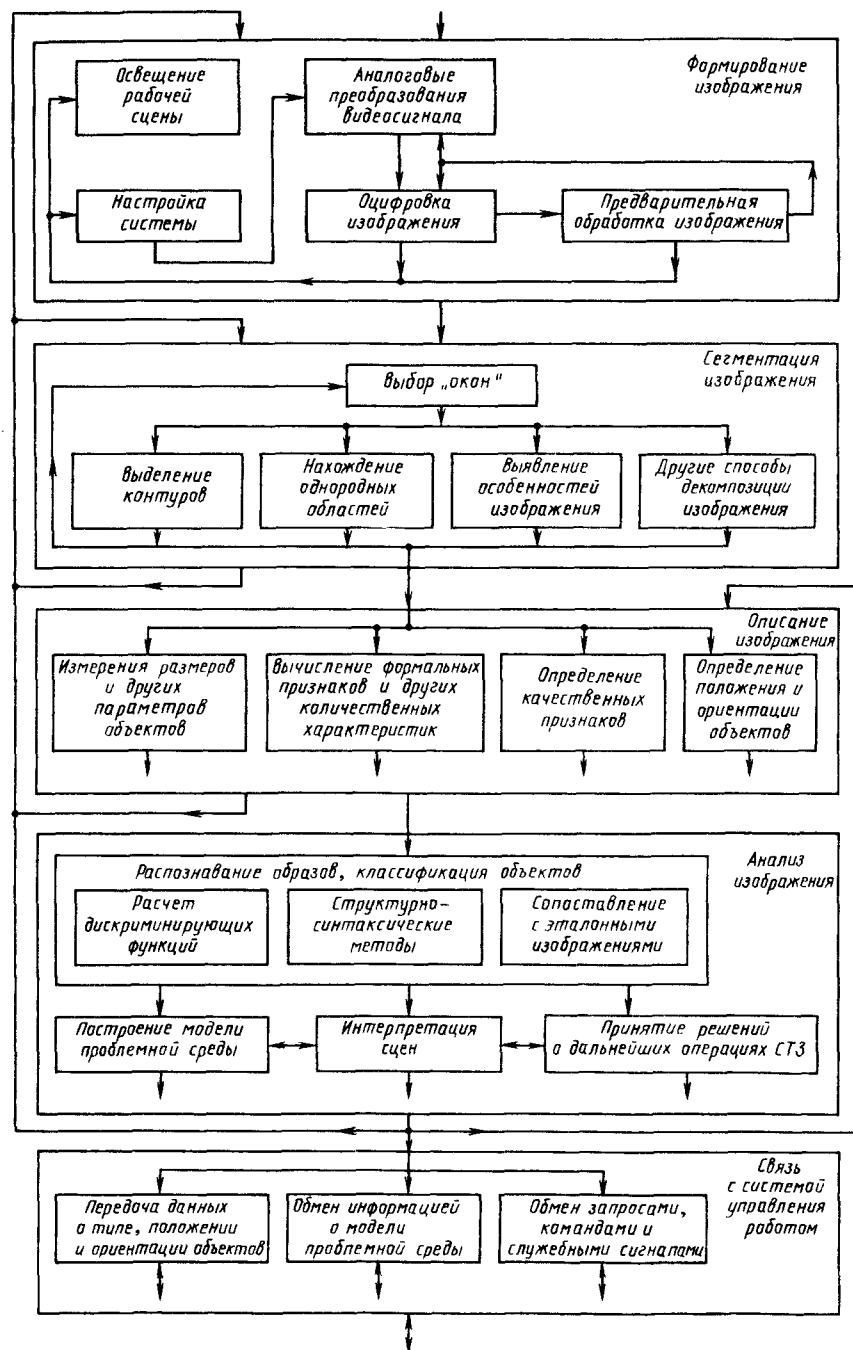


Рис. 1.3. Обобщенная функциональная схема СТЗ робота

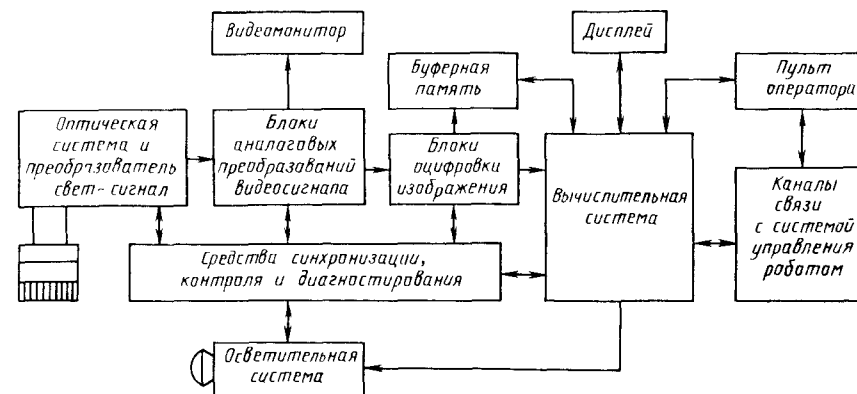


Рис. 1.4. Общая структура типичной СТЗ промышленного робота

либо переход к очередному этапу, либо его пропуск, либо возврат на какую-либо из предшествующих стадий, причем с активным использованием полученных знаний и результатов текущих операций для улучшения процесса технического зрения. Одна из возможных обобщенных функциональных схем СТЗ робота, построенная по этому принципу, показана на рис. 1.3.

При выборе структурной организации СТЗ робота необходимо исходить из требований технического задания, состава и назначения используемых функциональных блоков, сравнительных достоинств и ограничений возможных вариантов их реализации. Из структурной и функциональной схем должно быть видно, какие блоки реализуются аппаратными, какие программными, а какие аппаратно-программными средствами. Составляя схему, следует указать информационные и командно-логические связи между всеми функциональными блоками, а также их взаимодействие с вспомогательными блоками СТЗ (например, блоком контроля и диагностирования, видеомонитором, пультом оператора) и с системой управления роботом. Степень детализации схемы зависит от ее целевого назначения, стадии проектирования СТЗ и глубины проработки ее составных частей, от соотношения числа типовых и оригинальных блоков, способов их соединения, принципиальной важности учета тех или иных предположений, пожеланий, технических решений, выдвинутых на данной стадии, для дальнейших этапов разработки, внедрения и эксплуатации СТЗ. Так, на рис. 1.4 показана общая структура, отражающая принцип построения ряда современных СТЗ промышленных роботов. Более подробно обобщенную структурную схему СТЗ можно представить так, как показано на рис. 1.5. Система содержит: *K* осветительных устройств; *L* видеосенсоров; *M* схем аналоговых преобразований сигналов; *N* блоков, обеспечивающих оцифровку изображения (возможно, с промежуточным хранением в буферной

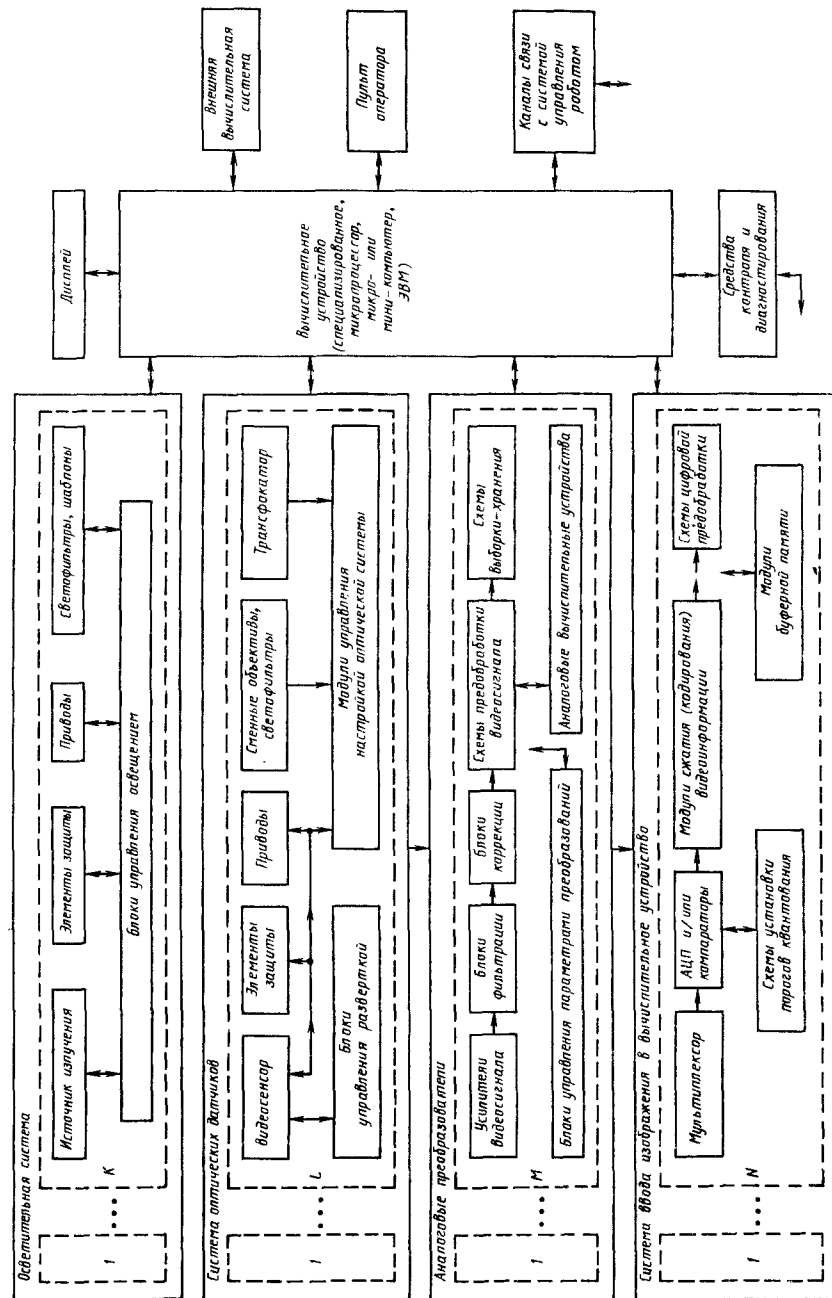


Рис. 1.5. Структурная схема СТЗ робота

памяти), предварительную цифровую обработку и сжатие видеoinформации; одно или более вычислительных устройств (включая специализированные вычислительные блоки, запоминающие устройства, а также соответствующее математическое обеспечение, реализующее программные функциональные модули); блоки связи с человеком—оператором, системой управления робота, ЭВМ других уровней и т. д.

Разумеется, возможны и иные структурные и функциональные схемы СТЗ роботов. Применяемые в робототехнике СТЗ отличаются широким разнообразием. Иллюстрацией этого могут служить примеры нескольких конкретных СТЗ роботов, приведенные в последней главе книги.

## ГЛАВА 2

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

#### 2.1. АППАРАТНЫЕ, ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ЗРИТЕЛЬНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОВ

Правильный выбор конкретных средств реализации СТЗ робота имеет чрезвычайно важное значение для достижения нужных технико-экономических показателей и удовлетворения требований технического задания. Как правило, перед разработчиками СТЗ робота встают проблемы, связанные с неоднозначностью выбора возможных вариантов построения многих функциональных блоков, которые могут быть реализованы аппаратными, программными или аппаратно-программными средствами.

К числу аппаратных средств СТЗ относятся: источники излучения; механические, оптические и электронные (оптико-электронные) узлы видеосенсора, включая приемники излучения; усилители, фильтры и другие преобразователи аналогового видеосигнала; компараторы, АЦП и ЦАП, схемы выборки-хранения, запоминающие устройства и прочие схемные элементы и блоки, функционирование которых не может гибко меняться по программе, задаваемой извне. Кроме того, в эту категорию формально попадает и сама аппаратура вычислительных устройств, осуществляющих функциональные операции СТЗ программным путем.

Программные средства принципиально отличаются от аппаратных возможностью быстрой перестройки алгоритма их функционирования вплоть до полной смены выполняемой операции. Они обычно реализуются с помощью математического обеспечения используемых универсальных вычислительных средств (компьютеров, мини- и микроЭВМ) либо путем программирования специализированных вычислителей, микропроцессорных устройств, перекоммутации аналоговых вычислительных блоков.

В современных СТЗ роботов широкое применение находят различные комбинации аппаратных и программных способов реализации, совместно используемых при осуществлении многих функциональных операций. Так, в процедуре бинаризации изображения применяют аппаратные компараторы с программно изменяемым порогом сравнения, при расчете которого по гистограмме яркости программный модуль, в свою очередь, обращается к специальным аппаратным счетчикам. Другими примерами аппаратно-программных средств могут служить узлы настройки видеосенсора, снабженные микропроцессорами; АЦП с программно уста-

навливаемыми уровнями квантования сигнала; системы с программным управлением сканированием, моментами съема и параметрами схем преобразования видеосигнала; блоки аппаратной поддержки алгоритмов Фурье-преобразования или расчета некоторых классифицирующих признаков в программах обработки и анализа изображений и т. д.

Сопоставляя между собой аппаратные, программные и аппаратно-программные средства, используемые в робототехнике, можно обратиться к рассмотрению двух крайних ситуаций, которые имели место в процессе развития СТЗ роботов.

Первые системы визуального очувствления промышленных роботов, как правило, базировались на использовании только аппаратных средств реализации и традиционных принципов построения систем промышленной автоматики. До сих пор большая часть СТЗ, внедренных в роботизированные производственные процессы, строится как не слишком сложные узкоспециализированные устройства. Весьма разнообразные аппаратные системы такого рода, реализованные на базе телекамер, матриц, линеек, групп фотоприемников и даже отдельных фотоэлементов, вполне успешно обеспечивают выполнение функций технического зрения в определенных промышленных приложениях, где условия работы робота более или менее стабильны, перестройка на новые виды операций происходит сравнительно редко, номенклатура объектов манипулирования остается почти неизменной. Конкретные функции, выполняемые СТЗ такого назначения, могут быть жестко заданы при ее разработке и наладке. При этом удается максимально использовать априорно известную информацию о всех возможных изображениях, их особенностях, характерных именно для данной группы объектов. Алгоритмы работы подобных устройств часто сводятся к простейшим логическим операциям, не требующим наличия ЭВМ, что упрощает и удешевляет реализацию СТЗ в конкретных случаях, но ограничивает их универсальность и гибкость, т. е. возможность их применения в адаптивных робототехнических системах, предназначенных для широко варьируемых приложений.

Высокое быстродействие и технико-экономическая эффективность, удобство эксплуатации и надежность аппаратных СТЗ, достигаемые в номинальных условиях функционирования робота, к сожалению, не сохраняются при отклонении от этих условий, в том числе при необходимости быстрого перевода робота на новые операции с другой номенклатурой объектов. Более того, в этих случаях «жесткость» аппаратной реализации СТЗ снижает общую производительность и затрудняет эксплуатацию роботизированного комплекса в целом, уменьшает надежность его работы.

С другой стороны, известны многочисленные примеры, когда в лабораторных робототехнических системах типа глаз—рука все основные функциональные блоки СТЗ (за исключением самих видеоприемников и некоторых вспомогательных узлов) пытались



строить целиком программным путем с использованием достаточно мощных ЭВМ. Для экспериментальных исследований подобного рода характерна методология, принятая в работах по искусственному интеллекту: главные усилия направляются на создание теории и методов принятия решений на основе построения моделей проблемной среды, получения описаний пространственных сцен в некотором алфавите первичных понятий, алгоритмов выдвижения, проверки и уточнения гипотез с использованием как априорной, так и текущей контекстной информации. При рассмотрении проблемы с этих позиций обычно допускают существенные упрощения реальности.

Так, многие исследователи, абстрагируя решаемые задачи, ограничивались «миром многогранников», сценами из простейших тел со специально подобранной текстурой, идеальными условиями освещения и контрастности фона и т. п. Практическая эффективность этих исследовательских систем в смысле быстрогодействия и затрат вычислительных ресурсов, как правило, была очень невысокой, поскольку эти требования предъявлялись к ним далеко не в первую очередь. Тем не менее активное изучение многих аспектов зрительного восприятия с точки зрения теории искусственного интеллекта позволило накопить определенный опыт по программной организации систем машинного зрения, отобрать полезные алгоритмы декомпозиции сложных сцен, нахождения пространственных соотношений между объектами, распознавания образов и др. Однако общий анализ результатов этих работ приводит к выводу, что, хотя программные средства обеспечивают высокий уровень функциональной гибкости, широкие адаптивные возможности и удобство пользования, на сегодня чисто программная реализация алгоритмов получения, обработки и анализа видеoinформации вряд ли в состоянии дать удовлетворительное решение многих первоочередных задач СТЗ роботов при приемлемых вычислительных затратах.

В настоящее время разработчики систем очувствления, ориентированных на применение в робототехнике, активно ищут компромиссы между более или менее общими, но излишне «академическими» подходами и достаточно практичными, но чересчур частными техническими решениями. Тенденция сочетания эффективности аппаратных средств и гибкости программных путей реализации характерна для большинства конкурентоспособных СТЗ современных роботов, которые все чаще строятся как единый комплекс аппаратно-программных средств зрительного очувствления. Бурный прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники делает вполне реальным широкое использование в общем контуре аналоговых модулей и микропроцессоров, оптико-электронных приборов и заказных СБИС, традиционных логических блоков и параллельных перестраиваемых вычислительных структур. Только доскональное знание возможностей и ограничений каждого из привычных и новейших способов реали-

зации вместе с полным учетом специфических особенностей решаемого класса робототехнических задач и конкретных технико-экономических требований позволяет приблизиться к наиболее рациональному распределению функций между аппаратными, программными и аппаратно-программными средствами зрительного очувствления робота.

Функциональные возможности, эффективность и гибкость СТЗ робота существенно зависят от ее *алгоритмического обеспечения*. Продуманный выбор совокупности алгоритмов выполнения операций ввода, обработки и анализа видеoinформации столь же важен, как и применение высококачественных видеосенсоров, совершенных вычислительных устройств и другой аппаратуры СТЗ. Создание по-настоящему эффективных систем зрительного очувствления роботов вряд ли возможно путем простого «механического» объединения аппаратных средств и алгоритмического обеспечения, разработанных независимо друг от друга без учета их взаимообусловленности и совместного влияния на структурно-функциональную организацию системы в целом. С самого начала составления конкретного алгоритма решения задачи технического зрения необходимо четко определить, на какой арсенал средств аппаратной поддержки можно рассчитывать при его реализации — будет ли это более или менее мощная универсальная ЭВМ, стандартный набор микропроцессоров, заказная СБИС, параллельная вычислительная система или другие устройства, каковы их доступные технические возможности и ограничения по быстродействию, памяти и остальным существенным характеристикам.

Математические методы, логические и вычислительные процедуры, способы программного воплощения следует выбирать так, чтобы максимально использовать достоинства и обойти недостатки используемых технических средств. И наоборот, закладываемая в систему универсальная и специализированная аппаратура должна быть как можно полнее приспособлена для реализации именно тех алгоритмов, которые предполагается применять для решения поставленных задач.

Рациональное разделение функций между аппаратными и программными способами реализации, между универсальными и специализированными средствами, цифровыми и аналоговыми вычислительными устройствами, последовательными и параллельными структурами достижимо только в результате системного подхода, предполагающего разработку алгоритмического и аппаратного обеспечения СТЗ робота с единых позиций. При этом необходимо всесторонне учитывать особенности всех основных режимов пользования СТЗ робота: настройки, обучения, работы.

Следует подчеркнуть, что специфика робототехнических приложений сказывается на алгоритмической поддержке многих этапов функционирования СТЗ робота не в меньшей — если не в большей — степени, чем на выборе ее аппаратных средств. Как уже указывалось, при зрительном очувствлении роботов далеко не

всегда удается непосредственно воспользоваться теми методами и алгоритмами, которые успешно применяются при решении более традиционных задач технического зрения в других областях. Это связано с необходимостью одновременно удовлетворять совокупности жестких требований, которые не только сложны сами по себе, но и могут вступать в противоречия друг с другом.

Так, с одной стороны, чтобы выполнить обязательное условие работы в реальном времени, используемые алгоритмы должны быть как можно более простыми и допускать эффективную вычислительную реализацию. С другой стороны, очень широкий круг решаемых функциональных задач, перечисленных в п. 1.1, и стремление повысить универсальность СТЗ робота заставляют отказываться от примитивных алгоритмических решений и обращаться к достаточно сложным методам обработки и анализа видеoinформации. Кроме того, важнейшее для робототехники требование гибкости системы обеспечивается за счет использования множества разнообразных алгоритмов с большим числом варьируемых параметров, разветвленных процедур выбора и «адаптации» нужного алгоритма при смене решаемой задачи, переходе к новому классу объектов, изменении условий рабочей среды, настройке метрологических и других характеристик. В то же время следует учитывать, что пользователями СТЗ в робототехнике (особенно в массовых применениях промышленных роботов) часто являются лица средней квалификации, не посвященные в тонкости проблемы распознавания образов, математических методов обработки и анализа видеoinформации, программирования ЭВМ. Поэтому здесь, в отличие от многих применений машинного зрения в научных исследованиях, для достижения желаемой гибкости системы приходится дополнительно разрабатывать большой объем «сервисных» алгоритмов и программ, дающих возможность производственному персоналу удобно и оперативно выполнять настройку и переобучение СТЗ.

На этапе настройки нужны автоматизированные процедуры выбора поля зрения видеосенсоров, задания порядка сканирования, разрешающей способности, фокусировки и диафрагмирования, управления сменой объективов, светофильтров, освещением и т. п. Серьезного внимания требует специфическая проблема калибровки СТЗ с привязкой ее системы координат к координатной системе робота. При обучении СТЗ работе с объектами нового типа оператору робота не всегда удается быстро и правильно находить полный набор характерных признаков той или иной детали, однозначно отличающих ее от других. Поэтому резко возрастает роль алгоритмов автоматического формирования классифицирующих признаков при обучении «показом». Трудности реализации большого числа специфических проблемно-ориентированных алгоритмов усугубляются необходимостью включения в те же объемы памяти и развитого системного математического обеспечения, поддерживающего диалоговый режим общения пользователя-

неспециалиста с СТЗ, интерактивные процедуры ее настройки и обучения, наглядное представление нужной информации оператору, в том числе с помощью средств машинной графики.

Еще одной особенностью, затрудняющей создание алгоритмического обеспечения СТЗ роботов, в котором сложность решаемых задач сочеталась бы с требованием работы в реальном времени, является практическая невозможность в подавляющем большинстве случаев при реализации разрабатываемых алгоритмов и программ ориентироваться на новейшие и самые мощные средства вычислительной техники. Экономические, массогабаритные и многие другие ограничения допускают использование в СТЗ роботов лишь сравнительно дешевых и простых вычислительных устройств со средними быстроем действиями и объемом памяти. Существенно, что часто большая доля общего вычислительного ресурса должна быть предоставлена для осуществления других функций информационно-управляющей системы и поддержки эффекторной и коммуникационной систем робота.

В то же время, как уже отмечалось, возможность активного целенаправленного воздействия на среду с помощью робота помогает в определенных случаях упростить алгоритм восприятия и анализа видеoinформации. Благодаря наличию робота часто удается свести задачу СТЗ к рассмотрению изолированных объектов, обойти проблему окклюзий (загораживания одних объектов в поле зрения видеосенсора другими), эффективно организовать осмотр рабочей сцены, оперативно проверять и уточнять гипотезы, выдвигаемые по результатам работы СТЗ. Реализация возможности гибко комбинировать данные, получаемые от СТЗ и от других систем очувствления робота, требует нетрадиционных алгоритмов «слияния информации» [67].

Перечисленные особенности робототехнических задач делают актуальной — наряду с попытками приспособить известные алгоритмы переработки видеoinформации, хорошо зарекомендовавшие себя в других приложениях, для очувствления роботов — разработку новых алгоритмических и программных средств, обеспечивающих эффективную поддержку всех режимов функционирования СТЗ робота (настройки, обучения, работы) и всех этапов технического зрения, отраженных на обобщенной схеме (см. рис. 1.3). Перейдем к рассмотрению алгоритмов формирования, сегментации, описания и анализа изображений, которые получили широкое распространение в СТЗ роботов либо представляются перспективными для решения робототехнических задач.

## 2.2. АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

Этап формирования изображений включает следующие подэтапы: настройка системы, в том числе подбор освещения рабочей сцены; аналоговые преобразования видеосигнала; собственно ввод

изображения в ЭВМ или другое решающее устройство; предварительная обработка оцифрованного изображения в соответствии с различными алгоритмами его «улучшения» и сжатия информации в целях облегчения дальнейших этапов технической зрения.

**Настройка СТЗ.** Алгоритмы автоматизированной настройки системы очень сильно зависят от используемой аппаратуры (датчиков, источников света, вычислительных средств, оборудования рабочей среды), а также от конкретного вида рассматриваемой сцены (типа объектов, степени их изолированности, фона, наличия известных особенностей в поле зрения для «привязки» СТЗ). Обычно алгоритмы освещения сцены сводятся к заранее задаваемым жестким программам управления моментами включения и выключения осветительных приборов в определенном порядке, смены транспарантов при использовании структурированного освещения и др. В ряде современных систем применяется управляемая подстройка интенсивности источников света и/или их пространственной направленности, которая осуществляется в контуре обратной связи по специальным программам до удовлетворения выбранных критериев зрительного восприятия [27, 78]. Концептуально эти процедуры близки к алгоритмам подбора параметров яркости и контрастности в видеоканале СТЗ, с которыми они, вообще говоря, должны использоваться совместно, дополняя друг друга. Это же относится и к автоматизированному выбору светофильтров, согласованно устанавливаемых как перед источниками, так и перед приемниками излучения.

Автоматизация настройки видеосистемы предусматривает также наведение видеосенсора на нужный объект — выбор поля зрения, фокусировку и диафрагмирование объектива. При рассмотрении сцен с изолированными объектами определяется такое расположение камеры и такие параметры оптического тракта, при которых объекты полностью попадают в заданную рамку; в других случаях эту рамку можно наложить на нужный фрагмент сцены, «привязывая» ее к некоторым характерным точкам. В робототехнической практике получили распространение алгоритмы грубо-точного наведения, когда сначала поле зрения выбирают приближенно на основе наиболее резких отличий объекта от фона (по яркости, цвету, текстуре и т. д.), а затем итеративно уточняют с увеличением разрешающей способности и нахождением более тонких характеристик. Появляются системы наведения, в которых используется более одного видеосенсора. Так, в СТЗ мобильного робота [57] одна подвижная телекамера с широкоугольным объективом служит для осмотра всей сцены, а вторая — с длиннофокусным объективом — наводится на выбранные участки для их укрупненного рассмотрения. Известна [65] стереоскопическая СТЗ, в которой можно производить как совместное наведение пары камер, установленных на подвижной платформе с четырьмя управляемыми степенями подвижности, так и раздельное управ-

ление поворотом, фокусировкой, диафрагмированием и увеличением каждой камеры.

Часто «наведение» осуществляется без фактических перемещений видеосенсора или настройки оптической системы — путем управляемого выбора «окна» съема видеoinформации. При работе с объектами, движущимися относительно видеосенсора (например, в случае установки линейки фотоприемников над конвейером, перемещающим рассматриваемые детали), «наведение» заключается в правильном выборе моментов считывания видеосигнала, которые часто определяются с помощью дополнительных датчиков.

Перспективными представляются методы визуального сервоуправления роботом при наведении укрепленного на его руке видеосенсора, активное перемещение которого продолжается до удовлетворения некоторого функционального критерия. Можно, например, потребовать вывода объектива на центральную линию отслеживаемого стыка свариваемых элементов, или переноса его к отверстию в детали при сборке, или приближения видеосенсора к сцене до достижения заданного отношения площадей объекта и фона и т. д.

Алгоритмы автоматической фокусировки оптической системы часто основываются на методах повышения уровня высокочастотных составляющих пространственного спектра изображения. Можно, например, стремиться максимизировать площадь, занятую элементами изображения, в которых градиент яркости превышает заранее указанный порог.

Ведутся исследования возможности применения в робототехнике алгоритмов автоматической настройки СТЗ, базирующихся на математических моделях видеосенсора, которые описывают физические процессы и геометрические преобразования, происходящие при восприятии сцены [27, 38]. Такие модели в принципе позволяют до некоторой степени учесть различные искажения, обусловленные параллаксом, нелинейностью и неоднородностью характеристик датчиков, оптической системы, электронного тракта, и даже частично скомпенсировать их с помощью корректирующих математических преобразований изображения.

За рамками настоящего изложения остается широкая гамма полуавтоматических способов настройки СТЗ с участием человека-оператора, включая и развивающиеся методы, основанные на использовании современных систем автоматизированного проектирования и средств машинной графики.

Формально относящиеся к этапу настройки процедуры калибровки СТЗ и ее «привязки» к системе координат робота имеют особое значение для рассматриваемых приложений и будут подробнее рассмотрены в разделе, посвященном сопряжению СТЗ с системой управления робота.

**Аналоговые преобразования.** Алгоритмы аналоговых преобразований видеосигнала на стадии формирования изображения

в СТЗ, как правило, реализуются аппаратными средствами и служат для обеспечения требуемых электрических характеристик сигнала (амплитудного диапазона, спектра частот и др.), обеспечения приемлемого отношения сигнал—шум, подчеркивания тех или иных информативных компонент сигнала. С этой целью используются многие широко применяемые в традиционных приложениях схемы полосовых, заградительных и комбинированных фильтров, линейные и нелинейные усилители (в том числе с управляемым коэффициентом усиления), пиковые детекторы, устройства слежения-хранения, логические элементы, операционные решающие устройства. Робототехническая специфика при выполнении этих функций не играет особой роли, поэтому здесь мы ограничимся лишь одним примером реализации аналоговых преобразователей видеосигнала в СТЗ.

В робототехническом комплексе «i-bot», серийно выпускаемом в США, робот PUMA-560 благодаря сопряжению с СТЗ способен захватывать детали сложной формы, лежащие навалом в таре. Перед вводом видеoinформации в микропроцессор Intel 8086 специальный аппаратный модуль выполняет расширение диапазона аналогового видеосигнала. Смысл этой операции состоит в усилении полезной составляющей сигнала и улучшении контрастности изображения. С помощью двух управляемых ограничителей «срезаются» нежелательные пики сигнала, вызванные слишком сильными бликами. Кроме того, временно удаляются синхрои́мпульсы, знак которых относительно нулевого уровня, соответствующего фону, устанавливается противоположным знаком видеосигнала. При настройке систем человек-оператор имеет возможность указать уровень фона и наибольшую допустимую яркость в отсутствии световых помех. Схема управляемого смещения нулевого уровня в сочетании с автоматической регулировкой усиления обеспечивает нормализацию сигнала с максимальным растяжением его информативного диапазона. К нормализованному аналоговому сигналу непосредственно перед его оцифровкой снова добавляются синхрои́мпульсы.

**Ввод изображения в ЭВМ.** Прежде чем перейти к алгоритмам этого подэтапа, дадим точное определение понятия «изображение».

В общем случае под *изображением* рабочей сцены будем понимать двумерную функцию  $g(x, y)$ , задающую для каждой точки  $(x, y)$  выбранной картинной плоскости значение  $g$  яркости (освещенности) соответствующей точки сцены. Будем считать рассматриваемый участок картинной плоскости (выбранной плоской проекции рабочей сцены) прямоугольником размером  $X \times Y$  и поместим начало системы координат  $Oxy$  в его левый нижний угол. Тогда  $x \in [0, X]$ ,  $y \in [0, Y]$ . Обычно вместо исходного изображения  $g(x, y)$  в память ЭВМ вводится массив значений  $G(i, j)$ , задаваемый на целочисленной решетке  $i = \overline{0, N_x}$ ,  $j = \overline{0, N_y}$ , покрывающей всю область  $X \times Y$  или ее некоторую подобласть. Значение  $G$  в узловой точке представляет усредненную яркость  $g$

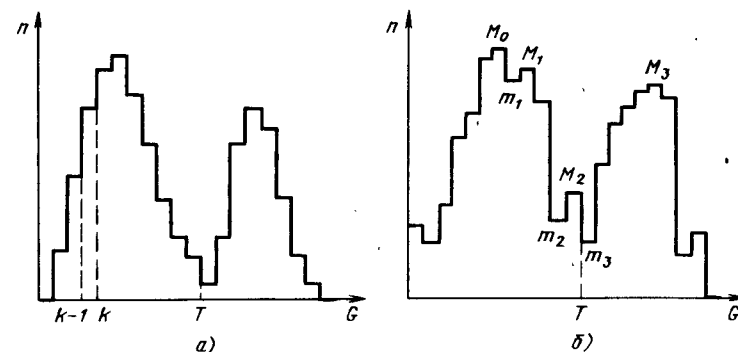


Рис. 2.1. Определение порога бинаризации по гистограммам яркости

элемента изображения в окрестности этой точки. Чаще всего считают, что элементы изображения — *пиксели* — имеют прямоугольную форму, хотя не исключены и иные виды разбиения картинной плоскости. Максимальный шаг  $h$  пространственной решетки при оцифровке — вводе исходного изображения в память ЭВМ в виде функции  $G(i, j)$  — должен выбираться из условия  $h < 1/(2f_m)$ , где  $f_m$  — максимальная пространственная частота изображения.

Кроме пространственной дискретизации, оцифровка изображения предусматривает квантование уровней яркости. Обычно для этого используются аналого-цифровые преобразователи или компараторы, причем в СТЗ роботов все чаще применяют алгоритмы с оперативным управлением порогами сравнения. После квантования функция  $G(i, j)$  принимает целочисленные значения:  $G(i, j) = k$  при  $T_{k-1} \leq G(i, j) < T_k$ ,  $k \in [0, k_{\max}]$ , где  $T_k$  — значение  $k$ -го порогового уровня. В случае  $k_{\max} = 1$  оцифрованное изображение называется *бинарным* (двуградационным), в случае  $k_{\max} > 1$  — *полутонным* (многоградационным).

Рассмотрение алгоритмов оцифровки изображений начнем с наиболее распространенного в СТЗ промышленных роботов случая, когда для всего поля зрения используется единственное постоянное значение порога бинаризации  $T$ . Для автоматического выбора этого порога в робототехнических приложениях чаще всего строят гистограмму яркости (показывающую, какое число  $n$  пикселей картинной плоскости имеет данную яркость), после чего ищут такое значение яркости, которое соответствует минимуму гистограммы на впадине между двумя основными ее пиками, отвечающими яркостям фона и объектов (рис. 2.1, а). Этот простой алгоритм дает вполне приемлемые результаты при достаточной контрастности изображений объектов и фона, когда они дают два четко отличающихся друг от друга пика, соответствующих приблизительно постоянным уровням яркости, которые после оцифровки превратятся в нули и единицы. Для определенности будем

считать, что фон описывается нулевой яркостью, объекты — единичной.

Однако вследствие неидеальной контрастности реальная гистограмма редко бывает бимодальной: наряду с двумя основными пиками она имеет множество дополнительных, отражающих наличие теней и бликов, шумов и неоднородной чувствительности видеосенсора (рис. 2.1, б). На практике приходится «улучшать» гистограммы путем их предварительного сглаживания либо подсчета вклада различных пикселей в гистограмму с весами, зависящими от амплитуды градиента яркости  $\nabla G(i, j)$  в каждой точке. Пиксели с большими значениями  $|\nabla G(i, j)|$ , по всей вероятности, лежат в окрестности границы между фоном и объектом, поэтому в ряде алгоритмов среднее значение их яркости сразу выбирают в качестве порога бинаризации  $T$ . В других алгоритмах предполагается, что пиксели с малым градиентом яркости с большей вероятностью лежат внутри либо объекта, либо фона, а не на их границе, и поэтому вес их вклада в гистограмму должен быть обратно пропорциональным  $|\nabla G(i, j)|$ . В работе [15] описана СТЗ робота, для которой был введен дополнительный порог  $\epsilon$  по градиенту, а бинаризация изображения осуществлялась по формуле

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } G(i, j) \geq T \wedge |G(i, j)| \leq \epsilon; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Следует отметить, однако, что методы такого рода приводят к смещению фактического положения пиков на гистограмме яркости, а следовательно, к искажению силуэтов объектов при бинаризации. В [72] предложен алгоритм выбора порога, основанный не на сглаживании или ином «улучшении» мультимодальной гистограммы, а на нахождении основных ее пиков путем сравнения всех локальных максимумов. Этот алгоритм был успешно применен в СТЗ робота и состоит в следующем. После нахождения глобального максимума  $M_0$  (см. рис. 2.1, б) для всех локальных максимумов рассчитывается отношение  $\alpha_i = M_i / (m_i + 1)$ , где  $M_i$  — значение  $i$ -го локального максимума, а  $m_i$  — значение глобального минимума в диапазоне между глобальным максимумом и рассматриваемым локальным. Тот из локальных максимумов, для которого значение  $\alpha_i$  окажется наибольшим, выбирается в качестве второго основного пика гистограммы (пик со значением  $M_2$  на рис. 2.1, б), после чего нетрудно найти порог бинаризации (например, уровень яркости, соответствующий значению  $m_1$ ). Алгоритм работает, даже если высоты побочных пиков сравнимы с высотами основных, и определяет положения последних без смещения.

Выше были рассмотрены алгоритмы, в которых использовался так называемый глобальный порог бинаризации, определяемый всем изображением в целом и не зависящий ни от его локальных

свойств, ни от координат оцифровываемой точки, т. е. постоянный для всего поля зрения. При более общем подходе вводят *локальный* порог, изменяющийся при переходе от одной части конкретного изображения к другой в зависимости от локальных свойств изображения в данном месте, или *динамический* порог, который кроме того зависит от координат  $(i, j)$ .

Локальный порог обычно вычисляют с помощью некоторых операторов, работающих в сравнительно небольшом окне, которое накладывается на окрестность рассматриваемого пиксела. Можно, например, усреднять яркость по окну размером  $4 \times 4$  и сравнивать среднюю яркость в данной точке  $(i, j)$  со средней яркостью элементов, отстоящих от  $(i, j)$  на расстояние четырех пикселей: если средняя яркость в данной точке оказывается больше, чем в двух диаметрально противоположных относительно нее точках (по любому из рассматриваемых направлений), то пиксел  $(i, j)$  относят к объекту; в противном случае — к фону. Еще в одном из алгоритмов бинаризации с локальным порогом используется формула

$$G(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } G(i, j) > \bar{G}(i, j) - D(i, j); \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $D(i, j) = 0,5 [G(i, j) - G(i - 1, j) + G(i, j) - G(i + 1, j)]$ , а  $\bar{G}(i, j)$  — среднее значение яркости на выбранном окне.

Фактически локальный порог используется и в простом алгоритме, широко распространенном в СТЗ роботов, когда диапазоны яркости фона и объектов существенно перекрываются. При этом вводят два глобальных пороговых значения  $T_n$  и  $T_o$ ; пиксели, для которых  $G(i, j) < T_n$ , заведомо причисляют к фону, пиксели с  $G(i, j) > T_o$  — к объекту, а «сомнительные» точки, где  $T_n \leq G(i, j) \leq T_o$ , классифицируют с помощью логических процедур, например, относят к тому классу, куда попало большинство соседей данной точки, уже прошедших бинаризацию.

Если разбить все поле зрения на подобласти, в которых легко выбрать локальные пороги (скажем, на участки с двумя четко выраженными пиками гистограммы яркости), то далее можно провести пространственную интерполяцию порога бинаризации через центры таких подобластей. Это дает переменный (динамический) порог для всего поля зрения в целом. На практике динамический порог используется для коррекции неравномерной освещенности рабочей сцены, неоднородной чувствительности видеосенсора и т. п. искажений изображения.

В последнее время наблюдается расширение области применения СТЗ, работающих с многоградационными изображениями, в робототехнике. Обработка и анализ полутоновых картин позволяют точнее локализовать объекты (особенно в случае трехмерных рабочих сцен), определить текстуру их поверхности, рассчитать более широкий набор классифицирующих признаков. При вводе

полутонных изображений в ЭВМ квантование на несколько градаций яркости чаще всего производится с равномерным шагом между последовательными пороговыми уровнями. Для выбора этих уровней в принципе можно воспользоваться описанными выше методами. Несколько сложнее реализовать неравномерное квантование, которое целесообразно применять, когда вероятности появления различных уровней яркости на изображении существенно не одинаковы. Тогда реже встречающимся уровням яркости ставят в соответствие больший шаг при квантовании, что делает более равномерной гистограмму дискретных значений яркости. Такой алгоритм увеличивает контрастность получаемого изображения.

Фактически мы уже приступили к описанию методов предварительной обработки изображений в ЭВМ. Прежде чем подробнее остановиться на этом важном вопросе, уточним терминологию. Будем говорить, что некоторый блок осуществляет обработку изображения, если как на его входе, так и на его выходе имеют место изображения (двумерные функции яркости), причем изображение на выходе представляет собой в каком-то смысле «улучшенное» преобразование входного. Если же на вход блока поступает изображение, а на его выходе получается определенная совокупность количественных и/или качественных характеристик этого изображения, то имеет место операция описания изображений.

**Предварительная обработка изображений.** Эта группа операций направлена на облегчение дальнейших этапов технического зрения и проводится в целях коррекции различных искажений, улучшения контрастности, удаления шумов и т. п. Следует отметить, что все чаще стадия предварительной обработки практически совмещается с вводом изображения, как в приведенном выше примере; при этом в память ЭВМ сразу заносится «улучшенное» изображение. С другой стороны, размыта грань между этапами предварительной обработки и сегментации изображения, которые иногда осуществляются общими комбинированными алгоритмами. Важной тенденцией является рост числа реализаций функций предварительной обработки аппаратными и аппаратно-программными средствами [27, 44, 78]. Однако в СТЗ роботов более универсальные возможности пока открывают алгоритмические методы предварительной обработки оцифрованного изображения.

Алгоритмы коррекции обнаруженных геометрических искажений, обусловленных, например, отклонением оптической оси объектива от перпендикуляра к рабочей плоскости, аберрациями оптической системы и другими причинами, основаны на двумерных геометрических преобразованиях изображения. Новое изображение получается по формулам вида  $x' = \xi(x, y)$ ;  $y' = \eta(x, y)$ , где функции  $\xi$  и  $\eta$  выбирают так, чтобы максимально скомпенсировать искажения. При работе с дискретизованными изображениями теоретически нужно учесть тот факт, что точки  $(x', y')$ ,

вообще говоря, могут и не попасть в узлы введенной целочисленной решетки. Попытка простого округления путем замены  $(x', y')$  на координаты  $(i', j')$  ближайшего узла решетки может привести к потере однозначности принятого преобразования, поскольку для некоторых точек изображения новый уровень яркости вообще не будет определен, а другим точкам будет приписано сразу несколько значений. Для устранения этой трудности приходится вводить обратное преобразование  $x = \xi(x', y')$ ;  $y = \eta(x', y')$ , определяющее положение каждой точки нового изображения на плоскости исходного изображения. Затем по значениям яркости  $G(i, j)$  в узлах исходной сетки, применяя любой интерполяционный метод, находят яркость вспомогательных точек плоскости  $(x, y)$ , которые соответствуют искомым узлам нового изображения  $(i', j')$ .

Ввиду громоздкости такого метода в СТЗ роботов чаще применяется упрощенная методика коррекции систематических искажений введенного изображения. Предполагается, что воспринимаемая функция  $G(i, j)$  представима в виде  $F(i, j)E(i, j)$ , где  $F(i, j)$  — «истинное» изображение, а  $E(i, j)$  определяет искажения в узлах сетки. Функцию  $E(i, j)$  получают экспериментально, вводя калибровочное изображение строго однотонного фона. После этого можно рассчитать  $F(i, j)$ , поэлементно устраняя вклад искажений  $E(i, j)$  в функцию  $G(i, j)$ . Аналогичный алгоритм используется в случае не мультипликативных, а аддитивных искажений.

Путем должного подбора вспомогательного преобразования шкалы яркости вида  $G' = \varphi(G)$  удастся добиться повышения контрастности изображения в желаемом диапазоне значений яркости. Так, если обнаружено, что уровни яркости пикселей рабочей области чаще всего попадают в диапазон  $\Delta$ , а за пределами этого диапазона оказываются редко, то можно растянуть  $\Delta$  (т. е. сжать остальные диапазоны яркости) и тем самым увеличить контрастность рассматриваемого изображения.

Алгоритмы, устраняющие «размытость» изображения путем обострения границ однородных областей, базируются на усилении вклада высокочастотных компонент пространственного спектра. Пусть  $\bar{G}(i, j)$  — функция, получаемая путем локального усреднения яркости по некоторому окну (именно эта операция и ведет к размытию изображения). В какой-то степени влияние полученной размытости можно ослабить, если к исходной яркости  $G(i, j)$  прибавить разность  $G(i, j) - \bar{G}(i, j)$ . Действительно, поскольку в функции  $\bar{G}$  низкие пространственные частоты исходного изображения  $G$  сохраняются с достаточной точностью, а высокочастотные компоненты подавлены, то в разности  $G - \bar{G}$ , наоборот, оказываются удалены низкие пространственные частоты. Поэтому в выражении  $G + (G - \bar{G})$  низкочастотные составляющие сохраняются без искажения, а роль высокочастотных



усиливается. В следующем параграфе будут рассмотрены алгоритмы, сочетающие обострение границ с сегментацией изображений.

Традиционным методом фильтрации изображений в целях выделения полезной информации из «зашумленной» картины является использование Фурье-преобразования, которое основано на хорошо исследованном теоретическом аппарате и позволяет применять современные средства как цифровой (например, быстрое Фурье-преобразование), так и аналоговой (в частности, оптико-электронной) реализации.

Дискретное Фурье-преобразование, реализуемое программным путем, дает спектр  $\Gamma(l, m)$  функции яркости  $G(j, k)$  в соответствии со следующей формулой:

$$\Gamma(l, m) = \frac{1}{n_x n_y} \sum_{j=0}^{n_x-1} \sum_{k=0}^{n_y-1} G(j, k) \exp \left[ -2\pi i \left( j \frac{l}{n_x} + k \frac{m}{n_y} \right) \right].$$

Обозначив Фурье-преобразование  $F$ , определим обратное преобразование  $F^{-1}$ , позволяющее получить функцию

$$G(j, k) = \sum_{l=0}^{n_x-1} \sum_{m=0}^{n_y-1} \Gamma(l, m) \exp \left[ 2\pi i \left( j \frac{l}{n_x} + k \frac{m}{n_y} \right) \right].$$

Если, как это часто бывает на практике, шум представляет собой периодический образ, то спектр  $\Gamma(l, m)$  содержит ряд изолированных пиков. Выделяя эти пики и заменяя их значения на локальные средние амплитуды, рассчитанные путем усреднения по соседним точкам, можно после применения обратного преобразования  $F^{-1}$  получить сглаженное изображение.

Введем функцию  $H(l, m)$ , задающую линейный пространственный фильтр. Произведение спектра  $\Gamma(l, m)$  и этой функции определит Фурье-образ на выходе фильтра  $\Gamma_0(l, m) = \Gamma(l, m) \times H(l, m)$ , откуда можно получить выходную функцию яркости следующего вида:

$$G_0(i, j) = F^{-1} \{ \Gamma_0(l, m) \} = F^{-1} \{ \Gamma(l, m) H(l, m) \} = G(i, j) * h(i, j),$$

где  $h(i, j) = F^{-1} \{ H(l, m) \}$ , а символом  $*$  обозначена операция свертки. Например, чтобы получить фильтр, подавляющий высокочастотные компоненты, можно воспользоваться функциями типа

$$H(l, m) = \begin{cases} 1 & \text{при } l \leq L, \quad m \leq M; \\ 0 & \text{при } l > L, \quad m > M, \end{cases}$$

где  $L, M$  — положительные константы.

Поскольку программная реализация алгоритмов, базирующихся на Фурье-преобразованиях, требует сравнительно больших вычислительных затрат, предпринимались попытки использо-

вания более простых интегральных преобразований. Так, преобразование Адамара имеет спектр (при  $n_x = n_y = n$ )

$$\Gamma_1(l, m) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{k=0}^{n-1} G(j, k) (-1)^{\alpha_{jk}(l, m)},$$

где  $\alpha_{jk}(l, m) = \sum_{v=0}^{n-1} [\beta_v(j) \beta_v(l) + \beta_v(k) \beta_v(m)]$ , а коэффициенты  $\beta_v(q)$  равны либо 0, либо 1 в соответствии со значением  $v$ -го разряда числа  $q$ , представленного в двоичной системе счисления (например, для  $q = 5 = (101)_2$  коэффициенты  $\beta_1(5) = 1$ ,  $\beta_2(5) = 0$ ,  $\beta_3(5) = 1$ ).

Еще более простые методы отсеивания шумовых компонент основаны на сглаживании путем усреднения изображений. Так, амплитуду шума с нулевым средним значением можно уменьшить за счет усреднения нескольких независимо полученных изображений одной и той же сцены. Можно также проводить локальное усреднение яркости каждого пиксела с учетом яркостей его соседей в выбранном окне

$$\bar{G}(i, j) = \sum_{m=-M}^M \sum_{l=-L}^L G(i+l, j+m),$$

размер окна  $(2L+1) \times (2M+1)$ .

Используются и алгоритмы, осуществляющие свертку изображения в окне со специально подобранной сглаживающей матрицей по формулам

$$\bar{G}(i, j) = \sum_{m=-M}^M \sum_{l=-L}^L G(i+l, j+m) A(l, m).$$

Таким образом реализуется взвешенное усреднение, например, с матрицами  $A(l, m)$  вида

$$A = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{или} \quad A = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

или анизотропная фильтрация (нормировочные коэффициенты подбираются так, чтобы данная операция не меняла средней яркости изображения).

При рекуррентной фильтрации элементы  $(i+l, j+m)$  берутся из исходного массива  $G$  для части изображения, еще не подвергшейся процедуре сглаживания, и из «выходного» массива  $\bar{G}$  профильтрованного изображения для уже просканированных точек окна.

Необходимо отметить, однако, что перечисленные выше алгоритмы фильтрации и сглаживания, устраняя высокочастотные шумы, одновременно приводят к потере мелких деталей изобра-



жения и к размыванию границ объектов, что напоминает эффект расфокусировки. Стремясь ослабить это нежелательное побочное явление, обращаются к выборочным усреднениям, пользуясь, в частности, следующими методами:

1) проводят усреднение не по всем элементам выбранного окна, а лишь по тем, которые лежат вблизи границы между фоном и объектом (алгоритмы поиска границ рассматриваются в следующем параграфе); как модификация такого метода применяется усреднение по элементам, находящимся по ту же сторону от границы, что и рассматриваемый пиксел;

2) при усреднении учитывают только те пикселы выбранного окна, яркость которых отличается от яркости рассматриваемого элемента не более чем на заранее заданное значение;

3) в выбранном окне выделяют подмножество элементов, лежащих по разные стороны от рассматриваемого пиксела и дающих минимальный разброс значений яркости, и усреднение проводят только по этому подмножеству;

4) при сглаживании яркость рассматриваемого пиксела заменяют не средним, а медианным значением яркости элементов выбранного окна, т. е. эти элементы упорядочивают в соответствии с уровнями их яркости в убывающую последовательность  $G_1, G_2, \dots, G_{LM-1}, G_{LM}$  ( $L \times M$  — размер окна), и медианное значение отвечает номеру  $m = \lfloor (LM + 1)/2 \rfloor$ . Можно показать, что в результате реализации такого алгоритма из изображения удаляются все детали, площадь которых внутри окна не превышает  $\lceil (\sqrt{LM} - 1)/2 \rceil$  пикселей, причем размывания границ при этом не происходит.

Отметим, что в методах 1—3 те из элементов окна, которые не удовлетворяют приведенным условиям, можно не отбрасывать, а при усреднении учитывать их с меньшим весом. Эта процедура может осуществляться итеративно.

Подобное сочетание расчетов по сравнительно простым формулам с достаточно разветвленными логическими алгоритмами характерно для практически работающих СТЗ роботов, в которых применение многих традиционных методов (в частности, хорошо теоретически разработанных алгоритмов оптимальной фильтрации шумов) сопряжено с трудностями реализации вследствие больших объемов вычислений, не укладывающихся в реальное время.

Так, в робототехнических СТЗ довольно широко применяются методы *логического сглаживания* («клеточной логики»). При фильтрации бинарных изображений осуществляют попеременное «сжатие» и «расширение» областей, заменяя каждую «1» на «0», если рассматриваемый пиксел имеет хотя бы одного соседа с нулевой яркостью, а затем обращая этот процесс. Такой алгоритм позволяет отсеять шумовые образы с небольшими размерами или малой толщиной. Чтобы удалить небольшие шумовые структуры с нулевой яркостью, порядок сжатия и расширения меняется.

Логические операторы, применяемые для удаления шума, весьма разнообразны. Например, можно заменять «0» на «1» тогда и только тогда, когда все соседи имеют единичную яркость, а «1» заменять на «0», либо когда все соседние элементы суть «0», либо если среди восьми соседей есть лишь один элемент с яркостью «1», расположенный к тому же не иначе, как по диагонали от данного. Операторы такого типа очень просто и быстро реализуются на цифровых средствах.

При фильтрации бинарных изображений с помощью оператора Лапласа (точнее — его дискретной модификации)  $L(i, j) = G(i-1, j) + G(i, j-1) + G(i, j+1) + G(i+1, j) - 4G(i, j)$  вводят два порога (положительный  $T_p$  и отрицательный  $T_n$ ) и пользуются следующей логикой: при  $T_n \leq L(i, j) \leq T_p$  яркость  $G(i, j)$  не меняется; если  $L(i, j) > T_p$ , то в точке  $(i, j)$  «0» заменяется на «1», а если  $L(i, j) < T_n$ , то, наоборот, «1» заменяется на «0».

Логические процедуры находят применение при предварительной обработке не только бинарных, но и полутонных изображений. Например, обобщение рассмотренного выше метода «сжатия-расширения» на случай нескольких градаций яркости носит название минимально-максимальной фильтрации. При этом попеременно осуществляют присвоение значения локального минимума и локального максимума яркости по данному окну его центральному элементу (при максимально-минимальной фильтрации этот порядок меняется на обратный).

Иногда к этапу предварительной обработки изображения относят разнообразные вспомогательные вычисления (дифференцирование, расчет моментов различного порядка, поэлементное сравнение последовательно введенных изображений и т. п.). Поскольку такие операции по своему функциональному смыслу, вообще говоря, не «улучшают» изображений, а являются составной частью алгоритмов их сегментации, описания или анализа, то и рассмотрены они будут в соответствующих разделах.

Особо следует остановиться на вопросе *сжатия информации* при формировании изображения. В принципе рассмотренные процессы дискретизации и квантования (в частности, бинаризации) видеoinформации уже реализуют ее сжатие. Кроме того, в целях экономии памяти, отводимой для хранения изображения, предлагались различные способы «упаковки» видеoinформации, когда данные о каждом пикселе занимают не целую ячейку памяти, а лишь ее часть. Например, 16-разрядное машинное слово может содержать данные о двух пикселах, представленных 256 градациями яркости (с записью в 8-разрядные байты), или сразу о 16 точках бинарного изображения. Важно, что благодаря возможности ЭВМ производить поразрядные логические операции удается одновременно обрабатывать несколько элементов бинарного изображения, представленного в таком виде (в частности, реализуя алгоритмы клеточной логики). Разработаны также алгоритмы,

обеспечивающие аналогичную «квазипараллельную» обработку упакованных многоградационных изображений за счет программной реализации специальных арифметических операций над байтами или 4-разрядными блоками видеoinформации.

Обширная литература (см., например, [40]) посвящена методам кодирования изображений. Хотя формально эти методы согласно принятой терминологии осуществляют не обработку, а описание изображений, кратко коснемся их в данном параграфе, так как они по своей сути предназначены для сжатия информации.

Идея кодирования состоит в таком представлении видеoinформации, которое за счет использования статистических свойств изображения оказывается в среднем более компактным, чем исходное представление, но позволяет точно восстановить оригинал. Ясно, что если различные уровни яркости пикселей неравновероятны, то потребность в памяти при хранении изображения можно уменьшить, представляя часто встречающиеся уровни короткими кодами, а редко встречающиеся уровни — длинными кодами. Статистические методы кодирования учитывают и присущую изображениям большую корреляцию между соседними пикселями. Так, если яркость последовательных элементов вдоль строки развертки представить в виде разностей  $G_1, G_2 - G_1, G_3 - G_2, \dots$ , то удастся добиться значительного сжатия информации, поскольку малые значения разности появляются гораздо с большей вероятностью, чем большие, т. е. в основном будут использоваться короткие коды. К сожалению, таким методам присущ серьезный недостаток, связанный с накоплением ошибок, для борьбы с которым приходится несколько раз на строке начинать отсчет заново от истинного уровня яркости.

В СТЗ роботов получил распространение простой метод кодирования с помощью *длин серий* — однородных отрезков строки развертки, где уровни яркости элементов одинаковы (или достаточно близки). Каждая серия характеризуется уровнем ее яркости (или перепадом по отношению к предшествующей серии) и длиной — числом пикселей в ней. Исследования показали, что одномерное кодирование длин серий обеспечивает сжатие информации в 4...5 раз (для бинарных изображений), а обобщение этого подхода на случай двух пространственных переменных

доводит коэффициент сокращения объема данных до 10. Известны и другие методы кодирования изображений (например, с использованием симплексных кодов), которые успешно могли бы быть применены в робототехнике.

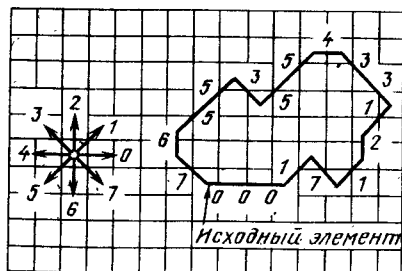


Рис. 2.2. Пример цепного кода контура (код: 000171213345535567)

В робототехнических задачах часто требуется хранить информацию о контурах — выделенных границах силуэтов объектов, или линиях уровня функции яркости. С этой целью эффективно используются *цепные коды*. Каждая позиция кода определяет, например, одно из восьми возможных направлений перехода к очередному элементу при прослеживании контурной линии согласно приведенным на рис. 2.2 обозначениям.

Заканчивая описание этапа формирования изображения, еще раз подчеркнем целесообразность реализации многих рассмотренных здесь алгоритмов или их модификаций не только программными, но и аппаратно-программными и чисто аппаратными средствами.

### 2.3. МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

Под *сегментацией* изображения сцены понимается процесс его разбиения на составные части, имеющие содержательный смысл: объекты, их границы или другие информативные фрагменты, характерные геометрические особенности и др. [43]. Количество предложенных алгоритмов сегментации исчисляется сотнями, однако, обобщая, большинство из них можно свести к выявлению одного из двух фундаментальных свойств изображения: сходства и различия. В соответствии с этим остановимся на двух основных подходах к сегментации, используемых в СТЗ роботов: методах нахождения однородных областей и методах выделения контурных линий.

**Нахождение однородных областей.** Сегментацию изображения на ряд однородных областей можно проводить по любому свойству  $S$ , характеризующему сходство элементов каждой области друг с другом, — по яркости, цвету, текстуре и др. Чаще всего в качестве такого свойства  $S$  выбирают уровень яркости. Среди методов сегментации наиболее прост по концепции способ *наращивания областей*, когда соседние элементы с одинаковыми или близкими уровнями яркости группируют, объединяя в однородные области. При этом, однако, необходимо избегать ошибок из-за неверного определения соседних элементов.

Рассмотрим более строго понятие *связности* элементов дискретизованного изображения. Формально можно считать, например, что каждый пиксел  $(i, j)$  связан только с четырьмя элементами, примыкающими к нему по строке и столбцу:  $(i - 1, j)$ ,  $(i + 1, j)$ ,  $(i, j - 1)$  и  $(i, j + 1)$ . С не меньшим основанием можно полагать его связанным со всеми восемью ближайшими элементами, включая диагональные. В первом случае говорят о 4-окрестности пиксела, во втором — о 8-окрестности. Множество пикселей  $P$  назовем *связным*, если между любыми двумя его элементами  $a$  и  $b$  существует последовательность элементов  $\{e_k \in P\}_{k=0, \dots, K}$ , такая, что  $e_0 = a$ ;  $e_K = b$ , и при любом  $k$ ,  $1 \leq k \leq K$  элемент  $e_k$

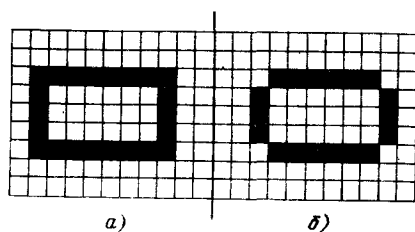


Рис. 2.3. К определению связности элементов изображения

содержит в своей 8-окрестности элемент  $e_{k-1}$ . Аналогичным образом определяется четырехсвязность. Важность точного определения связности иллюстрирует рис. 2.3. В изображении на рис. 2.3, а легко выделить

три области — черный контур и две белые зоны (внутри и вне контура), которые отвечают как интуитивным представлениям, так и обоим приведенным выше определениям связности. Но уже для изображения на рис. 2.3, б возникает неоднозначность. Если определять соседей в 8-окрестности, то черные элементы по-прежнему составляют единый контур, а если принять концепцию четырехсвязности, то изображение разобьется на четыре отдельных соприкасающихся прямоугольника. Парадокс здесь заключается в том, что в первом случае мы были бы обязаны считать белые элементы внутри «единого контура», связанными с внешней белой областью. Чтобы устранить подобные противоречия, условимся в общем случае пользоваться принципом восьми-связности, группируя пиксели в области, однородные по некоторому свойству  $S$ , и принципом четырехсвязности для областей, обладающих противоположным свойством  $\bar{S}$  (например, на рис. 2.3 оба изображения черного «контура» будем считать объектами, а белые зоны — фоном).

Обычно применяемые алгоритмы наращивания областей имеют два этапа. На первом этапе на исходном изображении ищут элементарные области, где пиксели группируются попарно, если они обладают одинаковым уровнем яркости и являются соседями в смысле четырехсвязности. На втором этапе элементарные области, имеющие общие границы, сливаются воедино согласно различным эвристическим правилам. Для примера приведем две эвристики, используемые при решении робототехнических задач.

Пусть область  $R_1$  с периметром  $P_1$  граничит с областью  $R_2$ , имеющей периметр  $P_2$ , причем их общая граница имеет длину  $S$ . Найдем протяженность  $D$  той части этой границы, для которой перепад яркостей граничащих элементов окажется меньше заранее заданного порога  $\sigma > 0$ . Тогда слияние смежных областей  $R_1$  и  $R_2$  происходит в том случае, если выполняется неравенство  $D > 0,5 \min \{P_1, P_2\}$ . При такой эвристике происходит поглощение малых областей большими, а области более или менее близких размеров остаются раздельными.

Согласно другому эвристическому правилу, смежные области  $R_1$  и  $R_2$  сливаются, если  $D > 0,75S$ . В отличие от первого алгоритма, который сегментирует изображение на много мелких фрагментов, эта эвристика может приводить к чрезмерному

слиянию областей. Поэтому метод наращивания областей в случае сложных сцен иногда дает ошибочную сегментацию изображений. Делались попытки модифицировать его путем применения многопроходных и интерактивных процедур, использования контекстной информации. Хотя существует мнение [60], что алгоритмы наращивания областей не найдут практического применения в робототехнике, операции на однородных областях удалось использовать в СТЗ робота, предназначенного для взятия деталей из беспорядочного навала в бункере, что описано в работе [15]. Там же для нахождения однородных областей предложено использовать не только алгоритм наращивания, но и обратную операцию *сжатия* однородной области, выполняемую по шагам путем удаления всех элементов, среди соседей которых есть элемент, не принадлежащий области. Такая процедура позволяет найти достаточно большие однородные участки на изображении бункера с деталями, которые трактовались как вероятные места захватывания деталей вакуумной присоской робота.

Алгоритмы сжатия областей предлагались также в целях уменьшения толщины границ и построения «остова» объекта на изображении. Эта процедура удобна при построении графических препаратов по изображениям с размытыми контурами объектов. Она может быть организована как последовательность четырехшаговых циклов, когда на каждом шаге поочередно отбрасываются сначала крайние левые, а затем правые, верхние и нижние граничные пиксели, т. е. элементы объекта, не обладающие четырехсвязностью по крайней мере с одним ближайшим соседом. Граничные пиксели не удаляются в тех случаях, когда это приводит к нарушению восьми-связности, либо когда они обладают четырехсвязностью только со своим верхним и нижним (или только с правым и левым) соседями.

Один из способов сегментации изображений состоит в представлении объектов сцены в виде их остовов. *Остов* — это геометрическое место точек, обладающих тем свойством, что минимум расстояния от каждой из них до границы однородной области достигается не для какого-то одного, а сразу для нескольких элементов границы. В алгоритмах получения остовов используется преобразование к срединным осям [40]. Эта идея была практически реализована [15] с помощью алгоритма «фронтов столкновения», обеспечивающего выделение на изображении бункера с деталями длинных параллельных кромок, за которые деталь может быть захвачена роботом. Подобные методы пока не получили широкого распространения в робототехнике из-за их сильной чувствительности к шумам, однако этот недостаток в принципе можно преодолеть, вводя сглаживающие фильтры.

**Выделение контурных линий.** В СТЗ роботов гораздо чаще применяют методы сегментации, основанные на выделении контуров. Контурные линии на изображении образуются из видимых участков границ объектов, причем они могут служить границами

не только между предметами рабочей сцены и фоном, но и между изображениями различных предметов и даже между изображениями смежных поверхностей одного и того же предмета. С учетом упомянутой выше проблемы определения связности формально будем считать *контурной точкой* для области  $R$ , однородной по свойству  $S$ , элемент  $r \in R$ , такой, что в его 4-окрестности содержится хотя бы один пиксел, не обладающий свойством  $S$ . Две контурные точки назовем соседними, если одна из них содержится в 8-окрестности другой. Контурное изображение определяется как множество всех контурных точек, выделенных в соответствии с одним и тем же свойством  $S$ . Интерес представляют такие контурные изображения, каждая точка которых имеет ровно двух соседей. В этом случае назовем (замкнутым) *контуром* любую полную связную компоненту контурного изображения и определим контурную последовательность контура  $\Gamma$  как упорядоченную последовательность его точек  $\{b_k\}_{k=0, \overline{K}}$ , такую, что каждая точка контура  $\Gamma$  входит в нее ровно 1 раз, причем точки  $b_{k-1}$  и  $b_k$  ( $1 \leq k \leq K$ ), а также точки  $b_K$  и  $b_0$  являются соседними.

Наиболее простой способ нахождения контурных последовательностей, который широко используется в СТЗ роботов, работающих с достаточно контрастными изображениями, заключается в непосредственном прослеживании обнаруженных при бинаризации изображения точек перехода из «0» в «1» (или наоборот). Более общий путь выделения контурных изображений базируется на расчете меры изменения яркости (т. е. той или иной оценки поля градиентов) с последующим ее сравнением с порогом. В принципе при этом могут быть использованы известные методы численного дифференцирования функций двух переменных на дискретной решетке.

Модуль вектора градиента исходной функции яркости  $\sqrt{(\partial g/\partial x)^2 + (\partial g/\partial y)^2}$  можно оценить по трем значениям дискретизованного изображения

$$|\nabla G(i, j)| \sim \sqrt{[G(i, j) - G(i+1, j)]^2 + [G(i, j) - G(i, j+1)]^2}$$

или, более точно, по четырем значениям с помощью оператора Робертса

$$|\nabla G(i, j)| \sim \sqrt{[G(i, j) - G(i+1, j+1)]^2 + [G(i+1, j) - G(i, j+1)]^2}.$$

Обе эти вычислительные схемы существенно упрощаются (ценой некоторого увеличения погрешности), если вместо квадратных корней использовать абсолютные величины:

$$|\nabla G(i, j)| \sim |G(i, j) - G(i+1, j)| + |G(i, j) - G(i, j+1)|$$

и

$$|\nabla G(i, j)| \sim |G(i, j) - G(i+1, j+1)| + |G(i+1, j) - G(i, j+1)|.$$

На практике методы численного дифференцирования дают хорошие результаты только при условии, что изображение подвергается предварительной обработке с помощью рассмотренных в предыдущем параграфе алгоритмов удаления шумов, повышения контрастности, обострения границ.

В целях повышения помехоустойчивости при выделении контурных изображений предлагалось использовать операторы, сочетающие в себе сглаживание и дифференцирование функции  $G(i, j)$ . Идея классического оператора Хюккеля, например, состоит в том, что вводится многоугольное окно, аппроксимирующее круг, и в этом окне яркость представляется ступенчатой функцией, зависящей от четырех параметров: двух уровней яркости в точках по обе стороны искомого участка контура; пересекающего круг, расстояния этого отрезка контура от центра круга и наклона отрезка. Используя разложение функции яркости на введенной круговой области по специальной системе базисных функций, по методу наименьших квадратов можно найти указанные параметры, что полностью определит искомый отрезок контура.

При всех достоинствах оператора Хюккеля можно утверждать, что громоздкость требуемых вычислений делает маловероятным его применение в практической робототехнике. Упрощенной модификацией оператора Хюккеля является оператор О'Гормана [71], в котором вместо «круглого» окна используется квадратное, а в качестве базисных функций приняты удобные при вычислениях функции Уолша. Тем не менее операция выделения контура сравнительного несложного изображения для приведенного в [71] примера заняла около 10 с на ЭВМ ICL 1906 А.

В СТЗ роботов часто более эффективны, хотя и менее общие, но зато не такие сложные алгоритмы нахождения контурных точек на основе упрощенных расчетов и активного использования логических процедур. Так, для повышения помехоустойчивости при оценках поля градиентов стремятся сглаживать отсчеты яркости вдоль искомой границы и усиливать разность яркостей поперек границы. С этой целью можно брать разности не между яркостями самих пикселов, а между их (взвешенными) средними значениями в выбранном окне размером  $(2L+1) \times (2M+1)$  или пользоваться такими величинами, как

$$\max |\nabla G(i+l, j+m)|; \quad -L \leq l \leq L; \quad -M \leq m \leq M$$

либо

$$\frac{1}{(2L+1)(2M+1)} \sum_{m=-M}^M \sum_{l=-L}^L |\nabla G(i+l, j+m)| \text{ и др.}$$

Разработаны также алгоритмы «направленного» дифференцирования, в которых  $|\nabla G|$  рассчитывают путем свертки  $G * h$  со специально подбираемыми матрицами  $h$  для разных направле-

ний. Например,  $3 \times 3$ -матрицы  $h$ , «оказывающие» пиксел  $(i, j)$  с восьми сторон, могут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Северо-} \\ \text{запад»} \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Северо-} \\ \text{восток»} \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Юго-} \\ \text{запад»} \end{matrix} \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Юго-} \\ \text{восток»} \end{matrix} \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Запад»} \\ (i, j) \\ \text{«Восток»} \end{matrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{«Север»} \\ (i, j) \\ \text{«Юг»} \end{matrix}$$

В развитие этой идеи можно сразу реализовать свертку матрицы, подчеркивающей контур, с передаточной функцией фильтра нижних частот, чтобы удалить высокочастотные пространственные шумы, усиленные при обострении границ.

Хорошие результаты дают нелинейные детекторы края, которые удается реализовать на современных вычислительных средствах, включаемых в состав СТЗ роботов. Для описания нелинейных локальных операторов введем следующие обозначения уровней яркости восьми соседей пиксела  $(i, j)$ :

$$\begin{matrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_7 & G(i, j) & A_3 \\ A_6 & A_5 & A_4 \end{matrix}$$

Тогда формулы, задающие ряд известных операторов, примут вид:

$$\text{оператор Собела: } |\nabla G| \sim \sqrt{U^2 + V^2} \text{ (или } |\nabla G| \sim |U| + |V|),$$

$$\text{где } U = A_2 + 2A_3 + A_4 - A_0 - 2A_7 - A_6; V = A_0 + 2A_1 + A_2 - A_6 - 2A_5 - A_4;$$

$$\text{оператор Кирша: } |\nabla G| \sim \max_{k=0,7} \{1, \max_k |5U_k - 3V_k|\},$$

$$\text{где } U_k = A_k + A_{k \oplus 1} + A_{k \oplus 2}; V_k = A_{k \oplus 3} + A_{k \oplus 4} + A_{k \oplus 5} + A_{k \oplus 6} + A_{k \oplus 7} \text{ (здесь символ } \oplus \text{ обозначает суммирование по модулю 8);}$$

$$\text{оператор Уоллиса: } |\nabla G(i, j)| \sim \log [|G(i, j)| / A_1 A_3 A_5 A_7];$$

достоинством этого оператора является малая чувствительность к мультипликативным шумам; для реализации важно также,

что логарифмы яркости данного пиксела и его ближайших соседей необязательно вычислять точно;

$$\text{оператор Розенфельда: } |\nabla G| \sim D_1 D_2 \dots D_M,$$

где  $D_k(i, j) = (1/k) [G(i + k - 1, j) + G(i + k - 2, j) + \dots + G(i, j) - G(i - 1, j) - G(i - 2, j) - \dots - G(i - k, j)]$ ;  $k = 1, 2, \dots, M$ ;  $M = 2^m$  ( $m$  — целые); он тоже малочувствителен к шумам и достаточно точно локализует контурную линию.

После того как описанные выше операторы осуществляют подчеркивание перепадов яркости в окрестности искомого контура, выделение контурных точек проводится путем сравнения с порогом. С этой целью была предложена нелинейная процедура «подавления доминирующими соседями», которая избирательно находит отчетливые перепады яркости в окружении более слабых. Для этого поле градиентов (точнее — оценок их модулей) сканируется небольшим окном, и значение  $|\nabla G(i, j)|$  в центре окна обнуляется, если в данном окне имеются пикселы с большими значениями яркости. После этого выполняется обычное сравнение с порогом. В модифицированном варианте этой процедуры центральный элемент «подавляется», если какой-то другой пиксел окна имеет величину  $|\nabla G|$ , которая больше чем на фиксированный перепад превышает  $|\nabla G|$  центрального элемента.

На основании нейрофизиологического исследования эффекта латерального торможения в зрительной системе живых организмов было предложено сочетать оператор Лапласа  $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)$ , обостряющий границы, со сглаживающим фильтром, задаваемым гауссовой функцией  $\gamma(r) = (1/(2\pi\sigma^2)) \exp(-r^2/(2\sigma^2))$ , где  $r$  — расстояние данной точки от центра фильтра, а  $\sigma^2$  — дисперсия нормального распределения.

Результирующий оператор Марра—Хилдрета имеет вид [62]

$$D(r) = \nabla^2 \gamma(r) = (2 - r^2/\sigma^2) \exp(-r^2/(2\sigma^2)).$$

Сканируя изображение окном, на котором реализована дискретная модификация этого оператора, и находя точки пересечения нулевого уровня профильтрованным изображением

$$\tilde{G}(i, j) = \sum_{m=-M}^M \sum_{l=-L}^L D(l, m) G(i + l, j + m),$$

можно осуществлять высококачественное выделение контуров.

Известны и более сложные алгоритмы, учитывающие не только модуль вектора градиента, но и его направление  $\theta(i, j)$ , являющееся оценкой угла  $\arctg[(\partial g/\partial y)/(\partial g/\partial x)]$ . Например, для выделения контурной точки можно проверить следующие неравенства:

- 1)  $|\nabla G(i, j)| > \epsilon$ ;
- 2)  $|\theta(i_m, j_m) - \theta(i, j)| > \theta \vee |\nabla G(i_m, j_m)| < \alpha |\nabla G(i, j)| + \beta$ ;
- 3)  $|\nabla G(i, j)| - |\nabla G(i_m, j_m)| < |\nabla G(i, j)| - |\nabla G(i, j)|$ ,

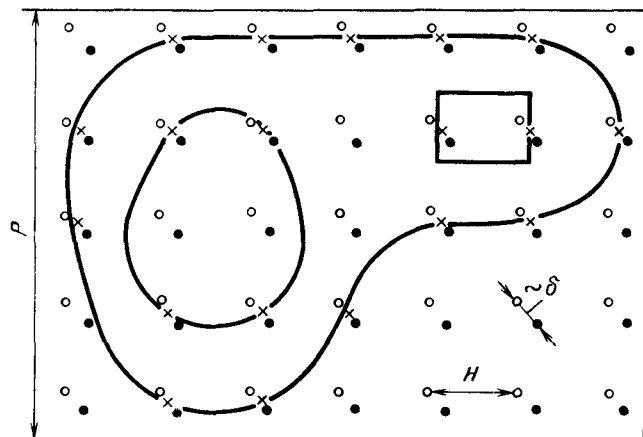


Рис. 2.4. Локализация контурных точек при «сдвигах» поля отсчетов:  
 ○ — положение отсчетов до и после «сдвига»; X — машинная контурная точка

где  $-M \leq m \leq M$ ;  $-M \leq l \leq M$ , а  $M, \epsilon, \theta, \alpha, \beta$  — константы. Точка считается контурной, если при выполнении условия 1 неравенство 2 справедливо при двух значениях  $m = m_1$  и  $m = m_2$ , причем  $m_1$  и  $m_2$  противоположны по знаку. В случае, когда неравенство 2 удовлетворяется только для одного значения  $m$ , следует проверить неравенство 3 в точке  $(i, j)$ , такой, что  $ml < 0$ , и если оно окажется выполненным, то точка  $(i, j)$  не будет относиться к числу контурных. Такой алгоритм выявляет не только прямолинейные, но и криволинейные контурные линии, однако пока его реализация при приемлемых вычислительных затратах возможна лишь для изображений, описываемых матрицами  $\langle G(i, j) \rangle$  небольшого размера.

Итак, можно сделать следующее общее замечание. Размер матрицы отсчетов яркости  $N = [P/h]$ , где  $P$  — характерный линейный размер поля зрения, а  $h$  — шаг сетки фотоприемников или дискретность съема видеосигнала при использовании телекамеры. Если считать величину  $h$  сравнимой с допустимой погрешностью  $\delta$  определения геометрических характеристик объектов, то размер  $N$  в типичных робототехнических задачах должен иметь порядок не менее сотен. Необходимость обрабатывать данные о столь больших массивах элементов изображения весьма затрудняет практическое применение многих перечисленных методов сегментации (как, впрочем, и алгоритмов дальнейших этапов анализа изображения). Опишем некоторые подходы к преодолению этой трудности.

В [24] было предложено снижать объем перерабатываемой информации за счет обработки данных об изображениях «порциями» в виде грубых матриц отсчетов яркости. В частности, был реализован алгоритм, основанный на идее целенаправленных «сдвигов» поля отсчетов относительно объекта в зависимости от

текущих результатов обработки. При вводе очередного  $k$ -го кадра яркость отсчитывается в точках  $(I, J)$ ,  $I, J = \overline{1, n}$ , с шагом  $H$ , намеренно выбранным гораздо больше допустимой погрешности  $\delta$ , т. е.  $H \gg h$  и, значит,  $n \ll N$ . Каждая точка  $k$ -й грубой матрицы  $\langle G^k(I, J) \rangle$  «смещена» по отношению к соответствующей точке предыдущего  $(k-1)$ -го кадра на расстояние  $\sim \delta$  (рис. 2.4). Если в некоторой точке  $(I, J)$  обнаруживается достаточное отличие  $G^k(I, J)$  от  $G^{k-1}(I, J)$ , то делается вывод, что при сдвиге на данном шаге соответствующий элемент «пересек» контур. Следует подчеркнуть, что при этом контурные точки локализуются с погрешностью, сравнимой со сдвигом, т. е. заведомо меньшей шага  $H$  грубой матрицы. Повторяя эту процедуру, можно добиться требуемой точности представления контурных точек (разумеется, с погрешностью, не меньшей, чем минимальное значение сдвига).

Можно показать, что для широкого класса изображений в робототехнических задачах точность, отвечающая «неподвижной» матрице  $N \times N$ , достигается при общем числе отсчетов яркости порядка  $N\sqrt{N}$ , что намного меньше полного объема  $N^2$ , необходимого при традиционных подходах. В памяти нужно хранить лишь две матрицы отсчетов размером  $n \times n$  и результирующие контурные точки. На каждом шаге можно выбирать наилучшее направление сдвига в сторону наибольшего разрыва между уже выделенными контурными точками. На практике такие «сдвиги» осуществляются за счет управления синхронизацией считывания видеосигнала телекамеры.

На идее сокращения объема перерабатываемых данных за счет целенаправленного ввода отсчетов яркости основаны и алгоритмы последовательной сегментации, в которых активно используется как текущая, так и априорная информация о предполагаемом виде контурного изображения. В отличие от рассмотренных выше процедур, где каждая контурная точка ищется независимо от других, алгоритмы этого класса как бы прогнозируют возможное положение точек контурной последовательности по уже обнаруженным точкам. При этом можно обрабатывать не все изображение поля зрения, а лишь предполагаемую окрестность контуров.

Проще всего проследивать контур, анализируя связность очередной выделенной точки с ее соседями. Так, в случае бинарных изображений можно пользоваться следующим правилом обхода контура (по часовой стрелке). После обнаружения первой точки контурной последовательности повернуть «налево» под прямым углом, перейдя к следующему пикселу  $(i, j)$ ; если  $G(i, j) = 1$  (т. е. это элемент объекта), снова повернуть «налево»; если  $G(i, j) = 0$  (фоновый пиксел), то повернуть «направо». Такая процедура повторяется вплоть до возвращения в исходную точку контура. Все обнаруженные по ходу движения элементы объекта, непосредственно предшествующие переходу от объекта к фону



либо непосредственно следующие за переходом от фона к объекту, запоминаются как точки контурной последовательности. Этот простой алгоритм легко реализуется на ЭВМ с помощью булевых операторов.

При всей привлекательности идеи последовательной сегментации следует учитывать, что на практике при прослеживании контуров на изображениях достаточно сложных сцен могут возникать серьезные трудности, обусловленные разрывами контуров, потерей их отдельных фрагментов, обнаружением «ложных» контурных линий, неточностью локализации контурных точек, критичностью простых алгоритмов прослеживания к выбору исходной точки. Во избежание тупиковых ситуаций при прослеживании контура приходится возвращаться в уже пройденные точки, пользоваться довольно сложными локальными, региональными и глобальными критериями соединения точек контурной последовательности. Алгоритмы обработки контурного графического препарата чрезвычайно сильно зависят от характера конкретных задач.

Представляются перспективными предложениями шире сочетать на этапе сегментации изображений расчетные и логические процедуры, распараллеливать вычисления на основе их аппаратно-программной реализации.

Например, в [68] описано применение в СТЗ оптико-электронного «контурного сенсора», который изменяет структуру точек отсчета яркости в зависимости от локальной ориентации прослеживаемого контура. Эти точки выбирают в двух узких полосах, ориентированных вдоль прогнозируемого фрагмента контура, а разность средних значений яркости в этих областях служит параметром, по которому контролируется правильность отслеживания. Установить нужное положение полос можно на основе предшествующих измерений на данном классе изображений, а также на стадии обучения. При обнаружении новой контурной точки включается прогнозирующий фильтр Калмана, который по мере накопления данных позволяет значительно уменьшить область сканирования. Такой метод прослеживания открывает возможность дальнейшего сжатия информации об изображении; легко прогнозируемые точки можно отсеивать, поскольку они менее информативны, чем те точки, в которых контур значительно отклоняется от предсказанной линии.

Сжатие информации обеспечивает также целый ряд методов аппроксимации контурных линий набором известных кривых или ломаных. Наибольшее распространение получили алгоритмы кусочно-линейной аппроксимации, основанные на итеративном поиске вершин, лежащих на контуре. Через две контурные точки проводится хорда, после чего ищется новая контурная точка, максимально удаленная от нее, и т. д. Необходимость многократного просмотра каждой контурной точки — недостаток итеративных процедур.

Задача отсева малоинформативных точек контурной последовательности была поставлена в [22] как вариационная задача минимизации числа вершин аппроксимирующей ломаной при условии, что погрешность, вносимая «разрежением» последовательности контурных точек, не будет превышать погрешности вследствие дискретного представления исходного непрерывного контура на целочисленной решетке с шагом  $h$ . В результате решения этой задачи предложена рекуррентная процедура выбора точек контурной последовательности, при которой очередная точка выбирается на таком расстоянии  $\Delta$  от предыдущей, чтобы угол  $\varphi$  поворота касательной к кривой при переходе между этими точками удовлетворял соотношению  $\Delta^2 \varphi = \lambda$ , где  $\lambda$  — константа, т. е.  $\Delta$  зависит от радиуса кривизны  $R$  аппроксимируемой кривой. При  $R \gg h$  экономия точек получается значительной.

В робототехнических приложениях при сегментации изображений иногда целесообразно выделять не весь контур объекта, а только его характерные фрагменты, которые наиболее важны для конкретной задачи, решаемой СТЗ данного робота (места взятия объекта, углы, выступы, отверстия и т. п.). Выше упоминался алгоритм нахождения параллельных краев объекта на изображении, соответствующих кромкам детали, за которые робот должен захватить ее. Известен также алгоритм, ориентированный на поиск информативных фрагментов контура, который реализует выделение участков его резкого излома. Идея алгоритма поиска «уголков» наглядно поясняется следующим образом. Если представить себе змею, ползущую по контурной линии, то ясно, что наклон хорды, которая соединяет голову и хвост змеи, при переползании через излом будет меняться быстрее, чем при движении по гладкому участку. Для повышения эффективности метода изменение ориентации хорды оценивают по сумме модулей приращений ее проекций на координатные оси, что снижает объем тригонометрических расчетов. Погрешности, вносимые дискретным представлением контурного изображения, в значительной степени сглаживаются за счет усреднения по участку контура, равного длине «змеи». Алгоритм успешно выделял на полутоновых изображениях  $256 \times 256 \times 8$  бит контур шестерни с 80 зубьями, хотя размер зуба составлял всего лишь несколько пикселей. В результате исходный контур, содержащий 1576 точек, был аппроксимирован зубчатым многоугольником с 161 вершиной. Время сегментации в данном примере при реализации на микропроцессоре Intel 8085 не превышало 0,4 с.

В заключение данного параграфа укажем, что для СТЗ роботов развиваются подходы к сегментации изображений пространственных сцен, основанные на дальнометрической информации. При квазиплоском представлении сцены (размерности 2,5) в качестве свойства  $S$ , по которому проводится сегментация, может выступать не только яркость пиксела  $G(i, j)$ , но и его удаленность от видеосенсора  $\rho(i, j)$ . Выделение однородных по  $\rho$  об-



ластей или их границ, где наблюдаются скачки дальности, может проводиться с помощью алгоритмов сегментации, в принципе аналогичных описанным выше. Предлагались и локальные операторы дальностной сегментации, основанные на измерениях  $\rho$  в кольце, окружающем данную точку. Набор последовательных отсчетов дает сигнал конечной продолжительности, зависящий от угла визирования. Фурье-анализ этого сигнала позволяет выделить гладкие участки и резкие скачки, оценить поле градиентов дальности. Эта информация не только может существенно облегчить обработку яркостных изображений, но и сама оказывается очень ценной при построении геометрических моделей среды. Непосредственное измерение или вычисление методом триангуляции координат характерных особенностей сцены, выделенных при сегментации, дает возможность аппроксимировать соответствующие области участками плоскостей или других поверхностей (см. также [27, 49]).

#### 2.4. ПРИНЦИПЫ ОПИСАНИЯ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Согласно принятой терминологии, *описание* изображения — это преобразование исходной или предварительно обработанной двумерной функции в совокупность количественных (числовых) и/или качественных (логических, вербальных) характеристик, нужных для решения поставленной перед СТЗ задачи. В робототехнике этап описания изображений, как правило, сводится к получению совокупности признаков для классификации объектов рабочей сцены, определению параметров их положения, ориентации, размеров и пр.

**Расчет признаков.** Классифицирующие признаки в типичных робототехнических задачах должны обладать инвариантностью к изменениям местоположения и ориентации объекта в рабочей зоне. В качестве таких признаков могут непосредственно использоваться цвет, текстура, яркость объектов. Однако более распространены признаки, которые характеризуют форму получаемых изображений объектов. В [27] сопоставлены так называемые «методы определения формы по  $x$ », где под  $x$  понимаются самые разнообразные факторы, такие, как распределение полутонов на изображении, контуры объектов или границы их перекрытий, текстура, стереоскопические данные, дифференциальная информация об изменениях изображений на последовательности кадров, а также различные комбинации перечисленных и других возможных факторов.

Признаки формы вычисляются как по глобальным свойствам областей изображения, представляющих объекты, так и по локальным характеристикам контурных границ этих областей или их фрагментов. Можно разделить множество алгоритмов расчета признаков и по другому принципу. Одна большая группа алгоритмов базируется на формальных методах, задаваемых с по-

мощью математических выражений (расчет коэффициентов аппроксимирующих полиномов, разложений в спектры, интегральных инвариантов, топологических показателей и т. п.). Другая группа охватывает так называемые «лингвистические» методы классификации образов, для которых признаки выбираются (в результате предварительного исследования человеком конкретных классов объектов) в виде описаний качественных свойств отдельных фрагментов и их отношений — способов соединения или взаимного расположения характерных элементов рабочей сцены. Лингвистический подход, свойственный для теории искусственного интеллекта, использовался для анализа («грамматического разбора») сцен, составленных из многогранников и других классических геометрических тел. Был разработан целый ряд методов представления таких сцен в виде совокупностей простейших элементов («примитивов»), описываемых графами отношений, целенаправленного поиска особенностей графического препарата на основе выдвижения гипотез (в качестве этих особенностей обычно принимались различные виды пересечений двух и более отрезков контурных линий — углы, стрелки, острия, T-, L-, K-, X-образные пересечения).

Некоторые из выдвинутых при этом идей нашли отражение и в робототехнике, где иногда удается применять эвристические правила классификации объектов путем проверки наличия априорно заданных характерных фрагментов (выступов, отверстий, изломов границ определенного типа), находящихся в нужном пространственном соотношении. Для формального описания фрагментов границы нашли применение алгоритмы, основанные на преобразовании Хафа и его модификациях. Отрезок контурной линии, описываемый некоторым уравнением в декартовой системе координат, преобразуется в точку в пространстве параметров этого уравнения. Каждой точке исходного контура, которая лежит на кривой такого же вида, соответствует определенная кривая в пространстве параметров. Разбив это пространство на ячейки, строят гистограмму числа прохождений кривых, отображающих каждую контурную точку, через эти ячейки. Пики на полученной гистограмме свидетельствуют о большой вероятности наличия на изображении фрагмента, который описывается кривой с соответствующими параметрами [40].

Необходимо отметить, однако, что в СТЗ промышленных роботов гораздо шире распространены не чисто лингвистические алгоритмы, а методы описания формы объектов смешанными наборами признаков из двух указанных выше групп, которые можно назвать «геометрическими признаками».

*Геометрическими признаками*, характеризующими изображение объекта, могут быть его площадь, периметр, пераунд (нормированное отношение площади к квадрату периметра), размеры вписанного и описанного прямоугольников, длины максимального, минимального и среднего радиусов-векторов (соединяющих

геометрический центр изображения объекта с его границей), значения их отношений к периметру или друг к другу, угол между максимальным и минимальным радиусами-векторами. Эти признаки так же, как и число отверстий, число углов, число выступов и т. п., инвариантны к перемещениям изображения в картинной плоскости. Они широко используются для описания формы плоских фигур в СТЗ роботов при классификации объектов по двумерным проекциям и уже начинают применяться в трехмерном случае для выбора представления элементарных поверхностей, аппроксимирующих видимые участки пространственных объектов.

Ясно, что зная математическую модель объекта, можно найти и его требуемые геометрические характеристики. Общая теория и разнообразные алгоритмы синтеза математических уравнений, количественно описывающих линии, фигуры и тела по набору измерений, всесторонне освещены в литературе (см., например [27, 40]). На практике наиболее широко пользуются методами аппроксимации фрагментов контурных линий совокупностью отрезков прямых, дуг окружностей или кусочно-полиномиальными представлениями, коэффициенты которых определяются по методу наименьших квадратов. Не останавливаясь подробнее на этом хорошо исследованном вопросе, подчеркнем, что во многих робототехнических задачах некоторые из перечисленных выше геометрических признаков удается вычислить непосредственно по цифровому представлению изображения, минуя стадию его аналитического описания в виде математической модели.

Рассмотрим, например, бинарное изображение силуэта объекта. Площадь  $S$  объекта можно оценить, подсчитав общее число единиц в массиве яркостей, представляющем поле зрения. Для компактного изложения алгоритмов введем функцию  $n(\langle M \rangle)$ , указывающую на число совпадений с некоторой эталонной маской  $\langle M \rangle$  при сканировании изображения. В этих обозначениях можно записать  $S \sim n(1)$ . Выбирая маски  $\langle 0 \ 1 \rangle$  и  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ , отвечающие крайним левым и верхним элементам объекта, полностью окруженного фоном, можно получить следующую оценку его периметра:

$$P \sim 2n(\langle 0 \ 1 \rangle) + 2n\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}\right).$$

Более точные оценки получаются при использовании набора эталонных масок, объединенных в «двоичные четверки»:

$$Q_1 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\};$$

$$Q_2 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\};$$

$$Q_3 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\};$$

$$Q_4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad Q_5 = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\};$$

$$S \sim 0,25n(Q_1) + 0,5n(Q_2) + 0,875n(Q_3) + n(Q_4) + 0,75n(Q_5);$$

$$P \sim n(Q_2) + (1/\sqrt{2})[n(Q_1) + n(Q_3) + 2n(Q_5)].$$

Коэффициентами пропорциональности при расчетах  $S$  и  $P$  по приведенным выше формулам служат соответственно площадь пиксела и длина его стороны.

Пользуясь введенными эталонными масками, находят и еще один геометрический признак — число Эйлера  $E$ , равное разности между числом связанных областей и числом отверстий на изображении данного объекта, которое служит важной топологической характеристикой его формы:

$$E = 0,25 [n(Q_1) - n(Q_3) + 2n(Q_5)].$$

К сожалению, простые геометрические признаки, хорошо понятные человеку и несложные в реализации, далеко не всегда обеспечивают однозначное распознавание объектов. Так, на рис. 2.5 показаны примеры силуэтов двух разных объектов, имеющих абсолютно одинаковые площадь, периметр и все другие перечисленные выше геометрические признаки. Разумеется, в каждом конкретном случае человек может в конце концов понять, чем отличаются объекты друг от друга, и указать правила их классификации. Однако при обучении СТЗ робота в производственных условиях человеку в силу недостаточной квалификации или дефицита времени бывает трудно или нежелательно каждый раз самому обдумывать, какой набор признаков лучше выбрать для надежной классификации всех объектов партии.

В тех случаях, когда номенклатура объектов, с которыми должен работать робот, достаточно широка или они трудно различаются человеком-оператором, вместо эвристических правил, задаваемых в рамках лингвистического описания геометрических свойств, или в дополнение к этим правилам целесообразно пользоваться *формальными инвариантами*, однозначно решающими задачу. Формальные процедуры дают возможность автоматически (т. е. без творческого участия человека-оператора) выбирать до-



Рис. 2.5. Примеры объектов с одинаковыми традиционно используемыми признаками

статочное число нужных признаков на этапе обучения СТЗ робота, когда ей предъявляются все типы рабочих объектов, с которыми придется иметь дело роботу на данной производственной операции, и точно указывается их принадлежность тому или иному классу. Опишем некоторые системы формальных признаков, применяемые в СТЗ роботов.

Контур объекта можно охарактеризовать его кривизной  $K(s)$ , задаваемой в функции от длины  $s$ , отсчитываемой вдоль контура от некоторой фиксированной точки. Для замкнутого контура  $K(s)$  — периодическая функция с периодом, равным периметру контура  $P$ . Поэтому коэффициенты разложения указанной функции в ряд Фурье дают полную систему признаков данного объекта. Вместо  $K(s)$  можно взять и другое описание контурной кривой. В [16] предлагалось раскладывать в ряд Фурье безразмерное отношение  $\rho(\varphi) = P/r(\varphi)$ , где  $r(\varphi)$  — уравнение контура в полярной системе координат с полюсом в центре формы объекта. Аналогично можно рассмотреть периодические функции  $x(s)$ ,  $y(s)$ , представляющие кривую на координатной плоскости  $(x, y)$ . На этой основе был предложен ряд практически эффективных вычислительных схем для расчета классифицирующих инвариантов. Например, дискретное представление контура рядами Фурье с конечным числом членов  $N$  может иметь вид

$$x(s) = a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(2\pi ns/P) + b_n \sin(2\pi ns/P)];$$

$$y(s) = c_0 + \sum_{n=1}^N [c_n \cos(2\pi ns/P) + d_n \sin(2\pi ns/P)].$$

Коэффициенты  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$ ,  $d_n$ , называемые «эллиптическими признаками», рассчитывают по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k; \quad c_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k; \quad a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos n\delta;$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin n\delta; \quad c_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \cos n\delta; \quad d_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N y_k \sin n\delta,$$

где  $\delta = 2\pi \Delta s/P$ ;  $\Delta s$  — приращение длины дуги между двумя точками контурной последовательности.

Для расчета тригонометрических функций можно воспользоваться эффективным рекуррентным алгоритмом:

$$\cos n\delta = [\cos(n-1)\delta + \cos(n-1)\delta] \cos \delta - \cos(n-2)\delta;$$

$$\sin n\delta = [\sin(n-1)\delta + \sin(n-1)\delta] \cos \delta - \sin(n-2)\delta.$$

Величины

$$I_n = a_n^2 + b_n^2 + c_n^2 + d_n^2; \quad J_n = \det \begin{pmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{pmatrix};$$

$$L_{nm} = (a_n^2 + b_n^2)(a_m^2 + b_m^2) + (c_n^2 + d_n^2)(c_m^2 + d_m^2) + 2(a_n c_n + b_n d_n)(a_m c_m + b_m d_m)$$

инвариантны к сдвигам и поворотам изображения и могут использоваться для классификации объектов. Если возможны изменения масштабов (например, при вариациях расстояния от камеры до рабочей плоскости), то переходят к нормализованным инвариантам  $I_n/I_1$ ;  $J_n/J_1$ ;  $L_{nm}/J_1^2$ . Иногда инвариантные характеристики кривых удается получить непосредственно из их цепных кодов. Следует отметить, однако, что алгоритмам расчета признаков на основе изменений кривизны и тому подобных свойств контура присущ общий недостаток локальных методов — большая чувствительность к шумовым искажениям границ объектов.

Во многих алгоритмах классификации, базирующихся на интегральных свойствах областей изображения, в систему формальных признаков входят моменты функции яркости изображения или их комбинации. Для дискретизованного изображения объекта момент  $M_{pq}$  порядка  $p+q$  ( $p, q$  — целые положительные числа) определяется выражением

$$M_{pq} = \sum_i \sum_j G(\bar{x}_i, \bar{y}_j) \bar{x}_i^p \bar{y}_j^q, \quad \bar{x}_i = x_i - x_{\text{ц}}; \quad \bar{y}_j = y_j - y_{\text{ц}},$$

где  $x_{\text{ц}}$ ,  $y_{\text{ц}}$  — координаты центра формы объекта (их расчет описан ниже), а суммирование ведется по всем пикселям этого объекта.

Непосредственная вычислительная реализация последней формулы может не уложиться в реальное время (расчет моментов второго порядка для изображения размером  $256 \times 256$  на ЭВМ VAX 11/780 занимает около 6,5 с). Сложность вычисления моментов резко возрастает с ростом их порядка. Поэтому на практике в СТЗ роботов удается использовать лишь несколько моментов низкого порядка (чаще всего — до второго), для расчета которых были построены специальные микросхемы [54] и предложены упрощенные алгоритмы программной реализации. Например, моменты первого и второго порядка бинарного изображения объекта можно найти с помощью простых арифметических выражений:

$$M_{10} = \sum_n x_n = d(n_0 + n_K)/2; \quad M_{01} = \sum_n y_n = dY;$$

$$M_{11} = \sum_n x_n y_n = dY(n_0 + n_K)/2; \quad M_{20} = \sum_n x_n^2 = S(n_K) - S(n_0 - 1);$$

$$M_{02} = \sum_n y_n^2 = dY^2,$$

где суммирование ведется от начального  $n_0$  до конечного  $n_k$  пиксела однородного линейного сегмента объекта;  $Y$  — константа;  $d = n_k - n_0 + 1$ ;  $S(n) = n(n+1)(2n+1)/6$ .

Для этого случая весьма информативными инвариантными признаками служат собственные числа матрицы моментов второго порядка

$$v_{\min} = 0,5(a_{11} + a_{22}) - 0,5[(a_{11} - a_{22}) + 4a_{12}^2]^{1/2};$$

$$v_{\max} = 0,5(a_{11} + a_{22}) + 0,5[(a_{11} - a_{22}) + 4a_{12}^2]^{1/2},$$

где  $a_{11} = \sum_n \bar{x}_n^2/S^2$ ;  $a_{22} = \sum_n \bar{y}_n^2/S^2$ ;  $a_{12} = \sum_n \bar{x}_n \bar{y}_n/S^2$ ;  $S$  — площадь объекта.

Следует подчеркнуть, что, несмотря на «популярность» моментных инвариантов, с их помощью далеко не всегда удается на практике классифицировать детали, широко встречающиеся в робототехнических задачах. Например, объекты, представленные на рис. 2.5, имеют совершенно одинаковые моменты как первого, так и второго порядков. Теоретически, неограниченно повышая порядок моментов, можно получить нужную полноту системы классифицирующих признаков. Однако отмеченная выше вычислительная сложность моментных инвариантов, резко усиливающаяся с увеличением порядка, не позволяет рассчитать достаточно большой их набор в реальном времени.

В [24] была предложена иная система формальных классифицирующих признаков, инвариантных к сдвигам и поворотам изображения объектов. Для контурной последовательности точек  $\{(x_v, y_v)\}$ ,  $v = \overline{1, n}$ , вычислительная формула для расчета предложенных признаков — интегральных функционалов  $J_m$ ,  $m = \overline{1, M}$ , имеет следующий вид:

$$J_m = \sum_{k, l=1}^n \Phi_m [(x_k - x_l)^2 + (y_k - y_l)^2],$$

где  $\{\Phi_m(u)\}$  — система  $M$  функций, обладающих тем свойством, что их первые производные кусочно-непрерывны для  $u > 0$  и линейно независимы в их общей области определения. Доказано, что набор  $\{J_m\}$ ,  $m = \overline{1, M}$  образует систему функционально независимых величин (т. е. ни одна из них не является функцией других). Этот факт служит основой регулярного метода формирования классифицирующих признаков с расширением размерности  $M$  признакового пространства по мере необходимости. Это позволяет уже на этапе обучения автоматически отобрать необходимое количество признаков, не привлекая квалифицированных специалистов к исследованию каждой новой партии деталей, что облегчает работу с СТЗ робота в реальных производственных условиях.

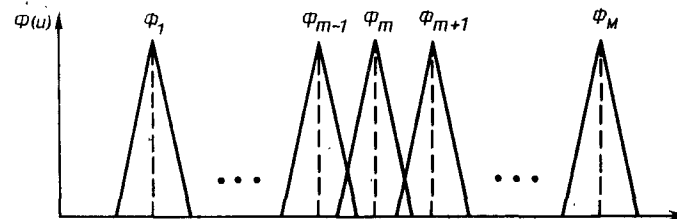


Рис. 2.6. Вид функций  $\Phi_m$ , используемых при расчете независимых классифицирующих признаков

В отличие от моментных инвариантов, предложенные признаки рассчитываются не по всем пиксалам объекта, а лишь по сравнительно небольшому числу контурных точек (причем не обязательно упорядоченных в контурную последовательность). В то же время благодаря интегральности признаков такой метод устойчив к небольшим локальным вариациям контура в противоположность методам, основанным на разложении контурной линии в ряд. Большим достоинством предложенных инвариантов является их однородность. В отличие от приведенных выше традиционных признаков, все  $J_m$  для  $m = 1, 2, \dots$  рассчитываются по единому алгоритму, отличаясь друг от друга исключительно видом функций  $\Phi_m$ . На практике в качестве  $\Phi_m$  использовались функции, показанные на рис. 2.6. Их аргументами служат меры расстояний между парами контурных точек.

Важно, что при реализации алгоритма расчета признаков  $J_m$  открывается возможность эффективно распараллеливать вычисления, выполняя однотипные вычислительные операции на каждом из трех уровней: при расчете расстояний между всеми парами контурных точек; при получении всех членов суммы как значений однородных функций  $\Phi_m$ , различающихся лишь сдвигом по аргументу; и, наконец, при нахождении инвариантов  $J_m$  для разных  $m$  по единому алгоритму.

**Определение положения.** Важной задачей этапа описания изображений является получение количественной информации о местоположении объектов в рабочем пространстве робота. В принципе пространственные координаты выделенных характерных точек объекта можно определить известными методами триангуляции, используя стереоскопические установки, измерения с помощью нескольких дальнометрических сенсоров или комбинаций телекамеры и дальномеров, а также перемещения одного видеосенсора для последовательных осмотров сцены с разных точек зрения. Однако наиболее типичной задачей локализации объектов, которая решается СТЗ, широко применяемыми в промышленной робототехнике, пока можно считать определение координат  $x_{ц}$ ,  $y_{ц}$  центра формы изображения объекта на опорной плоскости, когда удастся перейти от трехмерного случая к двумерному.

При расчете координат центра формы, как правило, используются отношения моментов для данного объекта:  $x_{ц} = M_{10}/M_{00}$ ;

$y_d = M_{01}/M_{00}$ . Особенно упрощаются вычисления в случае бинарных изображений, для которых  $\bar{M}_{00} = \sum_i \sum_j 1$ ;  $\bar{M}_{10} = \sum_i \sum_j i$ ;  $\bar{M}_{01} = \sum_i \sum_j j$ , где суммирование ведется по  $i, j$ , принадлежащим объекту, т. е. связанной области изображения, заполненной «1». Иногда для грубой локализации объектов можно воспользоваться следующими формулами:  $x_d \approx (i_{\min} + i_{\max})/2$ ;  $y_d \approx (j_{\min} + j_{\max})/2$ , где соответствующие индексы обозначают максимальные и минимальные значения абсцисс и ординат, ограничивающих зону, занятую изображением объекта в кадре. В [9] описан ряд нашедших применение на практике методик определения некоторых характерных точек внутри изображения объекта с помощью набора отдельных датчиков, заранее устанавливаемых человеком в нужных местах согласно результатам предварительного анализа конкретной партии объектов.

Измерив тем или иным способом пространственные координаты нескольких должным образом выбранных точек объекта, нетрудно вычислить его габаритные размеры, максимальный и минимальный радиусы и другие характерные размеры. Этот же подход в принципе можно использовать для определения ориентации объекта в рабочем пространстве, которую наряду с типом, координатами и размерами объекта необходимо знать для правильного формирования действий робота.

**Определение ориентации.** В СТЗ промышленных роботов эта задача чаще всего решается в предположении, что объекты находятся на известной рабочей плоскости (столе, конвейере) в одном из конечного числа устойчивых состояний. Применяемые для решения задачи в такой постановке алгоритмы можно разделить на следующие группы.

Алгоритмы первой группы основаны на определении ориентации по относительным положениям каких-либо двух выделенных точек изображения объекта: по направлению максимального (или минимального) радиуса-вектора относительно координатных осей рабочей плоскости; по направлению вектора, идущего из  $(x_d, y_d)$  в некоторую характерную точку объекта (например, в центр наибольшего отверстия, в угол или какую-либо другую локальную особенность контура), либо соединяющего две такие характерные точки. Подобным методам присущ общий недостаток, связанный с тем, что на стадии обучения СТЗ робота нужен достаточно квалифицированный оператор, способный правильно выбрать и указать нужные «характерные точки» объектов. Кроме того, как указывалось выше, на практике трудно добиться высокой точности измерения координат локальных особенностей изображения.

Вторая группа алгоритмов обеспечивает определение ориентации объекта по вычисляемому через моменты направлению главных осей инерции его центрированного изображения. Угол  $\varphi$

наклона оси минимального момента инерции к горизонтали можно найти из соотношения  $\operatorname{tg} 2\varphi = 2M_{11}/(M_{02} - M_{20})$ . Такой метод сравнительно несложен в реализации и не требует высокой квалификации оператора. Однако он непригоден в случае изображений объектов с одинаковыми главными моментами инерции (например, для широко распространенных в робототехнических приложениях деталей квадратного сечения), когда числитель и знаменатель в правой части приведенной выше формулы одновременно обращаются в нуль. Кроме того, ориентацию по этому методу можно определить лишь с точностью до  $180^\circ$ . Уравнение  $\operatorname{tg} \varphi = (M_{02} - v_{\min})/M_{11}$  позволяет найти ориентацию центрально-несимметричных объектов однозначно, поскольку неопределенность возникает только для случаев  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi/2$ , которые можно отличить друг от друга по знаку выражения  $M_{20} - M_{02}$ . К симметричным объектам неприменима и эта модификация метода главных осей инерции.

При практическом использовании роботов с СТЗ угол ориентации, необходимый для задания движения робота, удобно отсчитывать не от координатных осей рабочей плоскости, а по углу поворота объекта в этой плоскости относительно некоторой «эталонной» ориентации, в которой объект был предъявлен роботу на стадии обучения (считается, что при таком повороте центры формы объекта в текущем и эталонном предъявлениях предварительно совмещены). В этом случае описываемое изображение  $G(i, j)$  сравнивается с эталонным  $G^s(i, j)$ , которое последовательно «поворачивают» на небольшой угол  $\Delta\varphi$  путем применения к каждому используемому для сравнения пикселу формул преобразования поворота  $G^s(i, j) \rightarrow G_{\Delta\varphi}^s(i, j)$ . Искомая ориентация соответствует тому угловому положению эталона, при котором достигается минимум какой-либо меры рассогласования изображений

$$\varphi = \{k \Delta\varphi: \min_k \sum_i \sum_j \|G(i, j) - G_{k \Delta\varphi}^s(i, j)\|\},$$

где суммирование ведется по всем сравниваемым точкам изображений, а  $k = 0, 1, \dots, [2\pi/\Delta\varphi]$ .

Алгоритмы, основанные на этой идее, часто реализуются с использованием представления изображения  $g(r, \theta)$  в полярной системе координат  $(r, \theta)$  с полюсом в центре формы объекта. Вместо минимума меры рассогласования иногда ищут максимум меры сходства с эталоном, например нормированной функции корреляции

$$R(\varphi) = \sum_{\mu} \sum_{\nu} g(r_{\mu}, \theta_{\nu}) g^s(r_{\mu}, \theta_{\nu} - \varphi) / [\sum_{\mu} \sum_{\nu} g^2(r_{\mu}, \theta_{\nu})]^{1/2}.$$

Для ускорения вычислений применяют методы Фурье-преобразования, в том числе реализуемые аппаратными средствами:

$$R(\varphi) = F^{-1}[F(g)F(g^s)].$$

Чтобы обойтись без последовательных «поворотов» изображений, предлагалось вводить определенные преобразования исходной функции яркости. Например, если разложить в ряд Фурье дискретизованную функцию вида

$$I(\theta) = \int_0^{\infty} |F[g(r, \theta)]|^2 r dr = \\ = \sum_n c_n \sin(2n\theta + \Phi_n) = \sum_n (a_n \sin 2n\theta + b_n \cos 2n\theta),$$

можно воспользоваться тем фактом, что при изменении ориентации объекта на угол  $\varphi$  фазы  $\Phi_n = \arctg(b_n/a_n)$  меняются по закону  $\Phi_n \rightarrow \Phi_n + 2n\varphi$ . Тогда искомая ориентация  $\varphi = (\Phi_n - \Phi_n^0)/(2n)$ , где  $\Phi_n^0$  — фаза, определенная для эталонного изображения на стадии обучения. При реализации этого алгоритма некоторые трудности (помимо громоздкости вычислений) вызывает проблема адекватного выбора номера  $n$ .

Для уменьшения объема перерабатываемой информации можно рассчитывать спектр не для всего изображения объекта, а только для его границы. Так, разложив в ряд Фурье описанное в [16] уравнение выделенного контура  $\rho(\theta) = P/r(\theta)$  ( $P$  — периметр контура):  $\rho(\theta) = \sum_n C_n \sin(n\theta + \overline{\Phi}_n)$ , можно найти ориентацию по разности соответствующих фаз эталонного и текущего контуров  $\varphi = (\overline{\Phi}_n - \overline{\Phi}_n^0)/n$ , где номер члена ряда  $n$  выбирается по наибольшему абсолютному значению  $C_n$ .

Еще один подход к уменьшению числа обрабатываемых точек изображения состоит в изучении «круговых сечений», когда рассматриваются только пересечения изображения объекта с одной или несколькими окружностями с центром в точке  $(x_n, y_n)$ . Например, можно пользоваться функцией корреляции изображения с эталоном вдоль окружности фиксированного радиуса  $r_0$ :

$$\tilde{R}(\varphi) = \sum_v g(r_0, \theta_v) g^*(r_0, \theta_v - \varphi) / [\sum_v g(r_0, \theta_v)]^{1/2}.$$

Можно на стадии обучения запомнить последовательность длин дуг, проходящих внутри эталонного изображения и вне его, а на стадии работы сопоставлять с ней аналогичную последовательность, полученную для текущего изображения объекта.

Алгоритмам этой группы свойственна большая чувствительность точности определения ориентации даже к небольшим погрешностям измерения координат центра формы. Кроме того, вследствие отсутствия формальных критериев выбора радиуса  $r_0$  кругового сечения для обучения СТЗ необходимо привлекать квалифицированных операторов.

В [23] описан подход, сочетающий идею круговых сечений и аппарат Фурье-анализа и обеспечивающий автоматический вы-

бор всех необходимых параметров алгоритма определения ориентации. Вводится понятие степени симметрии изображения объекта  $L = [2\pi/\varphi_{\min}]$ , где  $\varphi_{\min}$  — минимальный угол, на который нужно повернуть изображение объекта вокруг центра формы, чтобы повернутый силуэт совпал с исходным. Это число связано с периодом функции  $g(r, \theta)$  по углу и равно номеру первого отличного от нуля коэффициента разложения этой функции в ряд Фурье по дуге окружности фиксированного радиуса  $r$ , пересекающей изображение объекта.

Для уменьшения влияния шумов дискретизации и погрешностей измерения на стадии обучения СТЗ автоматически выбирается радиус, максимизирующий модуль соответствующего коэффи-

циента Фурье:  $r = r_0 = \arg \max_r |\tilde{c}_L(r)|$ , где  $\tilde{c}_L(r) = \int_{-\pi}^{\pi} g(r, \theta) e^{-iL\theta} d\theta$ . На практике расчеты ведут по формуле  $\tilde{c}_L(r) = -\frac{ir}{L} \sum_v [\exp(-iL\theta_v^1) - \exp(-iL\theta_v^2)]$ , где  $\theta_v^1$  и  $\theta_v^2$  — поляр-

ные углы, соответствующие последовательным точкам пересечения окружности с контуром объекта. После выбора  $r_0$  искомая ориентация определяется в виде  $\varphi = \arg[\tilde{c}_L(r_0)/\tilde{c}_L^0(r_0)]/L$ , где  $\tilde{c}_L^0$  соответствует эталонному изображению. В связи с тем, что расчет тригонометрических функций проводится не во всех точках контура, а только в точках его пересечения с окружностью, число которых в робототехнических задачах обычно бывает невелико, этот метод обладает высокой вычислительной эффективностью. Он удобен также тем, что от оператора при обучении требуется просто предъявить объект в эталонной ориентации без указания какой-либо информации о его характерных точках.

Более подробное сравнение перечисленных и некоторых других алгоритмов определения ориентации в СТЗ можно найти в [22].

**Анализ изображения.** Закончив описание изображения, СТЗ переходит к следующему этапу, на котором осуществляется более или менее полная интерпретация наблюдаемой рабочей сцены. Одной из главных задач этапа анализа изображения в робототехнических приложениях является *распознавание* объектов, т. е. отнесение их к определенному типу. Если все возможные типы объектов известны заранее, то говорят о *классификации* объектов. Теория распознавания образов представляет собой самостоятельную и достаточно разносторонне освещенную в литературе научную дисциплину [27, 40, 43]. Здесь мы лишь напомним несколько общих ее принципов, активно используемых в робототехнике. Среди основных алгоритмов распознавания (классификации) объектов можно выделить две следующие крупные категории.

Первая категория базируется на теории *принятия решений*. Пусть имеется  $M$  классов объектов  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ , каждый из которых представляется вектором  $p = (p_1, \dots, p_n)^T$  в  $n$ -мерном пространстве признаков. Координатами этого вектора могут служить, например, любые из рассмотренных выше классифицирующих признаков, количественные характеристики формы изображения объекта, параметры его математического описания в виде аналитических уравнений, показатели его яркости, цвета, текстуры, значения логических переменных, указывающие на наличие или отсутствие каких-либо свойств, описанных в рамках «лингвистического» подхода, и др. Согласно теории принятия решений, в общем случае нужно найти  $M$  дискриминирующих (решающих) функций  $d_1(p), d_2(p), \dots, d_M(p)$ , таких, что для произвольного образа  $p^* \in \omega_m$  выполняется неравенство  $d_m(p^*) > d_l(p^*)$  при всех  $l = \overline{1, M}, l \neq m$ . Дискриминирующие функции можно искать, например, в виде разложения по системе каких-либо известных функций:  $d_m(p) = \sum_k w_{mk} \varphi_k(p)$ . В качестве  $\varphi_k(p)$  можно выбрать, скажем, полиномиальные функции  $p$ . Коэффициенты  $w_{mk}$  разложения получают в результате обучения путем предъявления достаточно представительной выборки объектов с точным указанием принадлежности каждого из них к одному из перечисленных классов.

При построении дискриминирующих функций часто используют процедуры согласования с «эталонным» вектором признаков. В качестве эталонного вектора  $e_m$  для класса  $\omega_m$  можно взять, например, вектор, координаты которого являются средними значениями соответствующих координат всех объектов из данного класса, предъявленных в обучающей выборке. Тогда для классифицируемого объекта с вектором признаков  $p^*$  можно вычислить евклидовы расстояния в  $n$ -мерном пространстве признаков  $\rho_m = \left( \sum_{k=1}^n [p_k^* - (e_m)_k]^2 \right)^{1/2}$  от точки  $p^*$  до эталонных точек  $e_m$  каждого класса и выбрать «ближайшего соседа», т. е. класс, соответствующий  $\min_m \rho_m, m = \overline{1, M}$ . Это эквивалентно выбору максимальной из  $M$  решающих функций  $d_m(p^*) = p^{*T} e_m - 1/2 e_m^T e_m$ .

Следует отметить, что на практике в СТЗ промышленных роботов иногда не переходят в  $n$ -мерное пространство признаков, а применяют концептуально упрощенную и в общем случае несколько менее эффективную процедуру непосредственного согласования исходного изображения  $G(i, j)$  с «шаблоном» — эталонным изображением  $E_m(i, j)$  объекта данного класса. Принятие решений о классе предъявленного объекта можно осуществлять по минимуму какой-либо меры его различия с эталоном (например,  $\sum_i \sum_j |G(i, j) - E_m(i, j)|$  или  $\sum_i \sum_j [G(i, j) - E_m(i, j)]^2$ ), либо по мак-

симуму меры сходства (например,  $\sum_i \sum_j G(i, j) E_m(i, j) / \sum_i \sum_j E_m^2(i, j)$ ).

Применяется и метод согласованной фильтрации: согласование эталонного «фильтра»  $E_m(i, j)$  с изображением вызывает пики взаимно корреляционной функции  $R(\mu, \nu) = \sum_i \sum_j E_m(i, j) \times G(1 - \mu, j - \nu)$  в той области  $(\mu, \nu)$ , где в поле зрения присутствует образ искомого объекта.

Как указывалось выше, при расчетах такого рода целесообразно пользоваться прямым и обратным преобразованием Фурье  $F^{-1} [F(E_m) F(G)]$ , ориентируясь на их аппаратную реализацию, поскольку программные алгоритмы поточечного согласования, вообще говоря, требуют значительных затрат времени. Кроме того, подобные меры чувствительны к шумам и геометрическим искажениям и не всегда обеспечивают инвариантность к сдвигам и поворотам объектов. Поэтому сопоставление  $G$  и  $E$  стараются проводить для объектов, фиксируемых в определенных положениях. Предлагалось также сопоставлять не все поле зрения, а лишь некоторые фрагменты изображения внутри подбираемого окна, покрывающего окрестность выделенной характерной особенности объекта. Часто алгоритмы принятия решений дополняют логическими процедурами выбора мер сходства и различия, наведения окна и другой настройки СТЗ. Так, за счет введения сравнительно простых эвристических правил, учитывающих конкретные особенности задачи, обеспечивается возможность распознавания места захватывания деталей путем сопоставления участков изображения с согласованным фильтром в виде проекций параллельных губок захватного устройства [15].

Вторую категорию методов классификации образов составляют *структурно-синтаксические методы*. Они базируются прежде всего на анализе структурных отношений между «примитивами» (простейшими фрагментами, составляющими образ объекта, — прямолинейными участками границы, дугами окружностей, уголками, отверстиями и т. п.) и между их упорядоченными наборами.

Разработан целый ряд различных синтаксических методов, таких как формальные грамматики порождения и разбора лингвистических описаний классов образов, процедуры проверки правильности преобразований, правила представления структурных отношений в виде деревьев, графов, сетей. В развитие чисто синтаксического подхода предпринимаются попытки ставить в соответствие каждому символу языка определенные семантические оценки, скажем, списки логических или количественных характеристик. Для количественного описания отношений между фрагментами сцены предлагалось, например, с каждым из них связать свою систему координат и поставить ей в соответствие узел графа, ребрами которого служат пространственные преобразования из одной системы координат в другую.



Совокупность примитивов и других признаков объекта вместе с формализованным описанием их отношений образует модель этого объекта. Для моделирования промышленных деталей был применен метод соединенных кривых (употребляется и термин «конкривые»): на границе объекта выделяются участки, аппроксимируемые прямолинейными отрезками (которые задаются своими концевыми точками) либо дугами окружностей (для задания которых запоминаются центр, радиус, угловой размер и ориентация). В результате исходное изображение размером в 50 ... 100 тыс. пикселей преобразуется в модельное представление типичной детали совокупностью нескольких десятков конкривых, для каждой из которых известны ее соседи.

Общий принцип распознавания заключается в выполнении следующих повторяющихся шагов: 1) хранящиеся в памяти описания конкривых модели попарно сопоставляются с конкривыми, выявляемыми на анализируемой сцене, и осуществляется упорядочение кандидатов на совпадение согласно оценке сходства каждой пары; 2) по нескольким «совпавшим» участкам (в порядке убывания сходства) выдвигается гипотеза о местоположении и ориентации детали; 3) на основе этой гипотезы выполняется геометрическое преобразование пространственного положения точек модели и сравнение полученных конкривых с реальными данными об изображении в окрестности прогнозируемых точек соединения. Если гипотеза не подтверждается, то процедура повторяется для новой гипотезы, выдвигаемой на основе следующих по порядку кандидатов.

Близкие идеи привели к развитию методов, которые использовались для распознавания частично перекрывающихся объектов, в том числе и промышленных деталей [49, 60, 64]. В число информативных фрагментов наряду с конкривыми включались уголки и другие локальные особенности контура объекта (глобальные признаки типа периметра, площади, моментов и т. п. в случае перекрывающихся деталей непосредственно неприменимы). Для формализации алгоритмов вводятся процедуры поиска на дереве (графе) решений, узлы которого соответствуют сравниваемым модельным фрагментам, причем им приписывается вероятностная мера сходства с реальностью. Выдвинутая гипотеза о положении прогнозируемых фрагментов порождает новую ветвь дерева. Важно, что вследствие перекрытия деталей вполне вероятно, что на видимой части анализируемой сцены прогнозируемые фрагменты будут отсутствовать и, наоборот, будут восприняты ложные кандидаты, образованные случайным пересечением границ деталей.

Поэтому возможно раскрытие довольно большого числа узлов на ветви, соответствующей гипотезе, которая вначале представлялась более вероятной, прежде чем она будет отвергнута и алгоритм перейдет к другой ветви. Не исключены также возвраты на ошибочно отвергнутые ветви.

Исследования эффективности различных — в большинстве своем эвристических — алгоритмов поиска на графах решений показали, что чем больше признаков разного уровня используется для согласования, тем меньшее число гипотез, отвечающих их разумным комбинациям, приходится проверять, т. е. существует обратная зависимость между временем, затрачиваемым на формирование самих признаков, и временем, необходимым для процедуры согласования. На практике удавалось строить модели всего из 2 ... 10 примитивов. Для согласования фрагментов контуров разработаны достаточно эффективные алгоритмы, основанные на рассмотренном выше преобразовании Хафа и его модификациях. В ряде опубликованных примеров распознавание и определение положения довольно сложных перекрывающихся деталей занимало менее 1 с (разумеется, время анализа сильно зависело от количества деталей в сцене, степени их перекрытия, «похожести» и других факторов [64, 68]).

С ростом вычислительной мощности средств обработки и анализа изображений более практическую направленность начинают приобретать исследования трехмерных рабочих сцен (см., например, [27, 78]). При этом для описания объектов наряду с рассмотренными выше признаками требуется знать удаленность точек сцены и пространственную ориентацию элементарных площадок поверхностей объектов. Можно пользоваться дальностными картами и распределениями локальных нормалей к поверхности («игольчатыми картами»). Для получения такой информации робот может эффективно использовать стереоскопические СТЗ, сочетание фотометрических и дальнометрических сенсоров, динамические видеоданные, поступающие в результате собственных движений объектов, целенаправленного перемещения сенсоров при активном осмотре сцен, управляемых изменений освещенности и т. п.

На следующем иерархическом уровне формирования «знаний робота» по информации, полученной от СТЗ, на основе построенных моделей объектов и описания их отношений создается модель наблюдаемой сцены. Проанализировав ряд представительных сцен, можно сформировать модель проблемной среды («модель мира робота»). При этом начинают применять методы интерактивного моделирования сцен с использованием систем автоматизированного проектирования и средств машинной графики.

Способы работы с моделями проблемной среды в процессе «понимания» изображений широко исследовались с позиций теории искусственного интеллекта. Предлагались схемы «восходящего» анализа (объединения более простых модельных представлений в более сложные), «нисходящего» анализа (поиска на рассматриваемой сцене объектов и их признаков по предварительно построенной модели), «гетерархической» организации (целенаправленной работы различных блоков анализа, связанных между собой не иерархической субординацией, а гибкими цепочками

обратных связей, используемыми только при необходимости). Предпринимались попытки использовать в СТЗ теорию «фреймов» — определенным образом организованных структур, одни элементы которых заполнены априорными сведениями о мире, а другие пусты и заполняются информацией, получаемой при рассмотрении конкретных сцен. Перечисленные методы искусственного интеллекта, применявшиеся для анализа трехмерных сцен, составленных из многогранников и других простых геометрических тел, подробнее изложены в [27, 40]. Однако в действующих СТЗ роботов подобные методы, да и вообще структурно-синтаксический подход к распознаванию и интерпретации сцен пока применяются гораздо реже, чем алгоритмы принятия решений на основе дискриминирующих функций. Возможно, одной из причин этого является то обстоятельство, что их формальный аппарат довольно сложен и еще не столь привычен специалистам-практикам.

## 2.5. СОПРЯЖЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ С СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОВ

Аппаратные и программные средства, обеспечивающие взаимосвязь СТЗ и системы управления робота, а также методика их сопряжения определяются двумя основными группами факторов.

Первая группа отражает естественную зависимость средств и методов сопряжения от аппаратуры и программного обеспечения самих сопрягаемых систем. До сих пор примеры совместного создания СТЗ и управляющих устройств промышленных роботов с единых позиций как составных частей общей информационно-управляющей системы робота крайне редки; гораздо типичнее случаи, когда их разрабатывают независимо друг от друга [49]. Поэтому при их сопряжении встают обычные технические задачи выбора конструктивов интерфейса, номинальных значений электрических параметров, принципов, способов и режимов обмена информацией, характеристик линий связи и других аппаратных средств с максимальным учетом существующих решений, заложенных как в СТЗ, так и в устройство управления робота. То же самое относится и к обеспечению программной совместимости: необходимо согласование кодов, протоколы обмена информацией, определенные системные соглашения.

При всей важности этих проблем в данном параграфе будут рассмотрены более специфичные для робототехники факторы второй группы, сильнее влияющие на методику сопряжения СТЗ и системы управления робота. Речь идет о тех функциональных задачах визуального оцувствления робота, которые во многом определяют способ включения СТЗ в робототехнический комплекс, принципы использования видеоинформации для управления роботом, уровень адаптивных возможностей робота с техническим зрением, а следовательно, и конкретные характеристики интер-

фейса, и содержание программной поддержки совместной работы двух систем.

Как уже подчеркивалось в гл. 1, роботы оснащают СТЗ с весьма разнообразными целями. Самая простая функция СТЗ состоит в том, чтобы на основании воспринятой, обработанной и проанализированной видеоинформации подать роботу команду на запуск некоторой жесткой программы действий, хранящейся в памяти его управляющего устройства, или, наоборот, на останов (прерывание) текущей программы и уход на какую-то жесткую подпрограмму (например, при обнаружении непредвиденного препятствия или при отсутствии объекта манипулирования в надлежащем месте). В этом случае достаточно направить от СТЗ в систему управления робота двоичный сигнал по соответствующему логическому каналу связи. Для синхронизации работы СТЗ с работой робота его цикловое позиционное, контурное или позиционно-контурное управляющее устройство может, в свою очередь, посылать запрос СТЗ о состоянии среды, а также сигнал, подтверждающий прием и выполнение полученной команды. Необходимо четко определить, какая из сопрягаемых систем будет ведущей, а какая — действовать в ждущем режиме. Возможен и асинхронный режим совместной работы с взаимным обменом запросами и подтверждениями, когда ведущей является попеременно то СТЗ, то система управления робота в зависимости от приоритетов выполняемых операций и получаемых данных.

При наличии нескольких альтернативных вариантов действий робота, зависящих от результатов зрительного анализа рабочей сцены, по команде СТЗ может быть вызвана нужная управляющая программа из набора заранее заданных жестких программ, либо может быть выполнен условный переход (согласно априорно сформулированным условиям), изменяющий последовательность команд управляющей программы. Тогда СТЗ, подавая устройству управления робота сигнал, должна сообщить ему номер варианта ситуации в рабочей среде, по которому робот выберет нужное действие на основе заранее обусловленных логических правил (например, таблицы «ситуация—действие»). Иногда выбор действия осуществляется уже в самой СТЗ, и в устройство числового программного управления передается сразу код, вызывающий переход к программе (команде) с соответствующим номером. Для декодирования применяют аппаратный дешифратор или программный способ анализа. Можно также передавать сигналы от СТЗ по нескольким альтернативным каналам, каждому из которых ставится в соответствие то или иное действие робота.

В обеих рассмотренных задачах функция СТЗ ограничивается воздействием на последовательность выполнения заранее заданных жестких программ, не приводящим к их адаптивному изменению. В случае же визуального оцувствления роботов не с программным, а с адаптивным управлением по результатам анализа изображения рабочей сцены в зависимости от типа, положения

и ориентации объектов манипулирования (воздействия), координат целевой точки и расположения препятствий корректируются параметры управляющих программ и строятся движения, которым робот заранее обучен не был. В современных адаптивных роботах начинают активно использоваться модели проблемной среды, которые синтезируются (уточняются) по информации от СТЗ и служат основанием для принятия решений о действиях робота, планирования его операций и формирования движений.

При сопряжении системы управления робота с СТЗ в целях обеспечения адаптивного режима функционирования наряду с описанным выше обменом командными (запускающими, блокирующими, прерывающими, синхронизирующими) логическими сигналами и кодами номеров запросов или типов ситуаций необходимо организовать передачу из СТЗ количественной информации: размеров, характеристик формы, координат и параметров ориентации объектов, результатов интерпретации сцен и нужных сведений о модели проблемной среды. Кроме того, в процессе работы СТЗ может посылать адаптивному роботу требования на выполнение различных воздействий на объекты рассматриваемой сцены для облегчения ее зрительного восприятия (например, «Убрать предмет, загораживающий нужный участок поля зрения», «Раздвинуть соприкасающиеся детали» и т. п.). В свою очередь, робот может передавать в СТЗ дополнительную вспомогательную информацию о рабочей среде, получаемую им от датчиков другого типа: тактильных, силомоментных, локационных и других, за счет чего процесс зрительного анализа сцен иногда удается существенно упростить.

При установке видеосенсора непосредственно на манипуляторе робота, что позволяет осматривать сцену с разных сторон и проводить ее динамический анализ, в СТЗ должны поступать либо текущие показания позиционных (и/или скоростных) датчиков робота, либо сразу декартовы координаты видеосенсора и параметры его пространственной ориентации, а при необходимости и скорости их изменения. Еще более насыщенный обмен данными имеет место в случае визуального сервоуправления, когда по результатам визуального наблюдения непрерывно (квазинепрерывно) минимизируется отклонение текущего состояния рабочего органа робота от желаемого.

Совершенно очевидно, что при включении СТЗ в состав адаптивного робота недостаточно решать только перечисленные выше общетехнические задачи аппаратно-программного обеспечения двустороннего обмена интенсивными информационными потоками. Особую остроту приобретает не столь типичный для традиционных приложений технического зрения вопрос о согласовании систем координат СТЗ, робота и рабочего пространства. Необходимость не только временной, но и пространственной координации работы сенсорно-информационной и исполнительной подсистем адаптивного робота требует специальной методики *калибровки* системы.

После физического подключения аппаратуры СТЗ к устройству управления робота и проверки работоспособности интерфейса и правильности функционирования всех линий связи видеосенсор устанавливается и фиксируется в одном из рабочих положений. Затем прежде всего проводится обычная автономная настройка СТЗ: наведение объектива на поле зрения, фокусировка, диафрагмирование, выбор чувствительности, контрастности и других параметров видеотракта, а также подбор освещения рабочей сцены и соответствующих светофильтров. Эти операции могут осуществляться как вручную человеком-оператором, так и в автоматизированном режиме с использованием алгоритмов, рассмотренных в п. 2.2. На этапе автономной настройки СТЗ выполняется важная процедура калибровки масштаба изображения, т. е. определяются коэффициенты пересчета горизонтального и вертикального размеров изображения объекта в картинной плоскости видеосенсора (обычно выражаемых числом пикселей) в соответствующие линейные размеры этого объекта в рабочей плоскости. Для этого можно поместить в поле зрения какой-либо эталонный объект (например, контрастный круг или квадрат с точно известными размерами) и подсчитать число элементов полученного изображения по осям  $x$  и  $y$ . Как правило, стремятся добиться изотропного усиления, т. е. одинаковых масштабных коэффициентов по горизонтали и вертикали. С помощью набора эталонных объектов удастся выявить и геометрические искажения изображения вследствие параллакса, несовершенства оптики, нелинейных эффектов при обработке видеосигнала и других причин. Если влияние искажений критично для функционирования робота, эти искажения необходимо скомпенсировать (возможно, программным путем).

Аналогичным образом, помещая на рабочее поле эталонные объекты разной высоты, калибруют дальнометрические датчики, поставляющие информацию о «глубине» точек наблюдаемой сцены. Ясно, что знание масштабных коэффициентов необходимо для сопряжения СТЗ с системой управления адаптивного робота, поскольку дает возможность измерять не только относительные, но и абсолютные размеры реальных объектов, определять расстояние между точками рабочего пространства по координатам соответствующих пикселей на картинной плоскости (дополнительно используя, если нужно, дальнометрическую информацию о «глубине» этих точек). Кроме того, при обучении калиброванной СТЗ оператор легко может указать в удобных для себя единицах требуемую разрешающую способность и точность формирования изображения, ограничения на размеры объектов снизу и сверху. Слишком маленькие изолированные «объекты» на изображении будут восприниматься как шум и отфильтровываться, а появление слишком большого объекта либо трактуется как нештатная ситуация, либо вызывает иную программу формирования и обработки изображения.

После этапа автономной настройки и определения масштабных коэффициентов СТЗ наступает центральный момент процедуры калибровки, заключающийся в «привязке» друг к другу координатных систем СТЗ и робота. Это делается для того, чтобы при работе в адаптивном режиме количественные данные о местоположении и ориентации объектов, поступающие от СТЗ, можно было преобразовать в соответствующие движения робота в рабочем пространстве. Обозначая, как и в п. 1.2, систему координат, связанную с телевизионной камерой, через  $O_K X_K Y_K Z_K$ , а систему координат, связанную с основанием робота, через  $O_P X_P Y_P Z_P$  (см. рис. 1.2), будем искать  $4 \times 4$ -матрицу однородных координат  $T_K^P$ , задающую переход из  $O_K X_K Y_K Z_K$  в  $O_P X_P Y_P Z_P$ .

Один из способов получения этой матрицы перехода может быть основан на независимой привязке систем координат камеры и робота к некоторой абсолютной системе координат  $O_A X_A Y_A Z_A$ , вводимой в рабочее пространство. Тогда  $T_K^P = T_a^P T_K^a$ , где  $T_a^P$  — полученная при установке робота  $4 \times 4$ -матрица пересчета из  $O_A X_A Y_A Z_A$  в  $O_P X_P Y_P Z_P$ , а  $T_K^a$  —  $4 \times 4$ -матрица преобразования координат, измеряемых СТЗ, в абсолютную координатную систему. Для задания последней матрицы можно найти координаты начала абсолютной системы  $O_A$  на изображении и либо воспользоваться знанием уже полученных масштабных коэффициентов, либо специально измерить в СТЗ координаты изображений известных точек, лежащих на координатных осях системы  $O_A X_A Y_A Z_A$ . Напомним, что в робототехнике часто рассматриваются двумерные рабочие сцены; тогда нет надобности определять  $z$ -координату. Обычно считается, что ось  $O_K Z_K$  направлена вдоль оптической оси телекамеры. Если при этом направить ось  $O_P Z_P$  робота параллельно оси  $O_K Z_K$ , то преобразование  $T_K^P$  сведется к переносу начала координат и к повороту вокруг него на определенный угол. В случае сцен «размерности 2,5» информация о точке, лежащей на оси  $O_A Z_A$ , получается от дальномера. При необходимости зрительного анализа трехмерных сцен пространственные координаты требуемых точек по их изображениям в СТЗ можно получить, например, с помощью нескольких видеосенсоров и/или дальнометров.

Следует отметить, что описанная методика привязки координатных систем телекамеры и робота с промежуточными переходами в абсолютную систему координат имеет определенные недостатки. Во-первых, необходимы затраты труда и времени на получение преобразований  $T_a^P$  и  $T_K^a$ , которые для многих робототехнических задач не всегда бывают нужны сами по себе. Во-вторых, возрастает объем дополнительных вычислений на перемножение получаемых матриц. И главное, в-третьих, накопленная погрешность итогового преобразования  $T_K^P$  включает погрешности обоих промежуточных переходов. Кроме того, необходимо иметь в виду, что для расчета перемещений рабочего органа робота по

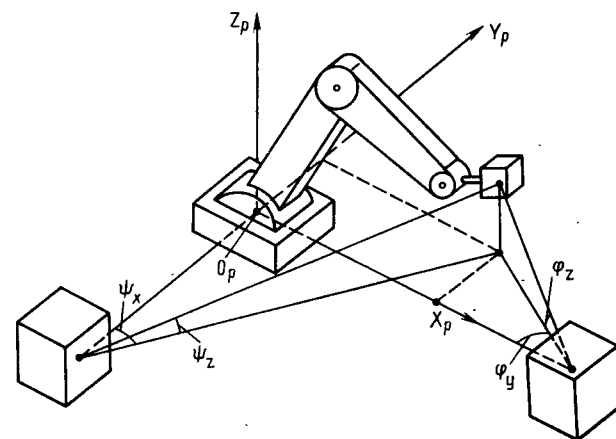


Рис. 2.7. Калибровка робота с СТЗ по методу триангуляции

информации от СТЗ после преобразования в систему координат, связанную с основанием робота, которое описывается матрицей  $T_K^P$ , далее требуется решать обратную кинематическую задачу, т. е. по требуемому состоянию рабочего органа робота в системе  $O_P X_P Y_P Z_P$  находить значения всех управляемых координат робота — шарнирных углов, поступательных перемещений звеньев. Эта операция также вносит свою (и немалую) погрешность. Например, робот PUMA-560 способен обеспечивать повторяемость при позиционировании  $\pm 0,1$  мм, но абсолютная погрешность позиционирования при расчете целевых значений управляемых координат путем решения обратной кинематической задачи в некоторых случаях достигает нескольких миллиметров. Поэтому суммарная погрешность всех преобразований при комплексной калибровке может оказаться неприемлемой.

В связи с этим на практике получила распространение методика непосредственной калибровки СТЗ совместно с роботом без промежуточных преобразований в абсолютную систему координат. Она состоит в том, что в поле зрения видеосенсора помещают эталонный объект, на котором СТЗ способна четко выделить калибровочную точку. В качестве такого объекта можно взять, например, круг с небольшим отверстием в центре, поскольку известно, что погрешность определения координат центра кругового изображения обратно пропорциональна его радиусу. На рабочем органе робота укрепляют специальный указатель, острие которого как можно точнее выводят в калибровочную точку. Непосредственно по показаниям позиционных датчиков робота, измеряющих значения его управляемых координат в данной конфигурации, рассчитывают положение калибровочной точки в системе  $O_P X_P Y_P Z_P$  (заметим, что при этом решается не обратная, а прямая кинематическая задача). Таким образом получают пер-

вое соотношение между положениями точки в картинной плоскости СТЗ и в системе координат, связанной с роботом. В случае двумерной сцены искомую матрицу преобразования  $T_k^p$  можно найти, повторив эту процедуру для трех независимых точек плоскости.

Если стоит задача калибровки СТЗ для работы с трехмерными сценами, то требуется провести независимые измерения в шести точках, по аналогичной методике вывода в них указатель робота и обрабатывая показания его позиционных датчиков. В ряде случаев вместо указателя на конце манипулятора укрепляют специальную трехмерную конструкцию, на которой можно сразу локализовать несколько калибровочных точек. Один из возможных вариантов калибровки по методу триангуляции иллюстрирует рис. 2.7, где показано измерение пространственных координат перемещаемого роботом кубического отражателя с помощью двух лазерных СТЗ, каждая из которых определяет по два направляющих угла в своей плоскости (углы  $\psi_x, \psi_z$  и  $\varphi_y, \varphi_z$ ).

Чтобы уменьшить общую погрешность калибровки СТЗ робота, часто увеличивают число независимых точек измерения и применяют методы статистической обработки результатов.

Для облегчения процесса вывода робота в калибровочные точки, ввода показаний позиционных датчиков, измерения координат изображений этих точек в картинной плоскости СТЗ, расчетов матриц преобразований, оценки получаемой погрешности калибровки разработаны сервисные средства программного обеспечения сопряжения СТЗ и системы управления робота, включая языки высокого уровня.

Ряд примеров зрительного оцувствления промышленных роботов с описанием интерфейсов СТЗ и управляющих устройств приведен в [49].

## ГЛАВА 3

### ТИПОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

#### 3.1. ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными типами источников излучения, используемых в СТЗ роботов, являются *лампы накаливания, газоразрядные лампы, светодиоды и лазеры*. Кроме того, в ряде практических применений используется излучение естественных источников, чаще всего прямое, отраженное и рассеянное солнечное излучение. Иногда используется собственное излучение наблюдаемого объекта, например, в СТЗ сварочных роботов свечение расплава или сварного шва. Источникам оптического излучения, как искусственным, так и естественным, посвящена обширная литература, поэтому здесь нет необходимости подробно рассматривать их свойства. После некоторых общих сведений справочного характера рассмотрим ряд существенных для робототехники особенностей источников указанных типов.

Источники оптического излучения описываются системой энергетических (фотометрических), пространственных (геометрических), временных и других параметров и характеристик. Основные энергетические и фотометрические, или световые, характеристики оптического излучения приведены в табл. 3.1, где  $dA_1$  и  $dA_2$  — площади элементарных участков излучающей и облучаемой поверхностей соответственно, причем берутся видимые площади, т. е. спроецированные на плоскость, перпендикулярную к направлению, соединяющему излучатель и приемник;  $d\omega_1$  — элементарный телесный угол с вершиной на  $dA_1$ . Переход от объективной, не зависящей от свойств приемника излучения, системы энергетических величин к субъективной — световой системе — проводится на основе соотношения между световым потоком  $F$  (или  $\Phi_v$ ) и потоком излучения  $\Phi_e$ :

$$F = \Phi_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda,$$

где  $K_m \approx 680 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$  — максимальное значение спектральной эффективности монохроматического излучения для глаза человека (на длине волны  $\lambda = 555 \text{ мкм}$ );  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  — диапазон спектральной чувствительности глаза (обычно  $\lambda_1 = 0,38 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_2 = 0,76 \text{ мкм}$ );

Основные энергетические и световые величины

| Энергетическая величина                    | Обозначение и выражение по определению                     | Единица                              | Световая величина   | Обозначение и выражение по определению   | Единица                    |
|--|--|--------------------------------------|---------------------|--|----------------------------|
| Поток излучения                            | $\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$ | Вт                                   | Световой поток      | $F = \Phi_v = 680 \int_{0,38}^{0,76} V(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$ | лм                         |
| Энергия излучения                          | $Q_e = \int_0^t \Phi_e(t) dt$                              | Дж                                   | Световая энергия    | $Q_v = \int_0^t \Phi_v(t) dt$  | лм·с                       |
| Сила излучения                             | $I_e = d\Phi_e/d\omega_1$                                  | Вт·ср <sup>-1</sup>                  | Сила света          | $I_v = d\Phi_v/d\omega_1$  | кд или лм·ср <sup>-1</sup> |
| Энергетическая яркость, лучистость         | $L_e = d^2\Phi_e/(dA_1 d\omega_1)$                         | Вт·ср <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> | Яркость             | $L_v = d^2\Phi_v/(dA_1 d\omega_1)$   | кд·м <sup>-2</sup>         |
| Энергетическая светимость, излучательность | $M_e = d\Phi_e/dA_1$                                       | Вт·м <sup>-2</sup>                   | Светимость          | $M_v = d\Phi_v/dA_1$   | лм·м <sup>-2</sup>         |
| Облученность                               | $E_e = d\Phi_e/dA_2$                                       | Вт·м <sup>-2</sup>                   | Освещенность        | $E_v = d\Phi_v/dA_2$   | лк                         |
| Энергетическая экспозиция                  | $H_e = \int_0^t E_e(t) dt$                                 | Вт·м <sup>-2</sup> ·с                | Световая экспозиция | $H_v = \int_0^t H_v(t) dt$   | лк·с                       |

$V(\lambda)$  — спектральная характеристика чувствительности глаза (относительная видность).

Помимо интегральных  $\Phi_e, \Phi_v, \dots$ , т. е. рассматриваемых в широком спектральном диапазоне, энергетических и световых величин, в практике расчетов СТЗ используются их спектральные плотности —  $\Phi_e(\lambda), \Phi_v(\lambda), \dots$ . Например,  $\Phi_e(\lambda) = \Delta\Phi_e/\Delta\lambda = d\Phi_e/d\lambda$  и т. п. Часто, когда ясно, о каких величинах идет речь, индексы  $e$  (энергетический) и  $v$  (визуальный) опускают.

По спектральному характеру излучения источники подразделяются на черные, серые и селективные излучатели, излучатели со сплошным и с непрерывным спектрами. Абсолютный излучатель — черное тело — характеризуется рядом хорошо изученных законов. Приведение характеристик реальных источников к характеристикам черного тела, например использование энергетической (радиационной), яркостной и цветовой температур [2, 52], удобно с практической точки зрения для сравнительной оценки излучения, а также СТЗ в целом (см. гл. 6).

Лампы накаливания нашли широкое применение как источники излучения для СТЗ, работающих в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Спектр излучения нити накала лампы непрерывный и зависит от ее температуры. Понижение температуры нити накала сдвигает ее спектральную характеристику в инфракрасную область и способствует существенному увеличению срока службы лампы (см. п. 6.2). Спектр излучения характеризует цветовая температура  $T_c$ , соответствующая температуре черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность (ГОСТ 13088—67), что и рассматриваемое излучение. Цветовая температура большинства ламп накаливания близка к 2000 ... 2500 К.

В настоящее время промышленность выпускает широкую номенклатуру ламп накаливания различного назначения (табл. 3.2).

Для освещения поля зрения СТЗ, характеризуемого большой протяженностью или большой глубиной, например в мобильных роботах, можно использовать прожекторные лампы. В качестве источников местного освещения применяют малогабаритные, миниатюрные и сверхминиатюрные лампы, которые могут быть встроены в элементы захватного устройства робота. Для фотоэлектрических измерителей рекомендуются лампы накаливания, предназначенные для оптических приборов.

Основными достоинствами ламп накаливания с точки зрения их применения в СТЗ роботов являются: достаточно широкий спектр излучения, простота и надежность схем включения, хорошая конструктивная совместимость с другими элементами СТЗ и ряд других. Появление галогенных ламп с их высокой светотдачей (отношением светового потока к потребляемой или излучаемой мощности) и повышенным сроком службы позволило заметно улучшить характеристики ряда СТЗ. Однако при этом

Таблица 3.2

Основные параметры некоторых ламп накаливания

| Назначение                | Обозначение     | Напряжение, В | Потребляемая мощность, Вт | Световой поток, лм | Срок службы, ч  |
|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------------|--------------------|-----------------|
| Общего назначения         | В, Б, БК, Г, ПЖ | 125 ... 245   | 15 ... 1000               | 85 ... 19 500      | 1000            |
| Местного освещения        | МО, МОЗ, МОД    | 12, 24, 36    | 15 ... 100                | 200 ... 1740       | 1000            |
| Индикаторные: миниатюрные | МН              | 1 ... 36      | —                         | 2,3 ... 85         | 6 ... 1500      |
| сверхминиатюрные          | СМН, СМНК       | 1,2 ... 12    | —                         | 0,05 ... 4         | 20 ... 2000     |
| Коммутаторные             | КМ              | 6 ... 60      | —                         | 0,4 ... 5,7        | 500 ... 2000    |
| Кинопроекторные           | К               | 4 ... 220     | 3 ... 750                 | 20 ... 21 800      | 10 ... 600      |
| Галогенные, облучательные | КГ, КГО, КГД    | 127 ... 380   | 600 ... 3500              | —                  | 2000 ... 10 000 |
| Для оптических приборов   | ОП, СЦ          | 2,5 ... 8,0   | 0,25 ... 20               | 6 ... 200          | 100 ... 300     |

несколько усложняется конструкция осветителей (осветительной системы) вследствие необходимости обеспечить требуемый теплоотвод, в первую очередь токонесущих контактов и цоколя ламп. Вполне удовлетворительна устойчивость большинства ламп накаливания, работающих в составе СТЗ, к воздействию внешних климатических условий, электромагнитных и других полей. Немаловажным достоинством является малая стоимость ламп накаливания, а также их широкая номенклатура.

К недостаткам ламп накаливания следует отнести относительно большие размеры и массу, особенно у ламп, создающих достаточно большие световые потоки, недостаточный для ряда применений срок службы, трудность модуляции потока за счет изменения питающего напряжения. Такую модуляцию с необходимой глубиной (свыше 50 %) и частотой (свыше 100 Гц) удастся осуществ-

ить только у маломощных миниатюрных ламп, поскольку тепловая инерция нитей накала ламп велика. В качестве примера на рис. 3.1 приведена схема низкочастотного модулятора, выполненного на базе операционного усилителя или усилителя низкой частоты. Миниатюрные лампы

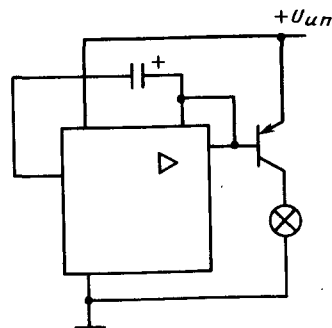


Рис. 3.1. Схема модуляции излучения миниатюрной лампы накаливания на базе операционного усилителя

Таблица 3.3

Основные параметры некоторых типов люминесцентных газоразрядных ламп

| Тип   | Напряжение, В | Потребляемая мощность, Вт | Световой поток, лм | Срок службы, ч   |
|---|---------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| <i>Общего назначения</i>                      |               |                           |                    |                  |
| ЛБ, ЛТБ, ЛХБ, ЛД, ЛДЦ, ЛДЦУФ, ЛХЕЦ, ЛТБЦ, ЛЕЦ | 54 ... 102    | 15 ... 80                 | 410 ... 4170       | 4 800 ... 15 000 |
| <i>Малогабаритные</i>                         |               |                           |                    |                  |
| ЛБ  | 30 ... 95     | 4 ... 13                  | 85 ... 585         | 6000             |
| <i>Фигурные</i>                               |               |                           |                    |                  |
| ЛБ, ЛБУ, ЛБК                                  | 66 ... 110    | 30 ... 40                 | 790 ... 1950       | 3000 ... 6000    |
| <i>Рефлекторные</i>                           |               |                           |                    |                  |
| ЛБР, ЛХБР                                     | 102           | 40 ... 80                 | 390 ... 500        | 4000             |
| <i>С повышенной цветопередачей</i>            |               |                           |                    |                  |
| ЛК, ЛЖ, ЛР, ЛЗ, ЛГ                            | 103           | 40                        | 230 ... 1500       | 4000             |

накаливания можно подключать непосредственно к логическим элементам транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

В газоразрядных лампах оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в атмосфере инертных газов, паров металлов или их смесей. Газоразрядные лампы характеризуются линейчатым или полосовым спектром излучения.

Широкое распространение в робототехнике нашли газоразрядные люминесцентные лампы с подогревными электродами (табл. 3.3). Включение электродов-спиралей для подогрева рабочего объема лампы и их выключение осуществляется стартером. В цепь лампы последовательно с ней включается балластный дроссель, предназначенный для стабилизации тока в цепи лампы, а также для повышения напряжения на электродах лампы в момент ее зажигания.

Излучение разряда в рабочем объеме лампы, падая на внутреннюю поверхность стенок баллона, покрытую люминофором, трансформируется в видимое излучение. Люминесцентные лампы низкого давления, применяемые для освещения, изготавливают следующих типов: ЛД — дневного света с цветовой температурой  $T_c = 6000$  К; ЛБ — белого света с  $T_c = 3450$  К; ЛХБ — холодного белого света с  $T_c = 4300$  К; ЛТБ — теплого белого света с  $T_c = 2800$  К; ЛЕ с  $T_c = 4000$  К и ЛХЕ с  $T_c = 5200$  К. Выпускаются также люминесцентные лампы низкого давления с откорректированным спектральным составом излучения (ЛДЦ, ЛБЦ, ЛХБЦ и ЛТБЦ), которые обеспечивают достаточно хорошую цветопередачу освещаемых ими цветных объектов [2].



Основным преимуществом люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания является их высокая световая отдача — примерно  $35 \dots 80 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ , превышающая в  $5 \dots 6$  раз световую отдачу ламп накаливания. Световую отдачу  $80 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$  при достаточно хорошей цветопередаче обеспечивает лампа типа ЛБ-40. Так как используемые люминофоры обладают небольшим послесвечением ( $0,01 \dots 0,1 \text{ с}$ ), то при питании ламп накаливания переменным током ( $220 \text{ В}$ ,  $50 \text{ Гц}$ ) поток излучения модулируется. Глубина модуляции достигает  $40 \%$ , частота модуляции  $100 \text{ Гц}$ .

В качестве источников ультрафиолетового излучения, используемых, например, в СТЗ роботов для контроля качества изделий, применяются *ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления*. Ртутные лампы типа ДРЛ, ДРШ, СВДШ, ДРТ при рабочих напряжениях  $68 \dots 1900 \text{ В}$  потребляют мощность  $80 \dots 5000 \text{ Вт}$  и обеспечивают световые потоки  $(3,4 \dots 120) \cdot 10^3 \text{ лм}$ . Срок службы таких ламп составляет  $(1 \dots 15) \cdot 10^3 \text{ ч}$ .

*Ксеноновые лампы* типа ДКСШ, ДКСР, ДКСТ, ДКСТВ имеют рабочее напряжение  $40 \dots 380 \text{ В}$ , потребляемую мощность  $(2 \dots 5) \cdot 10^3 \text{ Вт}$  и обеспечивают световой поток  $(35 \dots 2000) \cdot 10^3 \text{ лм}$ . Срок службы таких ламп  $100 \dots 800 \text{ ч}$ .

Для общего освещения промышленных помещений, открытых площадок используют *металлогалогенные лампы* типа ДРИ с рабочим напряжением  $130 \dots 230 \text{ В}$ , потребляемой мощностью  $250 \dots 3500 \text{ Вт}$  и световым потоком  $(19 \dots 350) \cdot 10^3 \text{ лм}$ . Лампы такого типа имеют срок службы  $(1,5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ ч}$ . Лампы типа ДРИ имеют хорошую цветопередачу и находят применение в цветном телевидении.

Стробоскопические системы освещения СТЗ роботов реализуются с помощью импульсных газоразрядных источников излучения типа ИСГ, ИСШ, ИФК, которые обеспечивают интервалы между вспышками  $0,01 \dots 20 \text{ с}$ .

Методика проектирования пускорегулирующей аппаратуры для газоразрядных источников излучения различного назначения описана в [2].

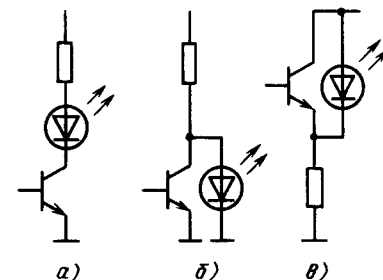
*Полупроводниковые светодиоды и инфракрасные излучающие диоды* характеризуются малыми размерами и массой, высокой устойчивостью к механическим нагрузкам, имеют значительный срок службы ( $10^4 \dots 10^5 \text{ ч}$ ), высокое быстродействие (время нарастания и спада импульса излучения для различных типов приборов составляет  $5 \text{ нс} \dots 1,0 \text{ мкс}$ ). Прямое падение напряжения для таких приборов равно  $1,5 \dots 4 \text{ В}$  при прямых токах  $10 \dots 100 \text{ мА}$ .

Полупроводниковые светодиоды с излучением красного, желтого, зеленого и синего цвета имеют силу света  $0,04 \dots 6 \text{ мкд}$  при прямом токе  $10 \text{ мА}$ . Инфракрасные диоды обеспечивают мощность излучения  $0,2 \dots 8 \text{ мВт}$  на длинах волн  $0,8 \dots 0,95 \text{ мкм}$  при прямом токе порядка  $100 \text{ мА}$ .

Светодиоды и излучающие диоды имеют следующие конструктивные исполнения: в металлостеклянном корпусе для направ-

Рис. 3.2. Примеры транзисторных схем включения светодиодов:

*а* — последовательно в цепь коллектора; *б* — в цепь нагрузки ключа; *в* — в цепь нагрузки эмиттерного повторителя



ленного излучения; в пластмассовом корпусе для рассеянного излучения; бескорпусные для монтажа в гибридные микросхемы и микросборки. Диаграмма направленности излучения светодиодов определяется конструктивным исполнением оптических элементов вывода излучения (микролинз, защитных стекол корпуса и т. п.).

Малые размеры и низкие уровни рассеиваемой мощности позволяют использовать светодиоды в качестве источников излучения, монтируемых в элементах захватных устройств робота, для световодных схем подсвета поля зрения СТЗ. Примеры транзисторных схем включения светодиодов приведены на рис. 3.2. Отметим, что эти схемы могут быть использованы и для включения маломощных полупроводниковых лазеров.

Характеристики светодиодов допускают их непосредственное подключение к элементам микросхем транзисторно-транзисторной (ТТЛ) (рис. 3.3, *а*) и эмиттерно-связанной (ЭСЛ) транзисторной логики (рис. 3.3, *б*), а также к логическим элементам на МДП-структурах (структура металл—диэлектрик—проводник). Для модуляции излучения светодиодов используются автономные автоколебательные схемы на дискретных транзисторах, интегральные схемы мультивибраторов, а также переключатели на цифровых логических элементах. Возможна модуляция излучения светодиодов аналоговыми сигналами [14].

В качестве источников направленного, монохроматического, когерентного излучения в СТЗ роботов используют *твердотель-*

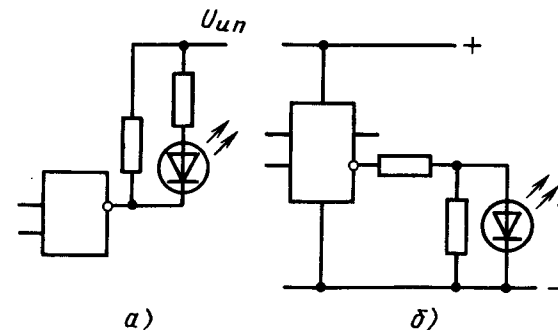


Рис. 3.3. Примеры подключения светодиодов к логическим элементам:

*а* — с транзисторно-транзисторной логикой; *б* — с эмиттерно-связанной транзисторной логикой

Таблица 3.4

## Основные параметры некоторых лазеров

| Расходимость пучка лучей   | Мощность, мВт                        | Длительность импульса, мкс | Частота повторения, кГц         | Температура, К |
|--|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------|
| <i>Газовые гелий-неоновые</i><br>( $\lambda = 0,6328; 1,15; 1,118; 1,206; 3,39$ мкм) |                                      |                            |                                 |                |
| 1,8 ... 40 *   | 0,1 ... 80                           | —                          | —                               | 293            |
| 10 ... 40 *  | (1 ... 5) 10 <sup>4</sup>            | 0,5 ... 1,0                | 0,2 ... 5                       | 293            |
| <i>Твердотельные</i> ( $\lambda = 0,6943; 1,06$ мкм)                                 |                                      |                            |                                 |                |
| 2 ... 75   | 10 <sup>6</sup> ... 10 <sup>11</sup> | 0,001 ... 1000             | (0,001 ... 15) 10 <sup>-3</sup> | 293            |
| <i>Полупроводниковые</i> ( $\lambda = 0,85$ мкм)                                     |                                      |                            |                                 |                |
| 1,2 ... 30   | (0,2 ... 200) 10 <sup>3</sup>        | 0,03 ... 1                 | 0,1 ... 10                      | 4; 77; 293     |
| * Диаметр пучка 1 ... 15 мм.   |                                      |                            |                                 |                |

ные (кристаллические и аморфные) и полупроводниковые, реже — газовые лазеры [52 и др.]. Номенклатура лазеров, выпускаемых промышленностью, с каждым годом растет. Совершенствуются их параметры и характеристики. Так, за последние годы значительно увеличился срок службы лазеров, например, у газоразрядных гелий-неоновых лазеров он достиг нескольких тысяч часов. Заметно повысилась пространственная, энергетическая и временная стабильность излучения лазеров. Вместе с тем задача создания дешевых и высоконадежных лазеров, сохраняющих стабильность своих рабочих параметров в сложных условиях работы СТЗ роботов (механические и климатические воздействия, загрязненность среды и т. п.), имеющих приемлемые размеры, массу, потребляемую мощность, остается для робототехники весьма актуальной. Пока мал КПД большинства лазерных излучателей, а размеры и масса как самих лазеров, так и их блоков питания остаются все еще сравнительно большими (за исключением маломощных полупроводниковых лазеров). Однако ряд их достоинств, и прежде всего высокие когерентные свойства излучения этих источников, делают их применение в СТЗ роботов очень перспективным. Основные параметры некоторых лазеров, применяемых в СТЗ роботов, приведены в табл. 3.4.

В заключение приведем таблицу сравнительных характеристик ряда источников излучения, в основу которой положены некоторые обобщенные по многочисленным литературным источникам данные об их использовании в оптико-электронном приборостроении вообще и в СТЗ роботов в частности (табл. 3.5). В ряде случаев эти оценки условны, зависят от конкретных типов источников и специфики их применения, что нашло свое отражение в табл. 3.5 (в некоторых графах даются одновременно оценки «+» и «—»).

Таблица 3.5

## Сравнительная характеристика основных типов источников излучения, используемых с СТЗ роботов

| Критерий сравнения   | Лампы       |               | Светодиоды | Лазеры |
|--|-------------|---------------|------------|--------|
|  | накаливания | газоразрядные |            |        |
| Возможность изменять или подбирать спектральный диапазон излучения                     | +           | +—            | —          | —      |
| Энергетический или световой КПД  | —           | +             | —          | —      |
| Стабильность параметров в процессе работы  | +           | —             | +          | +      |
| Габаритные размеры и масса   | —+          | +—            | +          | —+     |
| Простота цепи включения или блока питания  | +           | —             | +          | —      |
| Простота согласования параметров источника с параметрами оптической системы            | +           | —             | +          | —      |
| Срок службы, надежность  | +           | —             | +          | +—     |
| Стоимость  | +           | +             | +          | —      |
| Устойчивость к внешним механическим, климатическим, радиационным и другим воздействиям | +—          | +—            | +          | —      |
| Возможность управления параметрами в процессе работы СТЗ                               | +           | —             | +          | —      |
| Возможность осуществления модуляции в схеме включения источника                        | —           | +—            | +          | +      |

## 3.2. ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящем разделе кратко рассмотрим некоторые особенности простейших приемников излучения, служащих для преобразования оптического сигнала в электрический и используемых в СТЗ роботов. Приемники излучения, в которых наряду с этим преобразованием осуществляется и первичный анализ изображения или поля изображений, будут рассмотрены отдельно в гл. 4.

Физические принципы, лежащие в основе работы приемников, особенности их конструкции, схемы включения рассмотрены в многочисленной литературе (см., например, [11, 14, 52 и др.]). Отметим лишь, что в СТЗ роботов используются преимущественно селективные фотоэлектрические приемники, чувствительность которых неодинакова к излучению с различной длиной волны или с различным спектральным составом, и гораздо реже неселективные приемники (болометры, термоэлементы и др.).

В соответствии с ГОСТ 17704—72 различают: классы приемников, определяемые конструктивным оформлением, числом и расположением чувствительных элементов, исполнением охлаждения и другими признаками; виды приемников, различающиеся используемыми материалами; подгруппы и группы, определяемые принципом работы.

Для описания эксплуатационных возможностей фотоприемников используется большое количество параметров (см., например,

ГОСТ 21934—83). Рассмотрим основные параметры, которые прежде всего необходимо учитывать при разработке СТЗ роботов.

Чувствительность фотоприемника — это отношение изменения выходного сигнала, вызванного падающим излучением, к количественной характеристике этого излучения. Различают интегральную, монохроматическую, токовую, вольтовую, статическую и дифференциальную чувствительности.

Чаще всего необходимо знать интегральную чувствительность к немонахроматическому излучению определенного спектрального состава, токовую  $S_I$  и вольтовую  $S_U$  чувствительности:

$$S_I = \Delta I_c / \Delta \Phi_0, \quad S_U = \Delta U_c / \Delta \Phi_0.$$

Здесь  $\Delta I_c$ ,  $\Delta U_c$  — приращения выходного сигнала (тока, напряжения), отнесенные к приращению потока, падающего на приемник излучения.

Порог чувствительности (пороговая чувствительность) фотоприемника определяется средним квадратическим значением первой гармоники падающего на фотоприемник модулированного потока излучения с заданным спектральным распределением, при котором среднее квадратическое значение первой гармоники выходного напряжения (тока) равно среднему квадратичному значению напряжения ( $\sqrt{\bar{U}_ш^2}$  (тока  $\sqrt{\bar{I}_ш^2}$ ) шума в заданной полосе на частоте модуляции потока излучения:

$$\Phi_n = \sqrt{\bar{U}_ш^2} / S_U \quad \text{или} \quad \Phi_n = \sqrt{\bar{I}_ш^2} / S_I.$$

Это значение обычно приводится в полосе пропускания частот в 1 Гц.

Для сравнения приемников, различающихся площадью  $A$  чувствительного элемента и полосой пропускания частот  $\Delta f$ , используется удельный порог чувствительности  $\Phi_n^*$  и удельная обнаружительная способность  $D^*$ :

$$\Phi_n^* = \sqrt{\bar{U}_ш^2} / (S_U \sqrt{A \Delta f}); \quad D^* = 1/\Phi_n^*.$$

Из других параметров, которые будут необходимы для дальнейшего изложения, отметим постоянную времени приемника  $\tau_n$ , которая определяет его быстродействие и равна времени от начала внезапного облучения приемника до того момента, когда сигнал на выходе достигнет уровня 0,63 от установившегося при длительном облучении значения.

Помимо порога чувствительности, для оценки предельных обнаружительных возможностей приемников часто используют такие параметры, как уровень собственных шумов на выходе или темновой ток — среднее квадратическое значение тока на выходе полностью затемненного приемника.

Спектральные параметры включают коротковолновую  $\lambda'$  и длинноволновую  $\lambda''$  границы чувствительности и длину волны

Таблица 3.6

Параметры основных приемников излучения

| Тип                             | Размер фоточувствительной площадки, мм <sup>2</sup> | Интегральная чувствительность, мкА/лм  | Постоянная времени, мкс               | Темновой ток, мкА |
|---------------------------------|---|--|---------------------------------------|-------------------|
| Вакуумные элементы Ф, ОЦВ, ФЭК  | (3 ... 120) · 10 <sup>2</sup>                       | 20 ... 250                             | 10 <sup>-5</sup> ... 10 <sup>-6</sup> | 0,01 ... 15       |
| Фотоэлектронные умножители ФЭУ  | 10 ... 1000   | 10 <sup>-3</sup> ... 200 *             | (1 ... 100) · 10 <sup>-3</sup>        | 0,01 ... 20       |
| Фоторезисторы СФ, ФСА, ФСК, ФСД | 1,0 ... 200   | 10 <sup>2</sup> ... 10 <sup>3</sup> ** | 8 ... 10 <sup>6</sup>                 | —                 |
| Фотодиоды ФД, КФД, ФДК, ГД      | 0,2 ... 100   | (0,5 ... 10) · 10 <sup>3</sup>         | 10 <sup>-3</sup> ... 10 <sup>3</sup>  | 0,1 ... 30        |
| Фототранзисторы ФГ, ФТГ         | 1 ... 2   | (0,15 ... 3,0) · 10 <sup>6</sup>       | (0,5 ... 1) · 10 <sup>3</sup>         | 3 ... 300         |

\* Катодная; \*\* в мкА · (лм · В)<sup>-1</sup>.

$\lambda_{\max}$ , соответствующую максимуму спектральной характеристики монохроматической чувствительности  $S_\lambda$  приемника.

Кроме перечисленных параметров, необходимо учитывать рабочее напряжение, геометрические параметры (габаритные размеры, эффективную площадь чувствительного элемента, его конфигурацию и т. п.) и ряд других.

Поскольку параметры фотоприемников зависят от условий эксплуатации, то при проектировании видеосенсоров устройств СТЗ роботов необходим пересчет паспортных значений для конкретных условий эксплуатации (см. ниже п. 6.2).

Основными характеристиками приемников излучения, определяющими зависимость отдельных параметров от изменяющихся условий эксплуатации (спектрального состава падающего на приемник излучения, напряжения питания, частоты модуляции потока, температуры окружающей среды и т. д.), являются спектральные, вольтовые, частотные, энергетические, температурные и фоновые [14, 52].

Промышленность выпускает большое число приемников излучения различного вида, типа и назначения (табл. 3.6). Типичные спектральные характеристики ряда фотоприемников, используемых в СТЗ роботов, приведены на рис. 3.4. Характеристики  $С1'$ ,  $С3$ ,  $С4$ ,  $С7$  относятся к фотокатодам вакуумных фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей, диссекторов и других приемников с внешним фотоэффектом. Приемники излучения с такими характеристиками используют для регистрации сравнительно коротковолнового оптического излучения. Они имеют достаточно высокое быстродействие (постоянная времени  $\tau \leq 10$  нс), порог чувствительности порядка  $10^{-13} \dots 10^{-10}$  лм · Гц<sup>-1/2</sup>.

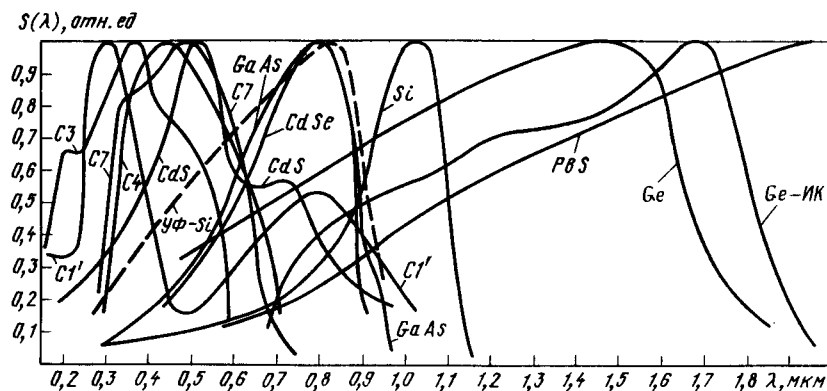


Рис. 3.4. Спектральные характеристики некоторых приемников излучения

Зависимости CdS, CdSe, PbS характеризуют фоторезисторы, постоянная времени которых изменяется в широких пределах ( $10^{-5} \dots 1$  с) в зависимости от материала фоторезистора и его конструкции. Пороговая чувствительность фоторезисторов составляет  $10^{-11} \dots 10^{-9}$  лм·Гц $^{-1/2}$ .

Таблица 3.7

Сравнительная характеристика приемников излучения, используемых в СТЗ роботов

| Критерий сравнения  | Фотоэлементы и фотоумножители | Фоторезисторы | Фотодиоды | Фототранзисторы | Болометры |
|---|-------------------------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|
| Ширина возможного спектрального рабочего диапазона  | —                             | +             | —         | —               | +         |
| Чувствительность  | ++                            | +             | +         | ++              | +         |
| Обнаружительная способность (пороговая чувствительность)  | ++                            | +             | +         | —               | +         |
| Быстродействие  | ++                            | +—            | +         | +—              | +—        |
| Простота схемы включения и питания  | —                             | +             | +         | +               | +—        |
| Возможность получения больших чувствительных площадок   | +                             | +             | +—        | —               | +—        |
| Стабильность параметров во времени и при изменении внешних условий  | +                             | —             | +         | +—              | +         |
| Устойчивость к вредным внешним воздействиям (механическим, климатическим и др.)   | +—                            | +—            | +         | +               | +         |
| Габаритные размеры  | —                             | +             | +         | +               | +         |
| Стоимость   | —                             | ++            | +         | +—              | +—        |
| Возможность создания многоэлементных и других конструкций, позволяющих проводить предварительный анализ и обработку изображений | —                             | +—            | ++        | ++              | +—        |

Характеристики Si, УФ-Si, GaAs, Ge, Ge-ИК относятся к фотодиодам, фототранзисторам и фоторезисторам, а также к МДП-структурам, выполненным из соответствующих материалов. Постоянная времени таких приемников излучения составляет  $1 \dots 100$  нс, пороговая чувствительность может достигать  $10^{-11}$  лм·Гц $^{-1/2}$ .

В заключение так же, как и для источников излучения, приведем сравнительную характеристику наиболее распространенных в СТЗ роботов приемников излучения (табл. 3.7). Как и в табл. 3.6, сравнительные оценки здесь носят во многом условный, лишь качественный и часто неоднозначный характер. Знак «+» во многих графах табл. 3.7 означает «достаточность» достигнутых на сегодня значений параметров для решения практических задач робототехники.

### 3.3. ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**Назначение и основные функции, выполняемые оптической системой.** В общем случае, как и у большинства других современных оптико-электронных приборов, оптическая система СТЗ робота служит:

для обеспечения требуемых энергетических (светотехнических) соотношений, т. е. для обеспечения заданного уровня сигнала (или соотношения сигнал—шум) на приемнике излучения путем сбора необходимого количества энергии излучения; формирования структуры светового пучка, его спектрального состава и т. д.;

получения изображения наблюдаемых объектов или рабочего пространства требуемого качества, что приводит к необходимости обеспечить достаточное пространственное, временное, спектральное и энергетическое разрешение;

выделения нужных объектов на фоне возможных помех и определения их характерных признаков, для чего также необходимо обеспечить должное разрешение по одному или нескольким параметрам оптического сигнала.

Последнее выполняется не только оптической системой, но и всей СТЗ, однако первичная обработка информации происходит прежде всего в оптических узлах, что предъявляет к ним во многих случаях достаточно специфические требования.

Как и другие оптико-электронные приборы, СТЗ могут работать пассивным, полуактивным или активным методом. В первом случае используется собственное или отраженное естественное излучение, во втором — искусственная подсветка всего поля обзора, а при активном методе зона подсветки занимает небольшую часть этого поля, где находится объект или его элемент, причем часто эта зона ограничивается лишь размером объекта или его части. При полуактивном и активном методах в состав оптической

системы вводят осветительное (передающее) и приемное оптические устройства, при пассивном — лишь приемное.

Структура и конструктивные особенности передающих и приемных оптических систем достаточно подробно описаны в литературе [5, 10, 52 и др.]. Ниже остановимся на особенностях ряда типовых узлов этих систем, однако сначала напомним некоторые общие сведения из прикладной оптики.

Схемы некоторых простейших оптических систем. Простейшими элементами оптических систем являются одиночная линза и сферическое зеркало. Фокусное расстояние линзы, расположенной в воздухе, определяется через радиусы ее поверхностей  $r_1$  и  $r_2$ , толщину  $d$  и показатель преломления  $n$  материала линзы по известной формуле

$$f' = \left[ (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2} \right]^{-1} \approx \left[ (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right]^{-1}.$$

Для одиночного сферического зеркала радиуса  $r$

$$f' = r/2.$$

Напомним формулу фокусного расстояния системы из двух линз:

$$f' = f_1' f_2' / (f_1' + f_2' - d), \quad (3.1)$$

где  $f_1'$  и  $f_2'$  — фокусные расстояния первой и второй линз;  $d$  — расстояние между ними (расстояние между задней главной плоскостью первой линзы и передней главной плоскостью второй линзы).

При большем числе линз после расчета эквивалентной системы из двух линз по этим же формулам рассчитывают  $f'$  для трех линз и т. д.

Дифференцируя (3.1), можно получить формулы для зависимости приращения  $f'$  от приращений  $\Delta f_1'$ ,  $\Delta f_2'$  и  $\Delta d$ :

$$\Delta f' = \left( \frac{f'}{f_1'} - K_1 \right) \Delta f_1' + \left( \frac{f'}{f_2'} - K_1 \right) \Delta f_2' + K_1 \Delta d,$$

где  $K_1 = f' / (f_1' + f_2' - d)$ .

Приведем формулы для расчета смещений  $\Delta$  предмета,  $\delta$  оптической системы (эквивалентной линзы) и  $\Delta'$  изображения вдоль оптической оси. Будем придерживаться правила знаков (ГОСТ 7427—76), по которому положительное направление задается направлением распространения света, а отрезки считаются отрицательными, если они расположены на оптической оси слева от точки отсчета.

При неподвижной оптической системе ( $\delta = 0$ )

$$\Delta' = f' V^2 \Delta / (f' + V \Delta),$$

где  $V$  — линейное увеличение оптической системы.

При неподвижном предмете и перемещении системы на  $\delta$  изображение сместится на

$$\Delta' = [1 - f' V^2 / (f' - V \delta)] \delta.$$

Отсюда

$$\delta = A \pm \sqrt{A^2 - (f'/V) \Delta'},$$

где  $A = 0,5 [\Delta' - f' (V^2 - 1)/V]$ .

При смещении предмета на  $\Delta$  для сохранения положения плоскости изображений неизменной ( $\Delta' = 0$ ) можно переместить оптическую систему на  $\delta$ , причем

$$\delta = B \pm \sqrt{B^2 + f' V \Delta},$$

где  $B = 0,5 [\Delta - f' (V^2 - 1)/V]$ .

При малых смещениях, т. е. при  $\Delta \rightarrow 0$ ,  $\delta \rightarrow 0$  и  $\Delta' \rightarrow 0$ :

$$\Delta'/\Delta \approx V^2; \quad \Delta'/\delta \approx 1 - V^2; \quad \Delta/\delta \approx 1 - 1/V^2.$$

Система из двух положительных перемещающихся компонентов (рис. 3.5) позволяет плавно изменять масштаб изображений при неизменных положениях плоскостей предметов и их изображений. Для расчета перемещений компонентов обычно задаются перемещением  $\delta_1$  первого компонента, вычисляют линейное увеличение  $V_1 = -f_1'/\delta_1$  и расстояние  $x_2$  от изображения после первого компонента до переднего фокуса второго компонента

$$x_2 = f_1' + f_2' - l_0 - f_1' (V_1^2 + 1)/V_1.$$

Затем определяют подвижку второго компонента

$$\delta_2 = \frac{x_2}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{x_2}{2} \right)^2 - f_2'^2},$$

увеличение второго компонента  $V_2' = \delta_2/f_2'$ , общее увеличение  $V = V_1 V_2' = -f_1' \delta_2 / (f_2' \delta_1)$  и расстояние между линзами после подвижки  $l = l_0 - \delta_1 + \delta_2$ .

Максимальная кратность такой системы переменного увеличения  $V_{\min}/V_{\max}$  достигается при предельных подвижках  $\delta_{1\text{пр}}$  и  $\delta_{2\text{пр}}$ :

$$\delta_{1\text{пр}} = \frac{l_0}{2} \pm \sqrt{\frac{l_0}{2} \left( \frac{l_0}{2} + f' \right)}; \quad \delta_{2\text{пр}} = \delta_{1\text{пр}} - l_0.$$

Плавное изменение фокусного расстояния, т. е. изменение масштаба изображения при постоянном положении фокальной плоскости, может быть осуществлено в системе из двух подвижных 1, 2 и одного неподвижного 3 компонентов (рис. 3.6). В такой системе

$$\delta_1 = [1 - f_2' / (f_2' - \delta_2)] \delta_2.$$

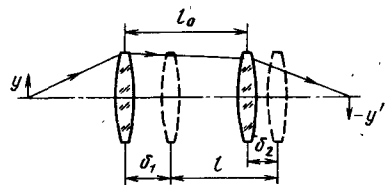


Рис. 3.5. Система из двух положительных перемещающихся компонентов

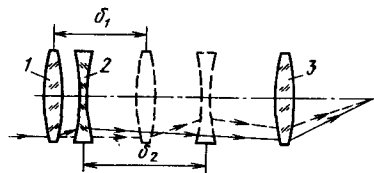


Рис. 3.6. Система из двух подвижных и одного неподвижного компонентов

Увеличение второй линзы в каждом ее положении  $V_2 = (\delta_2 - f_2)/f_2$ , а фокусное расстояние системы из линз 1 и 2  $f_{12} = f_1 V_2$ .

Линза 3 служит для получения действительного изображения удаленных предметов.

Плавное изменение масштабов изображений и постоянство положения плоскостей предметов и изображения достигаются в панкратических оптических системах, состоящих из большого числа компонентов. При этом, в отличие от двухкомпонентных систем, где перемещения осуществляются по непропорциональным зависимостям, в трехкомпонентных и более сложных системах удается обеспечить пропорциональные перемещения компонентов, например движение их в одну сторону с одинаковой скоростью. Схемы таких систем и формулы для их расчета приведены в [10].

**Осветительные (передающие) оптические системы.** Часто необходимые условия для функционирования СТЗ могут быть созданы только при использовании искусственного освещения, что осуществляется с помощью осветительных систем. В общем случае эти системы содержат: источники излучения, оптические или оптико-механические элементы, схемы питания и управления. Существуют осветительные системы общего (для обеспечения функционирования дальномеров, измерителей угловых и линейных размеров) назначения.

Различают три типа осветительных систем искусственного освещения общего назначения: общие, местные и комбинированные.

Общая система реализуется, когда один или несколько источников освещают какую-либо область, включая рабочую зону робота, находящуюся в поле зрения СТЗ. Недостатками системы общего освещения являются: наличие теней от конструктивных элементов оборудования, расположенных между светильниками и рабочей зоной; высокие энергетические затраты для создания требуемого уровня освещенности в рабочей зоне.

Местная система искусственного освещения реализуется, когда источник или группа источников освещают преимущественно поле зрения СТЗ. Комбинированная система — это совмещение общей и местной систем. Применение только местного освещения в производственных помещениях запрещено правилами техники

безопасности. По-видимому, в безлюдных роботизированных системах можно допустить применение только местного освещения с временным отключением общего. На период обслуживания, наладки и ремонта оборудования общее освещение должно быть включено обязательно. С помощью общего освещения создается обычно не менее 10 % требуемой освещенности для обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала.

Для СТЗ роботов, функционирующих вне производственных помещений, целесообразно использовать местные системы искусственного освещения прожекторного типа.

При проектировании систем освещения для СТЗ общего назначения за основу следует брать существующие нормы освещенности рабочих поверхностей в производственных помещениях. В случае необходимости нормативные значения освещенности корректируются только в сторону увеличения по результатам энергетических расчетов оптического тракта СТЗ, так как при недостаточной освещенности настройка СТЗ с участием человека недопустима.

Проектирование осветительных систем специального назначения осуществляется на основе результатов энергетических расчетов оптического тракта (см. гл. 6).

В зависимости от особенностей конкретных СТЗ и условий работы конструкции осветительных систем могут быть самыми различными. В простейшем случае рабочее пространство освещается непосредственно источником излучения, без применения дополнительных оптических элементов. Наиболее часто такой способ реализуется при освещении больших рабочих зон, при полуактивном методе работы СТЗ, наконец, при использовании источников с достаточно узкой диаграммой направленности, например лазеров или светодиодов. В последнем случае при освещении сравнительно небольшой площади необходимо обеспечивать стабильность этой диаграммы. Чтобы обеспечить достаточно высокую, а в ряде случаев и равномерную освещенность в рабочем пространстве СТЗ, при использовании способа непосредственного освещения в состав осветительной системы помимо источника необходимо вводить дополнительные оптические элементы — конденсоры, светофильтры, светорассеиватели (матовые или молочные стекла), объективы и т. п.

Для увеличения потока излучения, направляемого в рабочую зону или на освещаемый объект, в осветительных системах часто применяют специальные оптические элементы — конденсоры. Если сопоставить две оптические осветительные системы — без конденсора (рис. 3.7, а) и с конденсором (рис. 3.7, б), то можно показать, что выигрыш в освещенности в плоскости  $O$  в схеме с конденсором  $K$  составит  $\tau_k A_k / A_n$  раз. Здесь  $\tau_k$  — коэффициент пропускания конденсора;  $A_k$  — площадь конденсора (его выходного зрачка);  $A_n$  — площадь излучающей поверхности (проекция излучающей площадки на плоскость, перпендикулярную к оптиче-

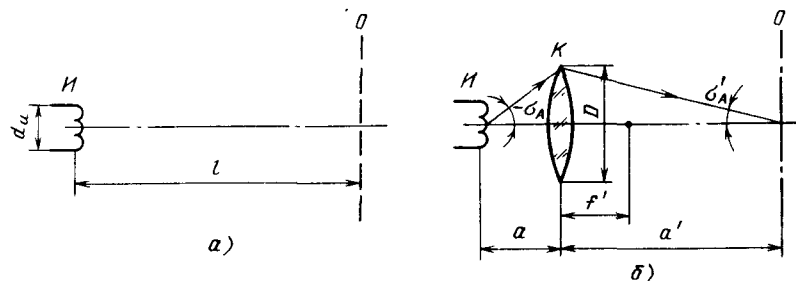


Рис. 3.7. Простейшие осветительные системы:  
а — без конденсора; б — с конденсором

ской оси). Действительно, для схемы без конденсора освещенность в плоскости  $O$

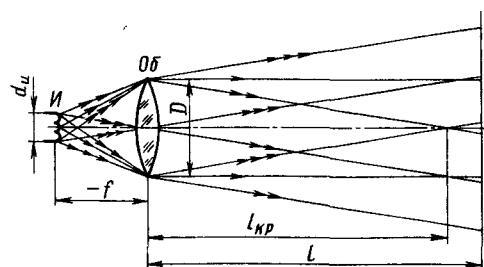
$$E_o = \tau_c L_{\text{и}} A_{\text{и}} / l^2 = \tau_c I_{\text{и}} / l^2, \quad (3.2)$$

где  $\tau_c$  — коэффициент пропускания среды на пути от источника до плоскости  $O$ ;  $L_{\text{и}}$  и  $I_{\text{и}}$  — яркость и сила излучения (света) источника (принимая, что расстояние  $l$  значительно больше размера  $d_{\text{и}}$  источника). Для схемы с конденсором при  $a' \approx l$ , если в плоскости  $O$  сечение светового пучка равно или перекрывает размер рабочей зоны, освещенность

$$E_o = \tau_c \tau_k L_{\text{и}} A_{\text{к}} / a'^2. \quad (3.3)$$

Из сопоставления (3.2) и (3.3) следует, что для увеличения освещенности  $E_o$  целесообразно увеличивать площадь выходного зрачка конденсора, т. е. увеличивать угол  $2\sigma_A$ , в котором собирается поток излучения, испускаемый источником. Однако этому препятствуют как конструктивные сложности, так и увеличение aberrаций конденсора, что приводит к расширению светового пучка в плоскости  $O$  и ухудшению равномерности освещенности в этой плоскости. Уменьшение aberrаций за счет усложнения конструкции конденсора ведет также к уменьшению его коэффициента пропускания  $\tau_k$ . Кроме того, при изменении расстояния  $a'$  в процессе работы СТЗ освещенность в плоскости  $O$  будет меняться, что часто весьма нежелательно.

Если освещаемый объект находится на большом расстоянии



от источника и требуется, чтобы его освещенность при изменениях этого расстояния практически оставалась постоянной, осветительную систему строят по схеме коллиматора или прожектора, в которой

Рис. 3.8. Простейшая схема коллиматорного типа

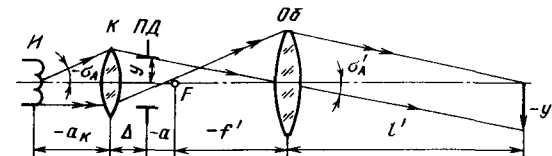


Рис. 3.9. Осветительная система с конденсором и объективом

излучатель  $I$  помещается в переднем фокусе объектива  $Об$  (рис. 3.8). В силу конечности размеров излучателя и в этой схеме имеет место расхождение пучка лучей и, следовательно, изменение освещенности при изменении расстояния  $l'$ . К этой схеме применима формула (3.3), приведенная выше для схемы с конденсором. Формула (3.3) верна для расчета освещенности при  $a' > l_{\text{кр}}$  или  $l > l_{\text{кр}}$ , где  $l_{\text{кр}} \approx -Df'/d_{\text{и}}$ .

От ряда недостатков рассмотренных систем свободна система с конденсором и объективом, представленная на рис. 3.9. Сразу за конденсором  $К$  помещается полевая диафрагма  $ПД$ , в качестве которой иногда используют марку, сетку или другой оптический элемент. Конденсор  $К$  создает изображение источника  $I$  во входном зрачке объектива  $Об$ . При расположении  $ПД$  около конденсора диаметр последнего будет минимален. Поскольку яркость излучающей площадки большинства источников неравномерна, эта схема предпочтительнее представленной на рис. 3.7, б, в тех случаях, когда важна равномерность распределения потока в плоскости освещаемых объектов.

Для обеспечения требуемого спектрального состава излучения в любую из представленных выше схем может быть введен светофильтр.

В качестве конденсоров и объективов осветительных систем используются как линзовые, так и зеркальные элементы. Их основными параметрами являются: фокусное расстояние  $f'$ , линейное увеличение  $V$ , относительное отверстие  $D/f'$  или диафрагменное число  $K = f'/D$ , апертурные углы (углы охвата) в пространстве предметов ( $2\sigma_A$ ) и в пространстве изображений ( $2\sigma'_A$ ). Для конденсора в виде тонкой линзы (см. рис. 3.7, б)

$$\text{tg } \sigma_A = DV / [2(1 - V)f'] = V / [2(1 - V)K].$$

Одиночная линза применяется в качестве конденсора при  $(2\sigma_A + 2\sigma'_A) \leq 45^\circ$ . Если  $a' \geq 20f'$ , то обычно в качестве конденсора используют плосковыпуклую линзу, обращенную плоскостью к источнику. При  $V = -1$  наилучшей формой линзы является двояковыпуклая с одинаковыми радиусами.

Двухлинзовый конденсор применяют при  $(2\sigma_A + 2\sigma'_A) \leq 60^\circ$ . Две плосковыпуклые линзы, соприкасающиеся сферическими поверхностями, при требуемом увеличении  $V$  должны иметь отношение фокусных расстояний  $f_2/f_1 = V$ , причем  $f_1$  — фокусное расстояние ближайшей к источнику линзы. Форму конденсора



обычно определяют из условия получения минимума сферической аберрации [6, 10].

Более сложные конденсоры позволяют получить большие значения суммы  $2\sigma_A + 2\sigma'_A$ , например трехлинзовые — до  $100^\circ$ . Однако их конструкции сложны, а потери света велики. Поэтому часто для увеличения апертурного угла  $\sigma_A$  выгоднее применить добавочное зеркало, как это делается в прожекторах, или использовать линзу Френеля. Формулы для расчета линзы Френеля приведены в [6, 10]. Реже в осветительных системах используются оптические линзовые растрсы.

Меньшие потери энергии имеют место в зеркальных и зеркально-линзовых системах. Одиночное сферическое зеркало редко используется на практике из-за большой сферической аберрации, и, как следствие, большой расходимости и неоднородности светового пучка, хотя его угол охвата может превышать  $100^\circ$  при увеличении  $V$  до  $-5$ . Чаще в качестве конденсора применяют эллипсоидные зеркала, в один из фокусов которых помещают малоразмерный (точечный) излучатель, а в другой — центр входного зрачка объектива осветительной системы. Апертурный угол в пространстве предметов таких зеркал может превышать  $180^\circ$ .

Специфичны оптические системы лазерных осветительных систем. В зависимости от назначения и принципа работы конкретной СТЗ такие системы могут фокусировать лазерные пучки на постоянном или переменном расстоянии, коллимировать их, изменять диаграмму направленности. Оптические элементы лазерных систем (линзы, пластины, призмы и т. п.) принципиально ничем не отличаются от элементов систем с некогерентными излучателями. В то же время при их выборе и расчете следует учитывать ряд особенностей, например, монохроматичность лазерного излучения, его поляризованность, узкую диаграмму направленности и др.

Помимо элементов сферической оптики, в некоторых системах используются цилиндрические линзы, позволяющие трансформировать оптический пучок практически в линию, т. е. сделать его сечение квазиодномерным.

К числу основных схем компоновки осветительных систем относятся:

однорядные или многорядные схемы, дополненные конструктивными диффузными отражательными элементами (потолок, стены помещения, плоскости оборудования), формирующие ненаправленную равномерно распределенную освещенность рабочей области СТЗ;

схемы с одиночной осветительной системой, оптическая ось которой параллельна оптической оси видеосенсора или совпадает с ней (бестеневая схема), и схемы «на просвет»;

схемы с различно ориентированными оптическими осями видеосенсора и осветительной системы (теневые схемы);

сканирующие схемы с подвижной оптической осью осветительной системы;

схемы катетерного типа для осмотра недоступных для прямого дистанционного наблюдения частей объектов.

Возможны смешанные схемы компоновки осветительных систем для одновременной реализации нескольких функций.

В зависимости от решаемой функциональной задачи осветительная система размещается вне конструктивных элементов робота и СТЗ, на специальном неподвижном или подвижном элементе, связанном с роботом, на захватном устройстве робота.

К числу важных характеристик осветительных систем относятся направленность излучения и его структура. Контраст объектов при ненаправленном освещении обусловлен отличиями в коэффициентах отражения частей объектов и фона. Направленное излучение создает тени и позволяет легче регистрировать отличия в характере отражательной способности объектов. Например, для наблюдения светлых металлических объектов и объектов из светлых пластмасс рекомендуется схема освещения, работающая на отражение. Для наблюдения объектов, выполненных из темных блестящих материалов, а также объектов с диффузно рассеивающими поверхностями, перекрытыми прозрачным материалом, либо объектов с направленно-рассеянным или смешанным отражением излучения поверхности рекомендуется схема, работающая на рассеяние. Направленные световые пучки различной формы создают структурированные зрительные образы с характерными информационными признаками (пространственными смещениями световых полос, световыми полосами различной ширины, характерными искажениями световых сеток).

В заключение отметим, что в некоторых осветительных системах используется модуляция потока излучения во времени, которая позволяет исключить или ослабить влияние посторонних фоновых засветок.

**Приемные оптические системы.** Важнейшим элементом приемной оптической системы является *объектив*. Объектив характеризуется фокусным расстоянием  $f'$ , площадями или диаметрами входного и выходного зрачков ( $A_{вх}$  и  $A_{вых}$  или  $D$  и  $D'$  соответственно), относительным отверстием  $D/f'$  или диафрагменным числом  $K = f'/D$ , угловым полем в пространстве предметов  $2\omega$ , линейным увеличением  $V$ , разрешающей способностью и оптической передаточной функцией, коэффициентом пропускания и рядом других параметров и характеристик.

В большинстве случаев объектив выполняет все те функции оптической системы, о которых говорилось выше, и к нему предъявляются сложные и порой противоречивые требования. Поэтому выбор и расчет параметров объектива — достаточно серьезная задача, решению которой посвящена специальная литература [6]. Ниже (см. п. 6.1, 6.3) будет показано, как рассчитываются или выбираются некоторые из важнейших параметров объектива

и как они связаны с параметрами источника и осветительной системы, а также с параметрами приемника излучения.

Не останавливаясь на особенностях оптических схем и конструкций многочисленных выпускаемых промышленностью объективов (см., например, [5, 6, 10]), отметим влияние отдельных параметров объектива на работу СТЗ.

Обеспечение требуемого уровня сигнала и его превышения над уровнем шумов зависит в первую очередь от значения  $A_{вх}$  или  $D$  объектива, принимающего поток от точечного или мало-размерного излучателя, не перекрывающего все угловое поле  $2\omega$ , или от значения  $D/f'$ , если излучатель перекрывает полностью  $2\omega$ . Однако увеличению  $A_{вх}$  (или  $D$ ), ведущему к росту сигнала, препятствует как требование уменьшить габаритные размеры системы, так и, главным образом, увеличение aberrаций, т. е. ухудшение качества изображений с ростом  $D$  или  $D/f'$ . Усложнение конструкции объектива путем увеличения числа его компонентов или применения асферических поверхностей заметно удорожает объектив, может приводить к уменьшению его коэффициента пропускания и к увеличению массы и размеров.

Увеличение  $f'$  ведет к возрастанию  $V$ , дает возможность повысить точность измерений, однако это часто нежелательно вследствие роста продольных размеров объектива и всей оптической системы.

Угловое поле объектива  $2\omega$  определяется размером рабочей зоны СТЗ, условиями ее размещения и функционирования, а также требованиями к отношению сигнал—шум на выходе СТЗ.

Если чувствительный слой приемника имеет размеры  $q = ab$  и расположен вблизи фокальной плоскости объектива, то угловое поле последнего определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \omega = \sqrt{a^2 + b^2} / 2f'.$$

В СТЗ объектив обычно служит для получения изображений предметов в плоскости анализа этих изображений или на чувствительном слое приемника излучения. Если предмет находится на большом удалении от объектива (в бесконечности), то его изображение строится в фокальной плоскости. Если предмет находится на конечном расстоянии (рис. 3.10), то значение смещения изображения  $z'$  может быть найдено из уравнения

$$z'^2 + (c - L)z' + f'^2 = 0.$$

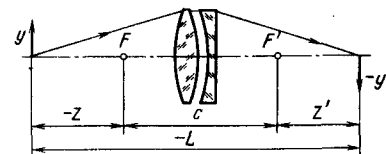
По этой формуле можно рассчитать значения смещения объектива вдоль оси, если расстояние до предмета изменяется в процессе работы СТЗ.

Линейное увеличение такой системы

$$V = y'/y = f'/z = f'/(c - L + z'),$$

при  $z' \ll L$  увеличение  $V \approx f/(c - L)$ .

Рис. 3.10. Изображение объекта, находящегося на конечном расстоянии



Более подробно о методах расчета  $A_{вх}$ ,  $D$ ,  $f'$ ,  $D/f'$  и  $2\omega$  будет сказано в пп. 6.1 и 6.3.

Разрешающая способность объектива, т. е. способность создавать отдельные изображения двух рядом расположенных точек, зависит от дифракционных явлений и aberrаций системы, а также от параметров анализатора и приемника излучения. Для идеальной оптической системы с круглым входным зрачком угловой размер  $\psi$  наблюдаемого из центра зрачка радиуса первого темного кольца в дифракционном изображении точки  $\psi = 1,22\lambda/D$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $D$  — диаметр зрачка. Часто для видимого излучения принимают, что в угловых секундах  $\psi'' = 120/D$ . Для плоскости изображений, отстоящей от зрачка на расстоянии  $l'$ , дифракционная разрешающая способность в линейной мере  $\delta = \psi l'$ . При работе на конечном расстоянии часто используют формулу  $\delta \approx \lambda/2\sigma_A$ , где  $2\sigma_A$  — двойной апертурный угол;  $\sin \sigma_A = D/2l'$ .

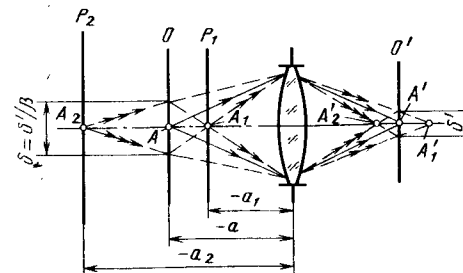
С разрешающей способностью связана глубина изображаемого пространства (глубина резкости изображений). Если объектив с входным зрачком диаметра  $D$  сфокусирован на какую-либо плоскость  $O$ , то одинаково резко будут восприниматься точки объектов, расположенных в промежутке между двумя плоскостями  $P_1$  и  $P_2$  (передний и задний планы), для которых размеры изображений (кружков рассеяния) не больше размеров, определяемых разрешающей способностью объектива (рис. 3.11). Из несложных геометрических соотношений, принимая увеличение  $V \approx f'/a$  при  $f' \leq |a|$ , можно получить, что

$$a_1 = f'^2 a / (f'^2 - K a \delta'); \quad a_2 = f'^2 a / (f'^2 + K a \delta'),$$

а глубина резко изображаемого пространства

$$\Delta a = a_1 - a_2 = 2K f'^2 a^2 \delta' / (f'^4 - K^2 a^2 \delta'^2),$$

где  $K = f'/D$ ;  $\delta'$  — диаметр допускаемого кружка в плоскости изображения.



Если  $P_2$  находится в бесконечности, то положение переднего плана  $P_1$  определяется как  $a_1 = a/2$ .

Если объектив сфокусирован на бесконечность,

Рис. 3.11. Схема для определения глубины изображения пространства

то расстояние, с которого все объекты видны одинаково резко (начало бесконечности),  $a_{\infty} = -D/\psi$ . Для видимой части спектра  $a_{\infty} = -1700D^2$ .

Аберрации объектива пропорциональны его относительному отверстию и угловому полю  $2\omega$ . Существует следующая эмпирическая зависимость, характеризующая современные фотографические объективы (которые с успехом могут быть использованы в СТЗ) [10]:

$$D \operatorname{tg} \omega \sqrt{0,01/f'} = 0,24 \dots 0,5.$$

Важным элементом является *конденсор приемной оптической системы*, который применяется в тех случаях, когда чувствительный слой приемника невозможно или нежелательно располагать в плоскости изображения, например вследствие вредного влияния неоднородности чувствительности по площади приемника при перемещении изображения по этому слою, при желании уменьшить площадь чувствительного слоя и в некоторых других случаях. Формулы для расчета параметров конденсора приведены в [52].

Иногда в качестве конденсоров применяют одиночные линзы (линзы Фабри), зеркальные ловушки и волоконные световоды, волоконно-оптические жгуты.

*Волоконно-оптические устройства* (цилиндрические и конические световоды, пластины, жгуты) обычно лишь переносят изображение, но не формируют его или служат в качестве узлов подсветки. При высоких уровнях освещенности рабочего пространства СТЗ их можно использовать и для приема светового пучка. Иногда их применяют для сканирования пространства предметов или изображений путем перемещения одного из концов гибкого волокна или жгута. Поскольку действие волоконно-оптических устройств основано, как правило, на явлении полного внутреннего отражения, допустимый радиус кривизны (изгиба) волокна не должен быть менее 20 ... 30 диаметров его сечения. Апертура волокна (произведение показателя преломления окружающей среды  $n_0$  на абсолютное значение синуса апертурного угла  $\alpha_A$ ) не должна превышать  $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления материала сердцевины волокна и его оболочки. Пропускание современных волокон достигает 90 % на 1 м длины и более; разрешение, определяемое диаметром волокон, составляет единицы и десятки микрон и более.

В СТЗ для оптической (спектральной) фильтрации полезного сигнала на фоне помех используют *оптические фильтры* различных типов. Наиболее распространены абсорбционные (поглощающие) и интерференционные фильтры. Первые просты по конструкции, дешевы, надежны в эксплуатации, однако имеют малую крутизну изменения спектрального пропускания, что не позволяет четко «отсечь» одну область спектра от другой. Наиболее

часто применяются абсорбционные светофильтры, изготавливаемые из цветного оптического стекла (ГОСТ 9411—81).

Большой крутизной и возможностью регулировать ширину полосы пропускания и ее положение по спектру отличаются интерференционные фильтры. Однако они сложны в изготовлении, имеют заметный дрейф спектральной характеристики при изменении температуры и их необходимо устанавливать в параллельных или слабо сходящихся пучках лучей.

На базе интерференционных фильтров создаются обычно дихроичные фильтры, которые одну часть падающего на них потока отражают, а другую — пропускают. Эти фильтры часто служат как светоделительные элементы, их также используют в схемах двухцветовой и балансной оптической селекции [52].

Для просмотра (сканирования) рабочей зоны, компенсации сдвига изображения, анализа распределения освещенности в плоскости изображений и решения ряда других задач в состав оптической системы СТЗ часто вводят специальные оптические и оптико-механические узлы и элементы — *сканирующие системы, компенсаторы, анализаторы*. Работа сканирующих систем и компенсаторов основана на изменении хода лучей, проходящих через линзы, плоскопараллельные пластины, призмы и зеркала или их комбинации, при изменении пространственного положения этих деталей — при их повороте, наклоне, вращении, поступательном перемещении.

Такие устройства характеризуются коэффициентом преобразования — отношением отклонения  $\beta$  смещения пучка лучей или изображения к перемещению  $\alpha$  компенсатора или сканирующего элемента, вызвавшего это смещение. У многих из них статическая характеристика  $\beta = f(\alpha)$  нелинейна, поэтому важно знать допустимый с заданной методической погрешностью  $\Delta\beta_m$  диапазон линейности этой характеристики. Схемы рассматриваемых устройств и выражения для их зависимостей  $\beta = f(\alpha)$  приведены в [52].

В качестве анализаторов оптического изображения часто используются *оптические растры* — диафрагмы с различным законом распределения прозрачности по площади растра, часто периодическим, а также некоторые виды призм [52]. Для оценки закона распределения освещенности в плоскости растра и преобразования этой зависимости в изменяющийся во времени сигнал перемещается либо сам растр, либо изображение. Последнее достигается путем перемещения всего объектива или какого-нибудь из его компонентов, а также с помощью сканирующих оптических элементов. Функции анализатора изображения выполняют также многоэлементные и координатно-чувствительные фотоприемники, что увеличивает быстродействие системы, а в ряде случаев и точность анализа и позволяет упростить обработку информационного сигнала.

В некоторых оптических системах СТЗ могут быть использованы оптические плоские или пространственные шарниры — ком-

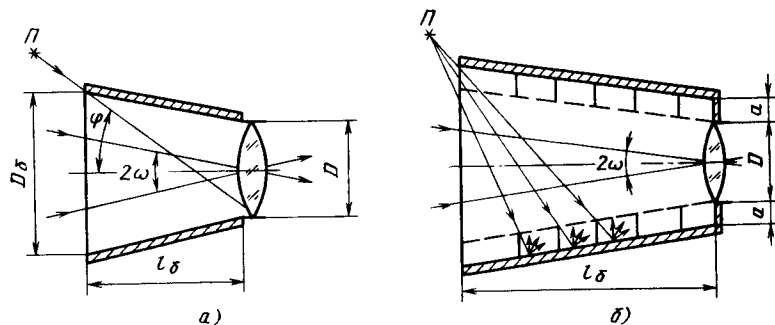


Рис. 3.12. Бленды:  
а — простейшая; б — с кольцевыми диафрагмами

бинации призм и зеркал, позволяющих изменять углы между оптическими осями двух или более ветвей в приборе без вращения изображения. С их помощью можно совершать обзор пространства, как это делается, например, в панораме, или компенсировать наклон объекта или его изображения [7].

Для борьбы с рассеянным излучением, создаваемым помехами, находящимися вне углового поля оптической системы, используются *бленды*, представляющие собой систему кольцевых, цилиндрических и конических диафрагм, располагаемых обычно перед объективом. Сравнительная оценка бленд различных типов и некоторые особенности их конструкции приведены в [53]. Простейшая бленда, представленная на рис. 3.12, а, обычно служит для предотвращения попадания на объектив излучения от источников помех  $\Pi$ , находящихся за пределами углового поля объектива  $2\omega$ . Длину  $l_6$  и диаметр  $D_6$  такой бленды определяют по формулам:

$$l_6 = D / (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \omega); \quad D_6 = D + 2l_6 \operatorname{tg} \omega,$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка объектива;  $\varphi$  — угол засветки.

Эффективность применения бленды во многом определяется коэффициентом ослабления  $K_0$  — отношением освещенности, создаваемой помехой на входном окне бленды, к освещенности рассеянного излучения на ее выходном окне. Для увеличения  $K_0$  внутри бленд размещают диафрагмы (рис. 3.12, б), расстояние между которыми выбирается так, чтобы любой луч прямой засветки после отражения от внутренних стенок бленды или диафрагм не попал во входной зрачок объектива. Методика расчета таких бленд была предложена Е. А. Гончаренко («Оптико-механическая промышленность». 1971. № 8. С. 25—27). Пути увеличения  $K_0$  рассмотрены в [53].

Длину бленды с диафрагмами рассчитывают по формуле  $l_6 = (D + 2a) / (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \omega)$ , где  $a$  — расстояние между границей углового поля объектива и линией, на которой лежат внутренние кромки диафрагм (см. рис. 3.12, б).

Для уменьшения вредного рассеянного излучения от боковых нерабочих поверхностей элементов оптической системы (линз, призм и т. п.) на эти поверхности наносят специальные поглощающие покрытия.

Условия работы многих СТЗ роботов таковы, что освещенность рабочей зоны и контролируемых объектов может изменяться в очень широких пределах. В то же время динамический диапазон чувствительности приемников излучения ограничен. Поэтому в ряде СТЗ в состав оптической системы необходимо вводить *устройство регулирования уровня оптического сигнала*.

Наиболее просто яркость источника излучения регулировать путем изменения питающего его напряжения или тока. Однако при этом изменяется спектральный состав излучения, что, как правило, нежелательно, а кроме того, схемы управления напряжением питания источников часто конструктивно сложны.

Другим способом изменения амплитуды потока излучения, поступающего на приемник, является применение жалюзи с механическим или электромеханическим приводом, нейтральных светофильтров, жидкокристаллических затворов.

Часто в СТЗ используется регулируемая диафрагма с механическим приводом, дополняемая иногда нейтральным светофильтром. Уменьшая диаметр отверстия диафрагмы, удается ослабить поток примерно в 100 раз.

Для сохранения работоспособности СТЗ, и в первую очередь приемника, при попадании в их угловое поле очень ярких помех используют также заслонки и шторы, перекрывающие все поле зрения видеосенсора или часть его, а также электрические цепи, отключающие питание приемника или весь электронный тракт на время действия такой помехи. Иногда для подавления бликов и рассеянного помехового излучения применяют поляризационные фильтры.

**Элементы защиты передающих и приемных оптических схем.** В процессе эксплуатации СТЗ робота ее передающие и приемные оптические системы подвергаются воздействию окружающей среды (пыли, металлической стружки, паров агрессивных веществ, брызг расплавленного металла и т. п.). В результате такого воздействия возможно быстрое ухудшение характеристик дорогостоящих оптических систем, выход их из строя. В этой связи в СТЗ используют специальные средства защиты оптических систем.

Защита от пыли осуществляется путем наддува осушенным сжатым чистым воздухом или инертным газом (азот) резервуара, размещаемого на входе оптической системы. Используется также периодическая автоматическая очистка защитных стекол специальными щетками — «дворниками».

Защита от крупных частиц (стружки, брызг) осуществляется, например, с помощью механических затворов, обеспечивающих режим кратковременных засветок. Схема такого устройства для

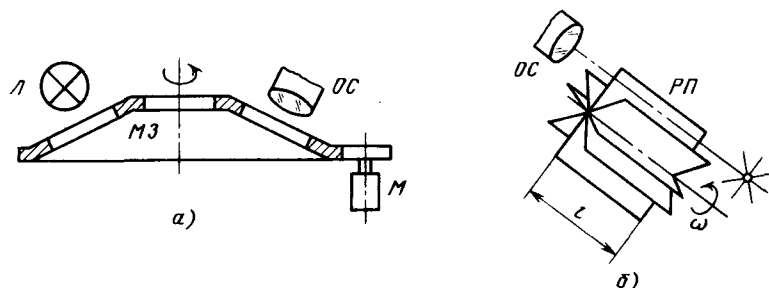


Рис. 3.13. Защитные устройства:

а — о механическом затвором; б — о роторным поглотителем РР

защиты оптической системы ОС (рис. 3.13, а) содержит импульсную лампу Л, механический затвор МЗ, приводимый во вращение электродвигателем М. Для защиты от направленных потоков паров и брызг металла, мелких частиц применяют защитные пластинчатые роторные поглотители (отражатели) (рис. 3.13, б), угловая скорость которых должна удовлетворять условию  $\omega \gg 2\pi v/(ln)$ , где  $v$  — линейная скорость потока частиц;  $l$  — длина пластин поглотителя;  $n$  — число пластин.

Наиболее простым средством защиты оптических систем являются сменные защитные стекла. Однако при их использовании уменьшается время наработки СТЗ без технического обслуживания, так как требуется достаточно частая смена этих стекол. Такого недостатка лишено устройство защиты оптических систем с помощью прозрачной пленки с автоматическим механизмом ее перемотки.

#### 3.4. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОННОГО ТРАКТА СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

Носителями видеoinформации в СТЗ, как правило, являются аналоговые сигналы, преобразуемые затем в дискретные (цифровые) сигналы, обработка которых осуществляется аппаратными («жесткая» логика), программными (универсальные или специализированные микропроцессоры и ЭВМ) или аппаратно-программными (сочетание «жесткой» логики и ЭВМ) средствами. Соответственно электронные узлы СТЗ, как и любого другого электронного устройства, разделяют: а) на аналоговые, в которых информация содержится в принимающих непрерывный ряд значений силе тока, напряжении или фазе сигнала; б) цифровые (ключевые), в которых информация заключается в дискретных значениях силы тока или напряжения; в) аналого-цифровые или цифроаналоговые, в которых одновременно используются обе формы представления информации (цифровая и аналоговая).

Так как электронный тракт СТЗ роботов, как правило, достаточно сложная система, то для его реализации преимущественно используют интегральные микросхемы (ИМС).

Основные системные функции, выполняемые электронными узлами для следующих четырех типовых структур электронного тракта СТЗ: а) с непосредственным «жестким» преобразованием; б) с «жесткой» логикой; в) с «адаптивной» логикой; г) программно-управляемых, указаны в табл. 3.8, в которой опущены сведения о вспомогательных узлах электронного тракта (схемах формирования и стабилизации электропитания, развертки для электронно-лучевых приемников изображения и т. п.).

Независимо от способа преобразования и обработки сигналов электронный тракт СТЗ роботов обычно осуществляет выборку и усиление сигналов, снимаемых с приемника излучения, а также формирование управляющих сигналов, поступающих в исполнительные устройства робота или в его устройство управления. В зависимости от типа используемых приемников, выбора способа преобразования сигналов и их обработки, сложности решаемых задач электронный тракт СТЗ роботов имеет различную структуру.

Цифровые сигналы, поступающие от АЦП, в электронном тракте СТЗ обрабатываются устройствами, построенными на базе цифровых ИМС.

Цифровые ИМС имеют на входах и выходах одно из двух возможных состояний и выполняются на основе элементарных транзисторных ключей, ТТЛ, ЭСЛ и комплементарной логики на МОП-транзисторах (КМОП). Существуют также другие семейства логических элементов (инжекционные, на МОП-транзисторах с Р- или N-каналом и т. п.). Различают ИМС с «положительной» и «отрицательной» логикой.

Основными параметрами логических элементов являются:

логические уровни «0» — значения низкого уровня напряжения для «положительной» логики или значения высокого уровня для «отрицательной» логики на входе или выходе ИМС; логические уровни «1» — значения высокого уровня напряжения для «положительной» логики или значения низкого уровня напряжения для «отрицательной» логики;

время включения и выключения;

потребляемая мощность (напряжение и ток питания).

Связь между цифровыми схемами, выполненными на цифровых ИМС различного типа, например на ИМС ТТЛ и ЭСЛ, осуществляется с помощью специальных переходных схем — преобразователей логических уровней [28].

Сущность цифровых преобразователей заключается в получении выходной информации по заданной входной. Такое непосредственное преобразование осуществляется средствами комбинационной логики, когда выходная информация является результатом логических (арифметических) операций над входной. Перечень типовых комбинационных элементов и выполняемые ими функции указаны в табл. 3.9.

Основные системные функции узлов электронного тракта СТЗ

Таблица 3.8

| Системные функции  | Электронные узлы (типовые средства реализации функций)                             | Пример исполнения (микросхема)  | Вид сигнала |          |             | Тип системы                  |                     |                        |                        |
|--|--|---|-------------|----------|-------------|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
|  |  |   | входной     | выходной | управляющий | с «жестким» преобразователем | с «жесткой» логикой | с «адаптивной» логикой | программно-управляемая |
| Последовательный опрос приемников излучения  | Мультиплексоры аналоговых сигналов<br>Коммутаторы или ключи                        | K1104KN1<br>590KN1, ..., 590KN7   | A           | A        | Ц           | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Запоминание изменяющихся аналоговых сигналов на время преобразования, коммутации и т. п. | Схемы выборки-хранения   | —   | A           | A        | Ц           | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Усиление аналоговых сигналов   | Линейные (операционные, дифференциальные) усилители                                | 140УД1<br>140УД20<br>153УД1, ..., 153УД6<br>154УД1, ..., 154УД3<br>574УД1<br>544УД1 | A           | A        | —<br>(Ц)    | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Сравнение аналоговых сигналов между собой или с опорным эталонным сигналом               | Компараторы  | 521СА3, 521СА4  | A           | Ц        | (Ц)         | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Преобразование аналогового сигнала в цифровой код  | Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)   | 572ПВ1А, Б<br>572ПВ2, 1113ПВ1, 1107ПВ1  | A           | Ц        | (Ц)         | +                            | +                   | +                      | +                      |
| «Жесткие» логические преобразования логических (цифровых) сигналов, кодов                | Логические элементы типа И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и т. п.<br>Многofункциональные | Серия 155, 133, 555, 564 и т. п.<br>1500ЛП7   | Ц           | Ц        |             | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Преобразование цифровых кодов в аналоговые сигналы                                       | Масштабные<br>Цифро-аналоговые логические матрицы (ЦЛАМ)                           | 134ЛП3, 164ЛП3<br>566ЛП1, 2<br>582ИК41, 47<br>583ВУ1                                |             |          | (Ц)         |                              |                     |                        |                        |
| Преобразование цифровых уровней логических (цифровых) сигналов                           | Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)  | 572ПА1А, В<br>594ПА1<br>1108ПА1А, Б   | Ц           | A        | (Ц)         | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Преобразование позиционного цифрового кода в унитарный цифровой код                      | ЭСЛ-ТТЛ<br>ТТЛ-ЭСЛ<br>КМДП-ТТЛ<br>ТТЛ-КМДП   | K500ПУ125<br>K500ПУ124<br>564ПУ1<br>K155ЛН5   | Ц           | Ц        | —           | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Преобразование унитарного цифрового кода в позиционный                                   | Дешифратор (используется также для реализации произвольной функции алгебры логики) | K155ИД3   | Ц           | Ц        | (Ц)         | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Преобразование унитарного цифрового кода в позиционный                                   | Шифратор   | —   | Ц           | Ц        | (Ц)         | +                            | +                   | +                      | +                      |
| Передача цифрового сигнала с одного из своих входов на один выход                        | Мультиплексор  | K155КП7   | Ц           | Ц        | (Ц)         | —                            | +                   | +                      | +                      |
| Передача цифрового сигнала с одного входа на один из своих выходов                       | Селектор (демультиплексор)   | 564КП2  | Ц           | Ц        | (Ц)         | —                            | +                   | +                      | +                      |
| Арифметическое суммирование кодов чисел  | Сумматоры (одноразрядные, многоразрядные)  | K155ИМ1   | Ц           | Ц        | (Ц)         | —                            | +                   | +                      | +                      |
| Выполнение операции счета  | Счетчик  | K155ТМ2<br>K155ТВ2<br>K155ИЕ7   | Ц           | Ц        | (Ц)         | —                            | +                   | +                      | +                      |
| Ввод, хранение, преобразование и выдача цифрового кода                                   | Регистр  | K155ИР1   | Ц           | Ц        | Ц           | —                            | +                   | +                      | +                      |

| Системные функции   | Электронные узлы ( типовые средства реализации функций)  | Пример исполнения (микросхема)                 | Вид сигнала |          |             | Тип системы         |                        |                     |                 |               |
|---|--|--|-------------|----------|-------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------|---------------|
|   |  |  | входной     | выходной | управляющий | с «жесткой» логикой | с «адаптивной» логикой | с «жесткой» логикой | программируемый | универсальный |
| Выполнение арифметических и логических операций над цифровыми кодами (словами) в зависимости от управляющего (слова) кода | Арифметические логические устройства (АЛУ)   | K155ИПЗ  | Ц           | Ц        | Ц           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |
|   | Запоминающие устройства (с последовательной и произвольной выборкой, постоянные, оперативные, регистрирующие, ассоциативные) | 565РУ5<br>564РУ2<br>586РЕ1<br>155РЕ3<br>505РР4 | Ц           | Ц        | Ц           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |
|   | Генератор синхросигналов   | 145ГГ1<br>580ГФ24                              | Ц           | Ц        | —           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |
|   | Интерфейс ввода-вывода   | 145ИУ8<br>145ВВ3-2<br>536ИК4                   | Ц           | Ц        | Ц           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |
| Синхронизация работы логических устройств во времени  | Ввод-вывод цифровой информации в/из микропроцессора, ЭВМ   | 580ИК80<br>145ИП15<br>1801ВЕ1                  | Ц           | Ц        | Ц           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |
|   | Преобразование цифровой информации под управлением программы (по заданному алгоритму)  | Микропроцессор<br>МикроЭВМ                     | Ц           | Ц        | Ц           | +                   | +                      | +                   | +               | +             |

Условные обозначения: А — аналоговый сигнал; Ц — цифровой сигнал; (Ц) — управляющий сигнал только цифровой или он отсутствует.

Типовые комбинационные логические схемы  
Таблица 3.9

| Условные обозначения  |                  | Функция          |                  |                  | Наименование                                |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---|
| в зарубежных изданиях | по ГОСТ 2.743-82 | $x_1$            | $x_2$            | $y$              |   |
|                       |                  | 0<br>1           |                  | 0<br>1           | Повторитель                                 |
|                       |                  | 0<br>1           |                  | 1<br>0           | Инвертор<br>НЕ                              |
|                       |                  | 0<br>0<br>1<br>1 | 0<br>1<br>0<br>1 | 0<br>0<br>0<br>1 | Конъюнктор<br>И                             |
|                       |                  | 0<br>0<br>1<br>1 | 0<br>1<br>0<br>1 | 1<br>1<br>1<br>0 | Элемент<br>Шеффера<br>И-НЕ                  |
|                       |                  | 0<br>0<br>1<br>1 | 0<br>1<br>0<br>1 | 0<br>1<br>1<br>1 | Дизъюнктор<br>ИЛИ                           |
|                       |                  | 0<br>0<br>1<br>1 | 0<br>1<br>0<br>1 | 1<br>0<br>0<br>0 | Элемент<br>Пирса<br>ИЛИ-НЕ                  |
|                       |                  | 0<br>0<br>1<br>1 | 0<br>1<br>0<br>1 | 0<br>1<br>1<br>0 | Исключающее<br>ИЛИ                          |
|                       | —                | —                | —                | —                | Дешифратор<br>(шифратор)                    |
|                       | —                | —                | —                | —                | Кодовый<br>преобразователь                  |
|                       | —                | —                | —                | —                | Одноразрядный<br>сумматор<br>комбинационный |
|                       | —                | —                | —                | —                | Полусумматор                                |



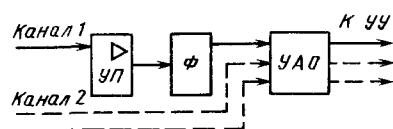


Рис. 3.14. Структурная схема электронного аналогового тракта:

УП — усилитель-преобразователь; Ф — фильтр; УАО — устройство обработки аналоговых сигналов (сумматор, вычитатель, умножитель и тому подобные функциональные устройства); УУ — устройство управления

Основные принципы построения электронного тракта СТЗ роботов рассмотрены на примере перечисленных выше типовых структур.

**Электронный тракт СТЗ с непосредственным «жестким» преобразованием.** Устройства обработки видеoinформации с непосредственным «жестким» преобразованием осуществляют формирование однозначной функциональной зависимости между входными сигналами, полученными с приемников, и выходными сигналами, поступающими на исполнительные или управляющие устройства робота. Устройства обработки такого типа могут содержать только аналоговый электронный тракт или аналоговый и цифровой тракты.

Простейшая типовая структурная схема аналогового электронного тракта приведена на рис. 3.14. Такой тракт выполняется на аналоговых ИМС, которые предназначены для генерирования, усиления, преобразования и формирования непрерывных и импульсных электрических сигналов. По приведенной схеме может быть, например, построен следящий сервопривод робота с фотодатчиком.

Основой для построения большинства устройств преобразования аналоговых видеосигналов (в данном случае: усилителя-преобразователя УП; фильтра Ф; устройства аналоговой обработки УАО) служат дифференциальные операционные усилители (ОУ). Они обеспечивают усиление и преобразование постоянного и переменного напряжений положительной и отрицательной полярности. Если на входы ОУ подать сигналы  $U_{вх}^+$ ,  $U_{вх}^-$ , то сигнал на выходе будет  $U_{вых} = K_{уу} (U_{вх}^+ - U_{вх}^-)$ , где  $K_{уу}$  — коэффициент усиления напряжения.

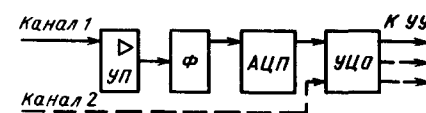
К статическим параметрам ОУ относятся следующие (здесь и ниже наименования основных параметров ИМС приведены по ГОСТ 19480—74):  $I_{вх}$  — входной ток;  $\Delta I_{вх}$  — разность входных токов;  $U_{см}$  — напряжение смещения нулевого уровня на входе ОУ, при котором напряжение на выходе равно нулю;  $I_{вых\ max}$ ,  $U_{вых\ max}$  — максимальные выходные ток и напряжение;  $K_{у0}$  — коэффициент усиления на нулевой частоте при разомкнутой цепи обратной связи;  $K_{ос. сф}$  — коэффициент ослабления синфазного сигнала;  $U_{ип}$  — напряжение питания;  $I_{ип}$  — потребляемый ток.

Основные динамические параметры ОУ:  $f_{срв}$  — частота среза, на которой  $K_y(f) = 0$ ;  $f_1$  — частота, на которой  $K_y(f) = 1$ ;  $v_{вых\ max}$  — максимальная скорость нарастания напряжения на выходе.

Преимущество дифференциального ОУ перед усилителем с односторонним входом заключается в том, что в нем резко ослабляются

Рис. 3.15. Простейшая типовая структурная схема цифрового электронного тракта:

АЦП — аналого-цифровой преобразователь; УЦО — устройство цифровой обработки



синфазные помехи  $U_{п.}$ . Для усилителя с односторонним входом  $U_{п. вых} = K_{уу} U_{п. вх}$ ; для ОУ  $U_{п. вых} = K_{уу сф} U_{п. вх}$ , причем  $K_{ос. сф} = K_{уу} / K_{уу сф} \gg 1$ . Коэффициенты усиления по напряжению  $K_{уу}$  и току  $K_{уI}$  связаны с коэффициентом по мощности  $K_{уP} = P_{вых} / P_{вх} = K_{уу} K_{уI}$ . Если коэффициенты выражены в децибелах, то соответствующие соотношения имеют вид:

$$K_{уу} = 20 \lg (U_{вых} / U_{вх}) = 20 \lg K_{уу};$$

$$K_{уI} = 20 \lg (I_{вых} / I_{вх}) = 20 \lg K_{уI};$$

$$K_{уP} = 10 \lg (P_{вых} / P_{вх}).$$

Напряжение шума усилителя, приведенное ко входу, определяется его полосой пропускания  $\Delta f$ , сопротивлением источника сигнала  $R_{и}$ , постоянной Больцмана  $k$  и температурой  $T$ , а также безразмерным фактором шума  $F$ :

$$U_{ш. вых} = F \sqrt{4kT \Delta f R_{и}}.$$

Если  $F$  выражено в децибелах по мощности, то перевод в относительные единицы проводится по формуле  $F = 10^{F_{дБ}/10}$ . При нормальной температуре  $kT = 0,4 \cdot 10^{-20}$  Вт/Гц.

Необходимые коэффициенты прямой передачи напряжения или тока со входа на выход ОУ получают путем использования соответствующих обратных связей, реализуемых включением электронных компонентов между входами и выходами усилителя. Введение отрицательной обратной связи позволяет расширить полосу пропускания схемы с ОУ, ослабить нелинейные искажения и шумы. Включение частотно-зависимых элементов в цепь обратной связи ОУ позволяет строить *фильтры* различного назначения. *Нелинейные функциональные преобразования* реализуют при включении нелинейных элементов в цепь обратной связи ОУ [28].

Аналого-цифровой электронный тракт СТЗ (рис. 3.15) реализует функцию преобразования цифровых (релейных) видеосигналов. Аналоговая часть данного тракта подобна рассмотренной выше. Преобразование аналогового видеосигнала в цифровой осуществляется аналого-цифровым преобразователем.

Простейшим преобразователем такого типа является *компаратор* — схема сравнения аналоговых сигналов, например, входного и фиксированного опорного напряжения  $U_{оп}$ . Входные сигналы компаратора являются непрерывными функциями времени, а выходные — дискретными, принимающими одно из двух возможных состояний: «0» (если  $U_{вх} < U_{оп}$ ) и «1» (если  $U_{вх} \geq U_{оп}$ ). Основными параметрами компараторов являются: пороговый ток  $I_{вх. ср}$  или напряжение срабатывания  $U_{вх. ср}$ ; ширина зоны не-

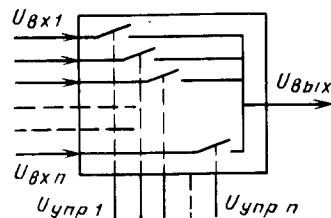


Рис. 3.16. Обобщенная функциональная схема цифрового мультиплексора:  $U_{вх1} - U_{вхn}$  — входные сигналы;  $U_{упр1} - U_{упрn}$  — управляющие сигналы;  $U_{вых}$  — выходной сигнал

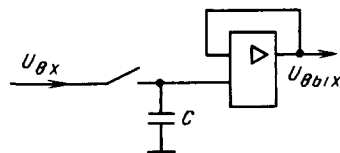


Рис. 3.17. Функциональная схема устройства выборки-хранения аналоговых сигналов

чувствительности  $\Delta I$  ( $\Delta U$ ); время переключения из нулевого состояния в единичное  $t_{01}$ ; напряжение смещения нулевого уровня  $U_{см}$ . Например, для компараторов 521СА3, 521СА4 соответственно  $I_{вх. ср} = 100$  нА;  $t_{01} = 300$  нс и  $I_{вх ср} = 2$  мкА,  $t_{01} = 5$  нс,  $U_{см} = 4$  мВ.

Практически во всех случаях использования компараторов необходимо исключить многократные срабатывания, т. е. переключения 0—1, 1—0, вызванные наложением помех на аналоговые сигналы. Расширением зоны нечувствительности компаратора на значение  $\Delta U$  можно исключить многократные изменения его выходного состояния в окрестности точки неравенства  $U_{вх} = U_{оп}$ .

На основе компараторов строят *аналого-цифровые преобразователи* (АЦП), решающие задачу поиска однозначного соответствия аналоговому сигналу, например, видеосигналу цифрового кода. В настоящее время разработаны различные принципы построения АЦП [28, 50].

В ряде случаев возникает задача обратного преобразования цифрового кода в аналоговый сигнал. В электронном тракте СТЗ роботов эту задачу решают *цифроаналоговые преобразователи* (ЦАП).

К числу основных параметров АЦП и ЦАП относят: разрядность  $n$  — бит; напряжение шкалы  $U_{шк}$ ; опорное напряжение  $U_{оп}$ ; ошибку квантования, равную  $\pm(1/2) U_{мзр}$ , где  $U_{мзр}$  — значение приращения выходного напряжения при изменении 0—1 младшего значащего разряда цифрового кода;  $U_{мзр} = U_{оп}/2$ ; дифференциальную нелинейность преобразования; время преобразования; напряжения источников питания; потребляемый ток; уровни входных цифровых сигналов.

Чтобы исключить необходимость построения ряда однотипных аналоговых или цифровых электронных трактов обработки видеoinформации, поступающей по различным каналам, используют *аналоговые коммутаторы, или мультиплексоры*. Обобщенная схема мультиплексора приведена на рис. 3.16. Она содержит  $n$  входных аналоговых каналов и один выходной аналоговый канал. Управ-

ление каналами мультиплексора осуществляется с помощью цифровых сигналов, поступающих на управляющие электроды мультиплексора.

Для коммутации аналоговых сигналов в мультиплексорах используют *аналоговые ключи*, выполняемые на полевых МОП-транзисторах, на КМОП-транзисторах, на полевых транзисторах с  $P-N$ -переходом, а также на биполярных транзисторах.

К числу основных параметров мультиплексоров аналоговых сигналов относят: число входных сигналов; сопротивление ключа в открытом и закрытом состояниях; паразитную емкость закрытого ключа; быстродействие и ряд других.

Промышленность выпускает широкую номенклатуру ИМС аналоговых ключей и мультиплексоров, которые используются в СТЗ для обработки аналоговых видеосигналов, поступающих по параллельным каналам. Число каналов в мультиплексоре может достигать нескольких сотен, но максимальное значение определяется необходимой частотой опроса фотоприемных элементов, которую выбирают исходя из максимальной частотной составляющей, содержащейся в аналоговом видеосигнале. Коммутаторы аналоговых сигналов с большим числом каналов строят на основе многоступенчатых схем [28].

Для запоминания аналоговых видеосигналов на время преобразования, коммутации и других операций используют *схемы выборки-хранения* (СВХ). Элементом памяти схемы выборки-хранения является конденсатор  $C$ , подключаемый на время выборки к источнику сигнала (рис. 3.17).

Основные параметры СВХ: время выборки  $t_{выб}$ , апертурное время  $t_{ап}$  и максимальное время хранения  $t_{хр. max}$ . Время выборки ограничено снизу постоянной времени цепи заряда и требуемой точностью запоминания, а сверху — скоростью изменения запоминаемого аналогового сигнала. Сопротивление цепи заряда  $R_{зар} = R_{вых} + R_{о. кл}$ , где  $R_{вых}$  — выходное сопротивление источника сигнала;  $R_{о. кл}$  — сопротивление открытого ключа. На практике время выборки несколько меньше расчетного за счет нелинейности режима источника сигнала в начальный момент заряда. Когда СВХ переходит в режим хранения, некоторая часть заряда конденсатора  $C$  утекает через межэлектродную емкость ключа. Связанное с этой утечкой изменение напряжения на конденсаторе называют погрешностью сдвига уровня при переходе в режим хранения. С момента подачи команды «Хранение» до размыкания ключа проходит некоторое время, называемое апертурным. В течение апертурного времени амплитуда запоминаемого напряжения не определена, поэтому в зависимости от требуемой погрешности  $\delta$  запоминания и максимальной частоты  $f_{max}$  переключаемого сигнала на апертурное время  $t_{ап}$  накладывают ограничения. Например,  $f_{max} = 10$  Гц,  $\delta = 0,4\%$ ,  $t_{ап} \leq \leq 10$  мкс. Максимальная длительность времени хранения сигнала ограничивается сверху и обусловлена разрядом конденса-

тора  $C$  вследствие дрейфа нуля усилителя, конечного значения входного сопротивления операционного усилителя, тока утечки ключа.

**Электронный тракт СТЗ с «жесткой» и «адаптивной» логикой.** Устройства обработки видеoinформации с «жесткой» логикой представляют собой аналоговые или цифровые схемы, алгоритм работы которых определяется конфигурацией схемных взаимосвязей и набором управляющих сигналов с «жестко» заданной временной последовательностью. Временная последовательность управляющих сигналов генерируется с помощью специальной схемы, реализующей последовательную логику, на вход которой поступают опорные синхросигналы (тактовые импульсы). Для реализации последовательной логики помимо комбинационных элементов необходимы элементы с памятью, которые реализуются на основе триггеров. Типовые триггерные схемы и выполняемые ими функции предоставлены в табл. 3.10, где приняты следующие условные обозначения:  $Q^*$  — сохраняется предыдущее состояние;  $\bar{Q}^*$  — состояние изменяется на противоположное; н/о — неопределенное состояние; ЗУ\* — возможны другие обозначения русской или латинской аббревиатурой, например, МП — микропроцессор, ЦПЭ — центральный процессорный элемент и т. п.;  $P_2$  — регистр;  $P_c$  — регистр сдвига;  $C_4$  — счетчик; ЗУ — запоминающее устройство.

«Жесткая» логика обработки видеoinформации может осуществляться как в режиме непосредственного преобразования в заданные интервалы времени, так и в режиме последовательной обработки, когда результат является функцией видеосигналов, зарегистрированных в текущий и предшествующий моменты времени.

Простейшая типовая схема электронного тракта СТЗ роботов с «жесткой» логикой реализуется при организации последовательной во времени обработки сигналов, поступающих от нескольких видеосенсоров.

«Адаптивная» логика работы электронного тракта СТЗ роботов реализуется при введении обратной связи, определяющей воздействия на алгоритм результата обработки видеoinформации в предшествующий момент времени. Наличие такой обратной связи позволяет существенно расширить функциональные возможности СТЗ, осуществлять адаптацию алгоритма обработки к изменяющимся условиям, например, к ориентации объекта, его удалению от рабочих органов робота и т. п.

Программно-управляемые СТЗ на базе универсальных и специализированных вычислительных средств. Наибольшая гибкость в выборе обработки видеoinформации, его адаптации к изменяющимся внешним условиям обеспечивается при построении электронного тракта СТЗ на основе универсальной или специализированной ЭВМ. В этом случае электронный тракт содержит специальные аппаратные и программные средства (интерфейсы)

Таблица 3.10

Типовые триггеры

| Асинхронные | Синхронные  |              | С двухступенчатой памятью | функция |       |             | обозначение |
|-------------|-------------|--------------|---------------------------|---------|-------|-------------|-------------|
|             | статические | динамические |                           | $x_1$   | $x_2$ | $y_1$       |             |
|             |             |              |                           | 0       | 0     | $Q^*$       | RS          |
|             |             |              |                           | 0       | 1     | 0           |             |
|             |             |              |                           | 1       | 0     | 1           |             |
|             |             |              |                           | 1       | 1     | н/о         |             |
|             | —           |              |                           | 0       | 0     | $Q^*$       | JK          |
|             |             |              |                           | 0       | 1     | 0           |             |
|             |             |              |                           | 1       | 0     | 1           |             |
|             |             |              |                           | 1       | 1     | $\bar{Q}^*$ |             |
|             | —           | —            |                           | 0       | 1     | $Q^*$       | T           |
|             |             |              |                           | 1       | 1     | $\bar{Q}^*$ |             |
| —           |             | —            | —                         |         |       |             | D           |
| —           |             |              |                           |         |       |             | DV          |
|             |             |              |                           |         |       |             |             |

для связи ЭВМ с видеосенсорами и исполнительными или управляющими устройствами робота [17, 45].

В электронных трактах СТЗ роботов хранение видеoinформации после ее преобразования в цифровую форму представления, а также наборов команд (программ), определяющих алгоритм функционирования узлов обработки видеoinформации, осущес-

Сравнительные характеристики ЭВМ и микропроцессоров

| Тип                              | Разрядность<br>машинного слова,<br>бит | Емкость ОЗУ,<br>М/слов | Максимальная<br>скорость выпол-<br>нения операций,<br>М операций/с |
|----------------------------------|--|------------------------|--|
| <i>Большие ЭВМ</i>               |  |                        |  |
| СуперЭВМ                         | 64 ... 128                             | 4 ... 64               | 25 ... 500   |
| ЕС ЭВМ                           | 32 ... 72                              | 0,032 ... 16,0         | 0,010 ... 10,0   |
| <i>Мини- и микроЭВМ</i>          |  |                        |  |
| СМ ЭВМ                           | 8 ... 32                               | 0,064 ... 1,0          | 0,15 ... 0,5   |
| Электроника                      | 8 ... 16                               | 0,032 ... 1,0          | 0,25 ... 0,5   |
| <i>Микропроцессоры</i>           |  |                        |  |
| K580                             | 8                                      | 0,064                  | 0,5  |
| K1810                            | 16                                     | 1,0                    | 2,0  |
| <i>Однокристалльные микроЭВМ</i> |  |                        |  |
| K1814                            | 4                                      | $0,064 \cdot 10^{-3}$  | 0,025  |

ствляется в оперативных запоминающих устройствах (ОЗУ), постоянных (ПЗУ), программируемых и репрограммируемых ЗУ (ППЗУ и РПЗУ), в долговременных внешних ЗУ (ДЗУ). Кратковременное хранение информации, например, на период выполнения одного или нескольких циклов работы СТЗ осуществляется в регистрах. Несколько регистров общего назначения (РОН) образуют сверхоперативное запоминающее устройство (СОЗУ). В виде ИМС средней степени интеграции выпускаются универсальные *регистровые схемы*, позволяющие осуществлять: последовательную и параллельную запись информации; сдвиг информации вправо и влево; логические действия над записанной в регистр информацией [17, 28].

Регистры и ОЗУ являются энергозависимыми устройствами. При отключении электропитания информация, записанная в ОЗУ, теряется. ПЗУ сохраняют информацию при отключении питания, поэтому их используют для хранения не видеоинформации, а программного обеспечения СТЗ. ПЗУ программируются путем введения или удаления токопроводящих перемычек.

Масочные ПЗУ, например микросхемы серий 145, 505, 586, 1801, 1809 и др., используются и в тех случаях, когда требуется достаточно много микросхем с идентичной «прошивкой», например, для хранения информации о микрокомандах микропроцессора, набора символов печатающего устройства или дисплея, интерпретатора диалогового языка. Программирование масочных ПЗУ осуществляется путем создания матрицы токопроводящих перемычек с помощью заказных фотошаблонов (масок).

Для записи информации в универсальных и специализированных вычислительных устройствах используются электрически программируемые ПЗУ—ППЗУ, которые выполняются, например, на основе транзисторных матриц, содержащих плавкие перемычки. В процессе программирования соответствующие плавкие перемычки пережигаются импульсами тока. На аналогичных принципах строятся *программируемые логические матрицы (ПЛМ)* — специализированные ПЗУ для хранения информации о логических операциях над входными операндами. Схемы ПЛМ содержат две матрицы: первая хранит информацию о логических произведениях, а вторая — о логических суммах.

РПЗУ допускают многократное повторение циклов «запись—стирание» и выполняются в основном на структурах «металл—нитрид—оксид—полупроводник» (МНОП), состояние которых можно изменять с помощью импульсов напряжения или путем облучения ультрафиолетовым светом.

На первом этапе развития программно-управляемых СТЗ роботов они были ориентированы на использование достаточно высокопроизводительных больших ЭВМ. Основной тенденцией развития робототехнических систем управления на современном этапе является переход от централизованных систем, реализованных на базе большой ЭВМ, к децентрализованным, к использова-

нию автономных управляющих устройств на все более низких уровнях управления. Автоматизация управления на нижних уровнях повышает надежность и живучесть систем робота. Известно, что решение задач на ЭВМ сопряжено с минимальными затратами, если она имеет наименьшую производительность из ряда ЭВМ, удовлетворяющих заданным условиям. Широкая номенклатура *микроЭВМ, микроконтроллеров и микропроцессоров*, выпускаемых отечественной промышленностью (табл. 3.11), позволяет осуществить выбор вычислительных средств с минимальной производительностью, удовлетворяющих требованиям к СТЗ [17, 28, 45].

Ввод видеоинформации в ЭВМ осуществляется тремя основными способами: *по прерываниям*, когда ЭВМ прерывает процесс выполнения программы для ввода видеоинформации по инициативе специального устройства, например таймера, через заданные промежутки времени; при исполнении специальной команды или группы команд в процессе выполнения программы — *программно*; в результате *прямого доступа к памяти ЭВМ*.

Средства самоконтроля, самодиагностирования, резервирования и программной реконфигурации. Сложность структуры СТЗ роботов в сочетании с жесткими требованиями к надежности (времени безотказной работы, времени поиска неисправности и ее устранения) требует оснащения этой системы специальными средствами самоконтроля, самодиагностирования, резервирования и программной реконфигурации [28].

Средства самоконтроля фиксируют наличие неисправности или недопустимого отклонения какого-либо параметра характеристики

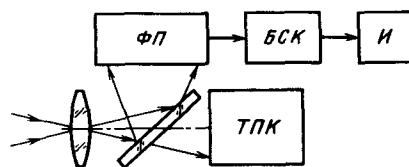


Рис. 3.18. Схема самоконтроля среднего уровня освещенности

отдельных узлов или подсистемы в целом. Самоконтроль оптомеханической подсистемы осуществляется с помощью датчиков

положения подвижных элементов или датчиков состояния оптических элементов (коэффициенты отражения, пропускания и т. п.), а также путем регистрации тестовых объектов (эталонных изображений).

Сигналы, снимаемые с датчиков, анализируются с помощью соответствующих аналоговых и цифровых схем. Результаты восприятия эталонных изображений оцениваются аппаратными или программными средствами. На рис. 3.18 приведена схема самоконтроля среднего уровня освещенности поля зрения телевизионной передающей камеры ТПК с помощью приемника излучения ФП. Соответствующий анализ результатов самоконтроля выполняет блок БСК, выдающий сигналы на блок индикации И: ОСВЕТИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА (НЕ)ИСПРАВНА, ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (НЕ)ИСПРАВНА.

Наибольшее количество отказов и сбоев в СТЗ приходится на электронные узлы, которые содержат множество элементов. Самоконтроль аналоговых узлов и цепи электропитания СТЗ осуществляется путем сравнения уровней напряжения и силы тока с эталонными (номинальными) значениями. Например, самоконтроль электронных узлов обработки видеoinформации основан на контроле четности. Результат самоконтроля отображается элементами индикации на панели самоконтроля инженерного пульта управления СТЗ, одновременно осуществляется вызов оператора-наладчика звуковыми и оптическими сигналами. В необходимых случаях работа СТЗ и работа принудительно прерывается.

Средства самодиагностирования выявляют причину неисправности, что позволяет существенно сократить время восстановления работоспособности СТЗ. Различают аппаратные встроенные блоки анализа и генерации тест-сигналов и программные средства самодиагностирования.

Для осуществления программного самоконтроля, самодиагностирования СТЗ оснащается специальными служебными программами. Наиболее удобным способом является постоянное размещение таких программ в ПЗУ вместе с рабочими программами. Аппаратные затраты при этом, как правило, невелики: один-два кристалла ПЗУ. Если такое решение нецелесообразно, например, из соображений экономии адресного пространства ЗУ или ограничений на потребляемую мощность, то используют принцип «наложения» служебной программы на рабочие программы. Недостатком такого способа является то, что область памяти, занятая служебной программой, не проверяется.

Если некоторые модули рабочей программы выполнены в виде подпрограмм, то программа самодиагностирования может обращаться к ним, что экономит объем программной памяти. Наиболее распространенным примером является использование подпрограммы управления вводом-выводом основной программы.

Для более точной локализации и устранения неисправностей в СТЗ, как правило, приходится использовать дополнительную аппаратуру: логический анализатор, сигнатурный анализатор, осциллограф и т. п. В этом случае многократное непрерывное исполнение любой из подпрограмм программы самодиагностирования дает необходимые контрольные сигналы.

Резервирование осуществляется введением в структуру СТЗ функционально избыточных элементов и узлов: включенных постоянно (нагруженный резерв); включаемых оператором-наладчиком или автоматически (ненагруженный резерв) [28]. Резервирование осуществляется также мажорированием функциональных устройств: ОЗУ, ПЗУ, центрального процессора и т. д. При мажорировании (голосовании) результат выполнения любой операции формируется по правилу:  $m$  из  $n$ , например, два из трех. Здесь  $n$  — кратность резервирования, причем, как правило, нечетная. Мажорирование обеспечивает непрерывную работу СТЗ при возникновении отказов отдельных модулей или их узлов, однако требует резкого увеличения аппаратных затрат при умеренном увеличении надежности.

Средства программной реконфигурации позволяют осуществлять программно-управляемое отключение неисправных и включение резервных блоков и элементов СТЗ по результатам самоконтроля и самодиагностирования, а также повторять алгоритмические процедуры при фиксации сбоя в процессе работы СТЗ.

Операции самоконтроля, самодиагностирования и программной реконфигурации осуществляются одновременно с выполнением рабочих операций или в специально выделенные интервалы времени. Например, наблюдение и анализ характеристик изображения тестовых объектов, как правило, требуют выделения соответствующего временного интервала в цикле работы СТЗ.

## ГЛАВА 4

### ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

#### 4.1. КООРДИНАТНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Координатными (координатно-чувствительными, позиционно-чувствительными) приемниками излучения называются приемники, в которых выходной сигнал зависит от местоположения облученного участка светочувствительной поверхности [12, 52]. Кратко рассмотрим некоторые особенности основных типов таких аналоговых приемников, важные с точки зрения использования их в СТЗ роботов.

*Координатные фоторезисторы* (фотопотенциометры) представляют собой тонкопленочные многослойные структуры, которые для получения необходимого функционального преобразования имеют профилированный резистивный слой. Длина чувствительного слоя фотопотенциометра может достигать нескольких десятков миллиметров при разрешающей способности в десятки микрометров. Современные фотопотенциометры имеют недостаточную временную и температурную стабильность, хотя и обладают достаточно высокой надежностью и являются технологичными устройствами.

*Координатный фотоприемник с продольным фотозффектом* состоит из  $P-N$ -перехода, образованного низкоомной подложкой  $P$ -типа проводимости и высокоомным слоем  $N$ -типа проводимости. Координатная характеристика такого фотоприемника представляет собой зависимость сигнала на выходе от отклонения положения светового зонда (изображения) от центра фоточувствительной площадки прибора. Ее линейность определяется отношением отклонения на характеристике от линейного участка к максимальному сигналу в данной точке и составляет несколько процентов.

Имеются двухкоординатные фотоприемники с продольным фотозффектом, однако линейность характеристики таких приборов уступает линейности однокоординатных.

*Координатные фотоприемники, работающие на поперечном фотозффекте*, называются дифференциальными. Выходной сигнал такого фотоприемника, равный разности сигналов с фоточувствительных элементов, пропорционален смещению изображения относительно «нулевого» положения. К таким фотоприемникам относятся секторные или квадрантные фоторезисторы и фотодиоды. Важным параметром дифференциального фотоприемника является

размер зоны нечувствительности, определяемый возможностями современной технологии. Для большинства приемников такого типа протяженность зоны нечувствительности составляет десятки и даже сотни микрометров. Не менее важна и стабильность «нулевой» точки (дрейф нуля).

Крутизна координатной характеристики и стабильность нулевой точки зависят от режима работы приемника, например, для квадрантного фотодиода в фотодиодном режиме его работы (при наличии смещения от внешнего источника) дрейф нуля ниже и крутизна на порядок выше, чем в вентильном режиме (в отсутствие внешнего смещения).

*Координатный фотоприемник с радиальным электрическим полем* относится к приборам, принцип работы которых основан на использовании дрейфа носителей заряда. Ему свойственны большая крутизна координатной характеристики, высокая разрешающая способность (единицы и даже десятки доли микрометра) при небольшой протяженности линейной зоны координатной характеристики (до 1 мм). На базе таких приемников созданы развертывающие устройства, осуществляющие электронную развертку (сканирование) изображения, формируемого оптической системой на чувствительном слое приемника.

Общий недостаток рассмотренных фотоприемников заключается в зависимости координатной характеристики от размеров и формы светового зонда (изображения) и распределения освещенности в зонде. Для дифференциальных фотоприемников характерны дополнительные погрешности, вносимые неидентичностью отдельных элементов.

Для устранения первого недостатка часто используют схемы стабилизации параметров источников излучения, применяемых в СТЗ роботов, а также специальные корректирующие звенья, вводимые в устройства обработки сигналов.

*Сканистор* — это координатный развертывающий фоточувствительный прибор, сканирование изображения в котором осуществляется путем последовательного сравнения падений напряжения в каждом сечении фоточувствительного слоя (эмиттера) с напряжением на эквипотенциальном фоточувствительном слое (коллекторе). Схема замещения сканистора представляет собой набор ячеек «фотодиод—диод», включенных встречно. При подаче пилообразного напряжения осуществляется последовательное во времени считывание потенциального рельефа, соответствующего распределению освещенности вдоль сканистора.

Сканисторы с непрерывной  $P$ -областью имеют низкую разрешающую способность вследствие растекания возбуждаемых под воздействием излучения носителей заряда. В целях повышения разрешающей способности разработаны сканисторы с дискретной базовой областью, выполненные в виде двух линеек дискретных  $P$ -областей, сформированных на сплошных  $N$ -областях, разделенных изолирующей областью.

Таблица 4.1

Типовые параметры координатных аналоговых фотоприемников

| Тип фотоприемника                      | Фоточувствительная площадь, мм | Чувствительность, В/(мм·мВт) | Нелинейность координатной характеристики, % |
|--|--------------------------------|------------------------------|---|
| Фоторезистор (фотопотенциометр)        | 1×1 ... 10×10                  | 0,5 ... 1,0                  | 1 ... 5                                     |
| Разрезной (квадрантный) фотодиод       | 1×1 ... 10×10                  | 0,1 ... 0,5                  | 0,5 ... 5                                   |
| Фотоприемник с радиальным полем        | 2×2 ... 10×10                  | 0,5 ... 1,0                  | 2 ... 10                                    |
| Фотоприемник с продольным фотоэффектом | 2×2 ... 10×10                  | 1 ... 2                      | 2 ... 8                                     |
| Сканистор                              | 2×20 ... 10×50                 | 10 ... 50 лин/мм             | 5 ... 15                                    |

Имеются многострочные сканисторы, в которых реализуют принцип синхронного сканирования изображения одновременно вдоль всех строк.

Типовые параметры рассмотренных координатных аналоговых приемников излучения приведены в табл. 4.1.

#### 4.2. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Расширение функциональных возможностей видеосенсора в СТЗ роботов, получение информации с требуемой точностью и в необходимом объеме с минимумом аппаратных и программных затрат могут быть достигнуты в случае применения многоэлементных приемников излучения (МЭПИ), выполняемых на основе твердотельной или пленочной технологии. Эти фотоприемники характеризуются многими параметрами и характеристиками, используемыми для описания свойств одноэлементных фотоприемников. Однако специфика конструктивного исполнения обусловила и ряд новых параметров. Геометрическую (пространственную) разрешающую способность МЭПИ определяют межэлементное расстояние и шаг (расстояние между соседними фоточувствительными площадками и их центрами). Погрешности МЭПИ обусловлены нерегулярностью расположения элементов, разбросом чувствительности элементов и паразитными межэлементными связями.

Ниже кратко рассмотрены основные конструкции МЭПИ, детальным описаниям которых посвящены многочисленные публикации (см., например, [11, 14, 37, 52]).

Технологически освоенным фотоприемником, выполняемым на основе пленочной или твердотельной технологии, является *фоторезистивный МЭПИ* (ФР МЭПИ), содержащий матрицу фоторезисторов. В качестве материалов для выполнения ФР МЭПИ ис-

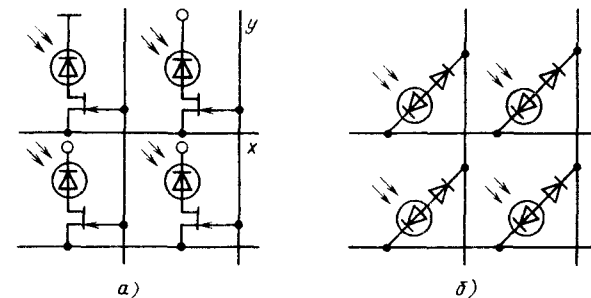


Рис. 4.1. Структура фотодиодных матриц с ключами:  
а — на полевых транзисторах; б — на диодах

пользуют PbS, PbSe, CdS, CdSe, что и определяет широкий спектральный диапазон их работы (0,4 ... 30 мкм). Структура ФР МЭПИ позволяет осуществлять несколько способов считывания сигналов с фоторезисторов: последовательный с применением одного канала передачи видеосигналов, параллельный с использованием нескольких каналов и произвольный, когда доступным для обращения является каждый элемент МЭПИ. Достоинством ФР МЭПИ является простота технологии его изготовления, недостатком — ограниченное количество фоточувствительных элементов из-за роста паразитных перекрестных связей. К недостаткам ФР МЭПИ следует отнести также эффект старения, низкие фоточувствительность и быстродействие.

Более перспективны *фотодиодные МЭПИ* (ФД МЭПИ), имеющие высокое быстродействие и сравнительно высокую чувствительность. Такие приборы изготавливают на основе технологии кремниевых интегральных схем. Наиболее распространены ФД МЭПИ с матричной структурой, представляющие собой матрицу фотоячеек, объединенных системой вертикальных и горизонтальных шин. Схемы считывания, реализующие последовательную, параллельную или произвольную выборку видеосигналов с каждого элемента МЭПИ, могут быть выполнены совместно с фотодиодной матрицей на одном кристалле или в виде отдельных устройств. В последнем случае с ростом числа фотодиодов в МЭПИ увеличивается число соединительных проводников, что снижает надежность работы фотоприемного устройства и приводит к возрастанию его стоимости.

В матричных ФД МЭПИ (рис. 4.1) в качестве ключевых элементов, развязывающих между собой фотодиоды, используют полевой транзистор (рис. 4.1, а) или диод (рис. 4.1, б). Для быстродействующих ФД МЭПИ ключевые развязывающие элементы выполняются на основе диодов с малыми емкостями, например в виде двухдиодной ключевой схемы.

Различают два режима работы ФД МЭПИ: 1) регистрации мгновенных значений фототока, когда сигнал пропорционален уровню



освещенности фотодиода в каждый момент времени; 2) накопления заряда, когда сигнал пропорционален экспозиции (интегралу от освещенности по времени) за интервал времени, называемый временем интегрирования или накопления. Второй режим позволяет получить достаточно большие уровни сигнала даже при малых уровнях освещенности. Следует отметить, что по сравнению с ФР МЭПИ ФД МЭПИ обладают повышенным быстродействием, однако они имеют сравнительно малый выходной сигнал и требуют использования малошумящих усилительных элементов для согласования с последующими устройствами.

От указанного недостатка свободны *фототранзисторные многоэлементные фотоприемники* (ФТ МЭПИ), которые в зависимости от типа фототранзистора разделяют на биполярные, полевые и МДП. Преимущество фототранзистора как элемента для построения МЭПИ заключается в том, что он одновременно выполняет функции фотоприемника, усилителя и развязывающего элемента. Недостатком ФТ МЭПИ является значительный разброс коэффициентов усиления транзисторов, достигающий десятков процентов в матрицах с большим числом элементов.

К числу наиболее совершенных МЭПИ относятся *приборы с зарядовой связью* (ПЗС), принцип работы которых основан на преобразовании распределения освещенности в регистрируемом изображении в распределение носителей заряда (зарядовый рельеф), сохраняемых в потенциальных ямах под электродами МДП-структур. Считывание сигнала осуществляется путем последовательного или параллельного переноса зарядового рельефа от одних МДП-структур к другим с регистрацией соответствующих изменений потенциала, наводимых на электродах выходных МДП-структур.

В зависимости от физической реализации различают два типа ПЗС: приборы с поверхностным переносом заряда и приборы со скрытым каналом (с объемным переносом). Преимущества ПЗС со скрытым каналом заключаются в увеличении быстродействия и эффективности переноса заряда, в снижении уровня шумов. Схемы управления ПЗС подразделяют на двух-, трех- и четырехтактные, их подробные описания приведены в [37].

Спектральный диапазон работы ПЗС МЭПИ определяется материалом полупроводниковой подложки и для большинства промышленных приборов, выполняемых из кремния, включает видимую и ближнюю инфракрасную области.

По способу организации структуры ПЗС МЭПИ различают приборы с кадровым и со строчно-кадровым переносом заряда. В приборах с кадровым переносом (рис. 4.2, а) имеется секция 1 накопления (фоточувствительная секция), секция 2 хранения и выходной регистр 3. При подаче управляющих сигналов на электроды такого ПЗС МЭПИ осуществляется регистрация изображения путем накопления зарядов в секции накопления. Затем за время переноса зарядовый рельеф сдвигается в секцию хранения.

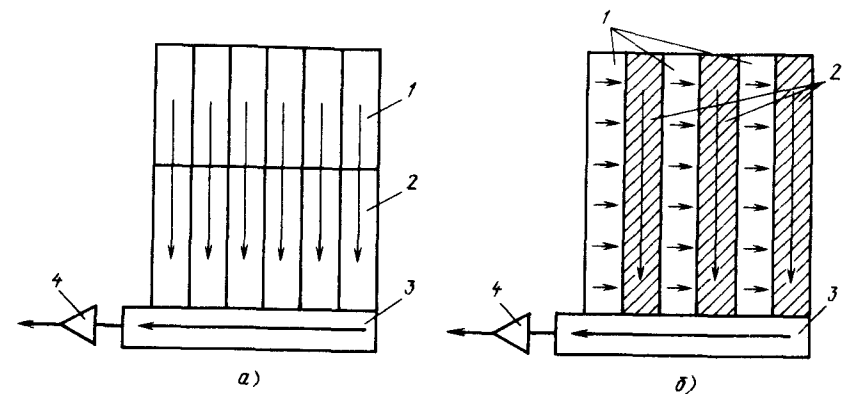


Рис. 4.2. Матрицы ПЗС с кадровым и со строчно-кадровым переносом заряда

В течение времени, необходимого для формирования зарядового рельефа, соответствующего следующему кадру изображения, осуществляется считывание предыдущего путем ввода зарядового рельефа в выходной регистр построчно и формирования соответствующих сигналов на выходе усилителя 4. Недостатком рассмотренного МЭПИ является необходимость в двойном количестве ПЗС элементов вследствие наличия секции хранения.

В ПЗС МЭПИ со строчно-кадровым переносом заряда (рис. 4.2, б) секции накопления и хранения совмещены в одну секцию 1, чувствительные ячейки примыкают к вертикальным регистрам сдвига 2, в которые поступают заряды после накопления и по которым они перемещаются к горизонтальному выходному регистру 3, а затем к усилителю 4.

К числу МЭПИ, выполненных на основе МДП-структур, относят *приборы с инжекцией заряда* (ПЗИ МЭПИ). Принцип работы ПЗИ МЭПИ основан на преобразовании распределения освещенности в зарядовый рельеф, сохраняемый в обедненной области ПЗИ элементов. Считывание зарядов осуществляется путем их инжекции в полупроводниковую подложку при соответствующих изменениях потенциалов на электродах МДП-структур. К числу недостатков ПЗИ относят значительный уровень перекрестных связей между фоточувствительными элементами. Достоинство ПЗИ заключается в простой организации считывания информации.

Достижения микроэлектроники позволяют выполнять описанные выше МЭПИ в виде линеек и матриц, а также в виде структур с различными формами фоточувствительной площади, например с кольцевой для регистрации угловых смещений светового зонда. Схемы управления МЭПИ, как правило, размещаются на одном кристалле с фоточувствительными элементами, что в значительной мере упрощает построение схем последующей обработки видеoinформации.

Таблица 4.2

Параметры типовых МЭПИ

| Параметры   | Тип фотоприемника             |                                   |                                |                                    |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
|   | ФР                            | ФД                                | ФТ                             | ПЗС                                |
| Область спектральной чувствительности, мкм                | 0,4 ... 30                    | 0,4 ... 1,1                       | 0,4 ... 1,1                    | 0,4 ... 1,1                        |
| Интегральная чувствительность                             | 50 ... 1000 В/Вт              | 0,1 ... 25 мА/лм                  | 10 ... 1000 мА/лм              | 0,02 ... 0,1 А/Вт                  |
| Минимальный шаг, мкм                                      | 50 ... 200                    | 16 ... 250                        | 25 ... 100                     | 8 ... 25                           |
| Минимальный размер чувствительного элемента, мкм          | 30×120                        | 8×64                              | 16×64                          | 6×12                               |
| Минимальное расстояние между элементами, мкм              | 20 ... 100                    | 8 ... 150                         | 8 ... 100                      | 2 ... 16                           |
| Число элементов матрицы (линейки)                         | 32×32 ... 64×64<br>(2 ... 64) | 16×16 ... 128×144<br>(2 ... 2048) | 4×4 ... 128×144<br>(2 ... 256) | 16×16 ... 512×625<br>(16 ... 4096) |
| Частота считывания, кГц                                   | 0,1 ... 10                    | 100 ... 1000                      | 1 ... 100                      | 1 ... 1000                         |
| Разброс интегральной чувствительности между элементами, % | 10 ... 50                     | 4 ... 25                          | 30 ... 75                      | 10 ... 25                          |

Сравнительные характеристики МЭПИ различного типа приведены в табл. 4.2. Хотя данные этой таблицы достаточно усредненные, они позволяют осуществить выбор типа МЭПИ для СТЗ работ на стадии их проектирования.

#### 4.3. МОЗАИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Мозаичные преобразователи содержат мозаику оптико-электронных узлов, выполняющих функции регистрации и обработки видеосигналов [45]. Один оптико-электронный узел мозаики может обрабатывать видеосигналы с одного (рис. 4.3, а) или нескольких (рис. 4.3, б, в) ближайших приемников излучения. Результирующий сигнал после обработки снимается с каждого узла с помощью схем словарной или матричной выборки (см. пп. 3.4, 4.2) или передается периферийным узлам мозаики. В последнем случае каждый узел мозаики выполняет также функции хранения и передачи информации. Различают аналоговые и цифровые мозаичные преобразователи. В аналоговых преобразователях результатом преобразования аналоговых видеосигналов являются также аналоговые величины (ток, напряжение или заряд). В цифровых мозаичных преобразователях аналоговые видеосигналы преобразуются в цифровые коды, чаще всего в одноразрядные бинарные коды, которые затем обрабатываются цифровыми устройствами.

Принципы построения аналоговых мозаичных преобразователей рассмотрим на примере схемы линейки узлов выделения раз-

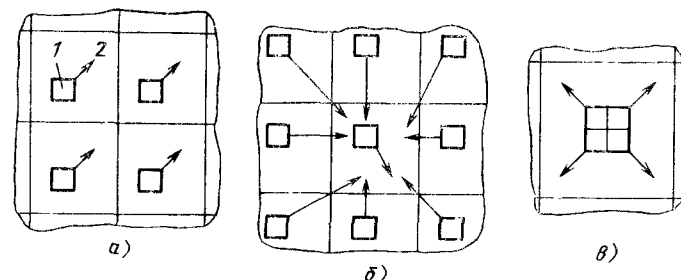


Рис. 4.3. Структурные схемы мозаичных преобразователей с обработкой сигналов с одного и нескольких приемников

ностных видеосигналов (рис. 4.4). Каждый узел мозаики содержит фоторезистор  $R_i$ , нагрузочный регистор  $R1_i$ , интегратор ( $R2_i C_i$  петочка), развязывающие диоды  $VD1_i$ ,  $VD2_i$ . Смежные узлы соединены через развязывающие диоды. Между шиной питания и общей шиной на линейку подаются разнополярные импульсы или синусоидальное переменное напряжение с периодом  $T$ . Если  $R2_i C_i \gg T$ , то фотосигналы на выходных шинах  $X_i$

$$U_i \approx \frac{1}{R2_i C_i} \int_0^T R1_i [I_i(T) - I_{i+1}(t)] dt.$$

При одинаковых уровнях потоков излучения  $\Phi_{ei}$ ,  $\Phi_{ei+1}$ , падающих на фоторезисторы  $R_i$ ,  $R_{i+1}$ , разностный фотосигнал  $U_i \approx 0$ . Когда соседние фоторезисторы расположены на границе свет-тень,  $U_i < 0$ , для границы тень-свет  $U_i > 0$ . Таким образом, осуществляется операция дифференцирования изображения. На аналогичном принципе строят матричный аналоговый дифференцирующий мозаичный преобразователь.

Аналоговые мозаичные преобразователи нашли ограниченное применение, так как аналоговые узлы обработки видеосигналов, выполненные на биполярных, полевых и МОП-транзисторах, характеризуются значительными аппаратными затратами и высокой чувствительностью к разбросу параметров элементов электронных схем. Перспективное направление — построение мозаичных преобразователей на базе ПЗС-структур (см. п. 4.2).

Перенос зарядовых пакетов между элементами ПЗС-матрицы

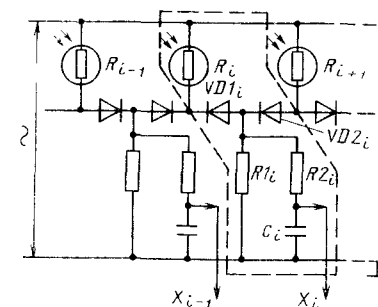


Рис. 4.4. Схема выделения разностных сигналов смежных элементов строки мозаики

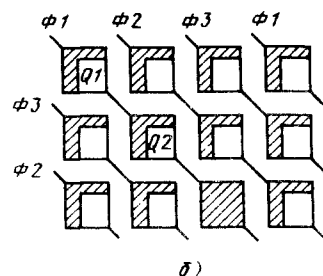
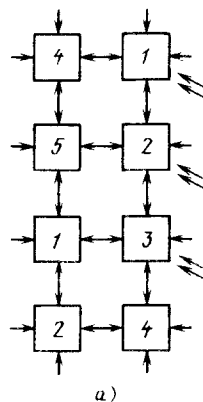


Рис. 4.5. Структурные схемы ПЗС-мозаики с ненаправленным и направленным переносом информации

в различных направлениях, управляемый потенциалами на электродах переноса  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$ ,  $\Phi 3$ , их конфигурацией и конструктивными направляющими элементами, позволяет осуществлять операции сдвига зарядового рельефа и поэлементного суммирования зарядовых пакетов [37].

Сдвиг зарядовых пакетов в четырех возможных направлениях осуществляется в ПЗС-матрице с пятью группами ненаправленных электродов 1, 2, ..., 5 переноса при соответствующей последовательности тактовых сигналов (рис. 4.5, а). Роль приемников излучения выполняют или все элементы ПЗС-матрицы, или отдельные элементы, не покрытые светозащитным слоем. В центре или на периферии мозаики можно располагать узлы разрушающего или неразрушающего считывания зарядовых пакетов. Большое число групп электродов переноса существенно усложняет конструкцию ПЗС мозаичного преобразования и схемы, необходимой для его питания.

Ограничение направлений переноса путем введения конструктивных направляющих элементов (диффузионных стоп-каналов, слоев подэлектродного оксида различной толщины) позволяет снизить число групп переноса до трех. Введение специальных групп горизонтального и вертикального переноса позволяет реализовать ПЗС-структуры с ненаправленным и направленным переносом зарядовых пакетов. Дополнительные функциональные возможности дает введение недоступных для зарядовых пакетов областей. В ПЗС-мозаике, структура которой показана на рис. 4.5, б, каждый узел содержит  $3 \times 3$  электродов, объединенных шинами фазового питания  $\Phi 1$ ,  $\Phi 2$  и  $\Phi 3$ , причем под одним из девяти электродов может быть расположена недоступная для зарядовых пакетов область [37].

Рассмотрим процедуры выполнения типичных операций аналоговыми мозаичными преобразователями на ПЗС-структурах.

*Адаптация апертуры многоэлементного приемника излучения в целях получения максимального отношения сигнал—шум.*

Поэлементное считывание зарядовых пакетов с ПЗС-структуры характеризуется следующим отношением сигнал—шум:

$$U_c/U_{\text{ш}} = U_{c\,ij}/(U'_{\text{ш}\,ij} + U''_{\text{ш}\,ij}),$$

где  $U_{c\,ij}$  — сигнал элемента  $i, j$ ;  $U'_{\text{ш}\,ij}$  — первая (фоновая) составляющая шума;  $U''_{\text{ш}\,ij}$  — вторая (коммутационная) составляющая шума.

Выделение существенных признаков объекта при сильно зашумленном его изображении достигается введением более грубого растра, причем видеосигнал с каждого элемента грубого растра получают путем суммирования фотосигналов, соответствующих принадлежащим ему элементам мелкого растра. Выполнения операций суммирования вне ПЗС-приемника излучения не дает существенного выигрыша в отношении сигнал—шум, так как одновременно с видеосигналами суммируются первая и вторая составляющие шума. Суммирование  $n$  зарядовых пакетов на уровне кристалла ПЗС-преобразователя и считывание результирующих зарядов позволяют существенно повысить отношение сигнал—шум. Действительно, после суммирования получаем

$$U_c/U_{\text{ш}} = \sum_{ij}^n U_{c\,ij} / \left( \sum_{ij}^n U'_{\text{ш}\,ij} + U''_{\text{ш}} \right).$$

Таким образом, путем потери разрешающей способности в  $\sqrt{n}$  раз удается поднять отношение сигнал—шум в  $(U'_{\text{ш}} + U''_{\text{ш}})/(\bar{U}'_{\text{ш}} + \bar{U}''_{\text{ш}}/n)$  раз (отметим, что  $\bar{U}'_{\text{ш}} \ll U'_{\text{ш}}$ ).

Для структуры, показанной на рис. 4.5, б, поэлементное суммирование зарядовых пакетов  $Q_1$ ,  $Q_2$  осуществляется при включении сигналов переноса в последовательности 3—1—3.

*Поиск контура, линий одного уровня или положения максимума зарядового рельефа.* Эта операция в мозаичных ПЗС-структурах реализуется при введении в центр мозаики неразрушающего

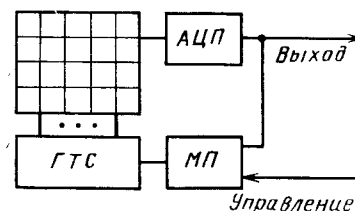


Рис. 4.6. Схема адаптивного фазирования управляющих сигналов ПЗС-мозаики с помощью микропроцессора: МП — микропроцессор; ГТС — генератор тактовых сигналов; АЦП — выходной аналого-цифровой преобразователь

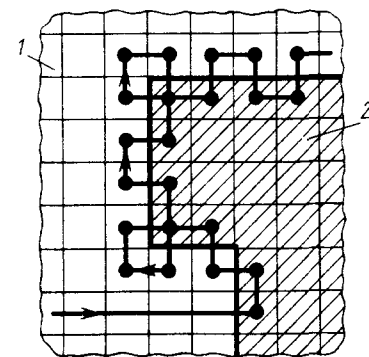


Рис. 4.7. Траектория пошагового сдвига зарядового пакета в мозаике в случае поиска контура зарядового рельефа: 1 — освещенная область; 2 — неосвещенная область

узла считывания при адаптивном фазировании тактовых сигналов на электродах переноса с помощью микропроцессора (рис. 4.6). Например, для поиска контура зарядового рельефа, занимающего не более  $1/4$  площади мозаичного преобразователя, необходимо осуществлять пошаговый сдвиг зарядового рельефа в соответствии с траекторией обхода, показанной на рис. 4.7.

Цифровые мозаичные преобразователи выполняются на основе АЦП, комбинационных схем и триггерных элементов. Например, линейная мозаика для выделения разностных бинарных видеосигналов может быть построена на линейке приемников излучения, связанных с компараторами и  $R$ — $S$ -триггерами для хранения результатов преобразования (рис. 4.8, а). В качестве компараторов можно использовать фототриггеры — запоминающие элементы с оптической записью информации, построенные на биполярных или МОП-транзисторах, фототиристорах (рис. 4.8, б).

Существенное расширение функциональных возможностей цифровых мозаичных преобразователей достигается путем их выполнения на основе однородных вычислительных сред, например, прямоугольной мозаики из столбцов и строк. Каждый узел мозаики содержит по крайней мере один приемник излучения и АЦП (компаратор), а также логический преобразователь — перестраиваемый автомат с фиксированными входами настройки. Автомат с простой последовательной настройкой (рис. 4.9) имеет настроечные входы  $S_1$ — $S_4$ , информационные входы  $X_1$ — $X_4$ , часть которых связана с выходами АЦП, и информационные выходы  $Y_1$ — $Y_4$ . Настроечные сигналы поступают по входам  $S_1$ — $S_4$  через вен-

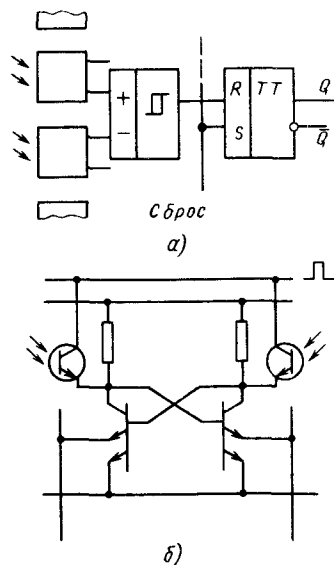


Рис. 4.8. Электрические схемы элементов мозаики, построенные на основе дифференциальных фотореле

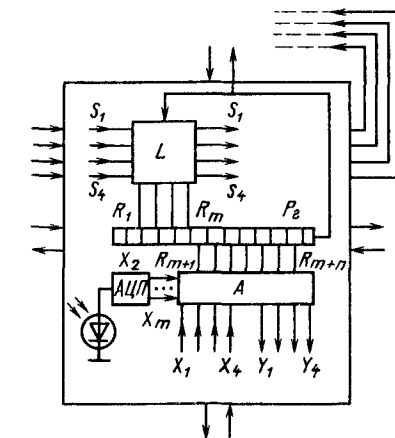


Рис. 4.9. Электрическая схема элемента мозаики, выполненного на базе однородной вычислительной среды

тиль  $L$  в регистр  $P_2$ . Часть сигналов, обеспечивающих настройку логического модуля  $A$ , выполняющего логические операции, записывается в разряды  $R_1$ — $R_m$  регистра. Для коммутации связи модуля  $A$  с четырьмя ближайшими соседями мозаики служат разряды  $R_{m+1}$ — $R_{m+n}$  регистра, куда записывается информация, определяющая характер связи при вводе данных в модуль  $A$ . Последний сигнал, поступающий на регистр, отключает его настроечные входы от среды и включает вентиль  $\Phi$ ; в следующий момент времени сигналы настройки передаются на другие автоматы.

После окончания настройки среда работает как схема из автоматов, алгоритм функционирования которых задан настройкой. Обычно перестраиваемые автоматы реализуют одну или несколько булевых функций одной или нескольких переменных и констант. Видеосигналы, снимаемые с приемников излучения мозаики, могут быть использованы в качестве переменных, а также для перестройки алгоритма работы однородной вычислительной среды.

Основным достоинством цифровых мозаичных преобразователей, содержащих однородные вычислительные среды, является высокая скорость выполнения процедур обработки изображений. К недостаткам следует отнести низкий коэффициент заполнения площади мозаики фоточувствительными площадками приемников излучения и, как следствие, малое число узлов на одной твердотельной мозаике (16 ... 64).

#### 4.4. ПЕРЕДАЮЩИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ ТРУБКИ И КАМЕРЫ

Телевизионная передающая камера (ТПК) СТЗ робота представляет собой оптико-электронный функциональный преобразователь, который в общем случае содержит: вакуумную передающую телевизионную трубку или МЭПИ; оптическую систему, основным элементом которой является объектив; блок формирования сигналов развертки; блок усиления и преобразования видеосигнала; устройство фокусировки и наведения. Состав и основные характеристики ТПК существенно зависят от ее назначения, объема и характера передаваемой видеoinформации, условий работы и т. п. В СТЗ роботов находят применение ТПК для черно-белого и цветного телевизионного вещания, промышленные ТПК, стереоскопические и панорамные ТПК.

Отечественная промышленность выпускает широкую номенклатуру передающих телевизионных трубок различного назначения. Диссекторы находят применение в специализированных ТПК, форма траектории развертки в которых существенно отличается от общепринятой телевизионной. Световые характеристики диссекторов линейны в широком диапазоне освещенностей (3 ... 5 порядков). В системах контроля линейных размеров рекомендуется использовать высокоточные диссекторы ЛИ605-3. Регистрация точечных объектов осуществляется диссекторами

Основные характеристики передающих телевизионных трубок

| $\frac{E_{\min}}{E_{\max}}, \frac{\text{лк}}{\text{лк}}$ | $n$ , линий  | $\frac{I_c}{I_{\text{ш}}}$ | $\sigma_c$ | $U'_c$    | $M$       | $\Gamma$ |
|--|--------------|----------------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| %  |              |                            |            |           |           |          |
| Диссекторы *   |              |                            |            |           |           |          |
| $\frac{0,2}{100}$  | 125 ... 3500 | 18 ... 50                  | 5 ... 15   | —         | —         | 4        |
| Суперортиконы  |              |                            |            |           |           |          |
| $\frac{5 \cdot 10^{-4}}{5}$                              | 500 ... 1000 | 3—80                       | 10 ... 25  | 10 ... 50 | 30 ... 80 | 2 ... 5  |
| Видиконы   |              |                            |            |           |           |          |
| $\frac{0,5}{1000}$                                       | 400 ... 600  | 2 ... 50                   | 10 ... 30  | 20 ... 60 | 20 ... 80 | 1 ... 3  |

\* Диаметр диафрагмы от 0,02 мм, 0,2×0,2 мм до 12×0,04 мм.

ЛИ604К1, ЛИ607—ЛИ612 (координаторы). Регистрацию контрастных (графических) изображений в растровом режиме рекомендуется осуществлять диссекторами ЛИ605-1, ЛИ611. В условиях большой освещенности с высокой разрешающей способностью работают диссекторы ЛИ611, ЛИ612 [2].

В ТПК общего назначения применяют суперортиконы и видиконы. *Суперортиконы* обладают высокой чувствительностью, но сложны по устройству и в эксплуатации, имеют сравнительно большие размеры. Для прикладных ТПК используют суперортиконы ЛИ201, ЛИ204, ЛИ213, ЛИ215, ЛИ216, ЛИ219, ЛИ221—ЛИ224. Суперортиконы ЛИ207, ЛИ227—ЛИ234 позволяют длительное время проецировать на фотокатод неподвижное изображение без эффекта «выжигания». Фотоэлектрические характеристики суперортиконов сильно зависят от температуры, поэтому при их эксплуатации в ряде случаев необходимо использовать специальные системы термостабилизации.

*Видиконы* имеют значительно меньшие размеры, чем суперортиконы, более просты в эксплуатации, но менее чувствительны и имеют достаточно высокую инерционность. Материал мишени большинства видиконов — трехсернистая сурьма. В некоторых видиконах мишени выполнены на основе оксида свинца (ЛИ432, ЛИ442, ЛИ457, ЛИ465), кремния (ЛИ446) и др. Видиконы с подобными мишенями иногда называют соответственно плюмбиконами, кадмиконами, пириконами, кремниконами и т. п. — по типу материала, используемого в мишенях. Принципиальное отличие кремниконов от видиконов других типов заключается в конструкции мишени. Мишень кремникона в виде матрицы фотодиодов формируется в пластине монокристаллического кремния методами фотолитографии, используемыми для изготовления интегральных схем.

В прикладных ТПК используют видиконы типа ЛИ426—ЛИ448. Видиконы ЛИ414 и ЛИ429 обеспечивают длительное хранение (5 ... 10 мин) изображения после разовой эксплуатации и многократного (до 20 тыс. раз) считывания. Видиконы ЛИ439 и ЛИ446 отличаются повышенной чувствительностью и пониженной инерционностью, однако имеют малый динамический диапазон по освещенности.

Спектральные характеристики передающих телевизионных трубок охватывают всю видимую и ближнюю инфракрасную части спектра. Распределение чувствительности по спектру для некоторых трубок существенно отличается от кривой видности глаза, что необходимо учитывать при расчетах. Некоторые трубки способны регистрировать изображение в инфракрасной части спектра.

Основные характеристики отечественных передающих телевизионных трубок приведены в табл. 4.3, где  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  — минимальные и максимальные значения рабочей освещенности;  $n$  — разрешающая способность;  $I_c/I_{\text{ш}}$  — отношение сигнал—шум;  $\sigma_c$  — неравномерность сигнала по полю мишени;  $U'_c$  — послепро-

бражение, определяемое значением сигнала, снимаемого с трубки после прекращения проецирования изображения;  $M$  — глубина модуляции (%) при разрешении 400 линий;  $\Gamma$  — геометрические искажения, %.

В ТПК, как правило, используются специальные телевизионные объективы, при конструировании которых учитывается наличие в оптическом пути плоскопараллельной стеклянной пластины.

В обозначение типа телевизионного объектива добавляется буква «Т». В случае необходимости в ТПК СТЗ роботов используют вариообъективы, в которых фокусное расстояние, а соответственно и масштаб изображения могут плавно изменяться в сравнительно широких пределах. Положение плоскости изображения при этом остается неизменным и совмещенным с плоскостью фоточувствительной поверхности мишени (см. п. 3.3). В ТПК СТЗ роботов в зависимости от их назначения могут использоваться фотографические, киносъемочные и другие объективы.

Основные характеристики ряда объективов, нашедших наибольшее применение, приведены в табл. 4.4, где  $f'$  — фокусное расстояние;  $m$  — кратность изменения фокусного расстояния,  $m = f'_{\max}/f'_{\min}$ ;  $K$  — диафрагменное число;  $2\omega$  — угловое поле;  $n$  — разрешающая способность;  $\tau_0$  — коэффициент пропускания.

Фокусное расстояние объектива ТПК можно выбрать, используя номограмму, приведенную на рис. 4.10. Исходными данными для выбора значения  $f'$  являются формат кадра  $p$  или горизонтальное угловое поле  $2\omega_{\text{г}}$ , вертикальное угловое поле  $2\omega_{\text{в}}$  и

Таблица 4.4

## Основные характеристики объективов ТПК

| Объектив                   | $f'$ , мм    | $m$     | $K$         | $2\omega^\circ$ | $n$ ,<br>линий/мм | $\tau_0$      |
|----------------------------|--------------|---------|-------------|-----------------|-------------------|---------------|
| <i>Телевизионные</i>       |              |         |             |                 |                   |               |
| «Мир»                      | 27 ... 37    | —       | 3,5 ... 2,8 | 70 ... 57       | 23 ... 55         | —             |
| «Гетнос»                   | 50           | —       | 2,0         | 44              | —                 | 0,8           |
| «Эра»                      | 52 ... 100   | —       | 1,8 ... 2,0 | 27 ... 23       | 21 ... 48         | 0,8           |
| «Таир»                     | 135 ... 1000 | —       | 2,8 ... 8,0 | 17 ... 2,3      | 28 ... 52         | 0,8 ... 0,65  |
| <i>Кинематографические</i> |              |         |             |                 |                   |               |
| ОКС                        | 10 ... 150   | —       | 2,0 ... 2,8 | 64 ... 10       | 35 ... 65         | 0,82 ... 0,65 |
| <i>Вариообъективы</i>      |              |         |             |                 |                   |               |
| «Вариогор»                 | 11,8 ...     | 2,2 ... | 1,7 ... 2,5 | 72 ... 10       | —                 | —             |
| «Вариограмма» и др.        | 120,0        | 10,0    |             |                 |                   |               |

диаметр  $d$  фоточувствительной поверхности мишени передающей телевизионной трубки.

Оптическая система ТПК может быть дополнена специальными средствами, например для проецирования на фоточувствительную поверхность маркерных меток, используемых для калибровки и контроля параметров ТПК. В цветных ТПК в состав оптической системы входят светофильтры и светоделительные элементы.

Существует несколько вариантов построения стереоскопических ТПК. В двухтрубчатых системах, в которых оптические оси объективов параллельны (рис. 4.11, а), имеет место неискаженное

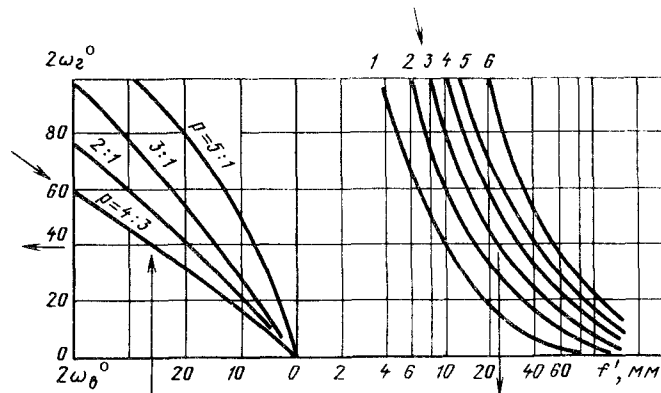


Рис. 4.10. Номограмма для выбора фокусного расстояния объектива ТПК:  
1 —  $d = 7,5$  мм; 2 —  $d = 12$  мм; 3 —  $d = 16$  мм; 4 —  $d = 21$  мм; 5 —  $d = 25$  мм; 6 —  
 $d = 40$  мм

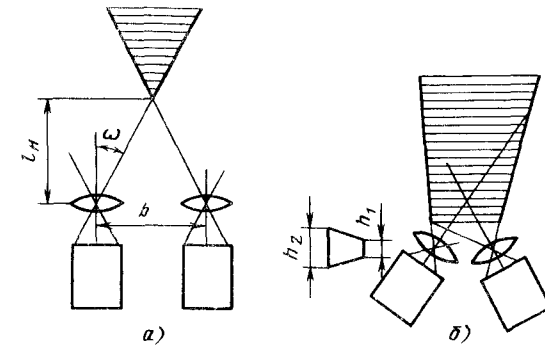


Рис. 4.11. Схемы построения стереоскопических ТПК с объективами, имеющими параллельные и скрещенные оптические оси:

$h_1$  и  $h_2$  — размеры сторон кадра при трапецидальных искажениях

проецирование изображений стереопары на фоточувствительные мишени трубок. Однако такая система не позволяет наблюдать за объектами, находящимися вблизи ТПК. Протяженность  $l_n$  недоступной для наблюдения зоны  $l_n = b/\tan \omega$ , где  $b$  — расстояние между оптическими осями трубок. Кроме того, такая система характеризуется малым полем обзора. В двухтрубчатых системах с объективами, имеющими скрещенные оси (рис. 4.11, б), протяженность зоны, недоступной для наблюдения, меньше, а поле обзора больше. Однако этой схеме присущи трапецидальные искажения формата кадра в вертикальном и горизонтальном направлениях [26].

ТПК панорамного обзора, например для СТЗ транспортных роботов, строят на основе оптико-механических развертывающих систем или специальных объективов, например торических объективов Манжена.

К основным узлам любой ТПК относят электронные схемы формирования сигналов развертки, усиления и преобразования видеосигнала. Для считывания зарядового рельефа и формирования видеосигнала необходимо подать соответствующие электрические сигналы развертки на электростатическую или электромагнитную фокусирующе-отклоняющую систему передающей телевизионной трубки. Различают цифровую и аналоговую развертки. При цифровой развертке электронный луч считывает зарядовый рельеф с фиксированных участков — пикселей фоточувствительной мишени. Совокупность пикселей составляет растр размером  $N \times N$  пиксел. Схемы цифровой развертки выпол-

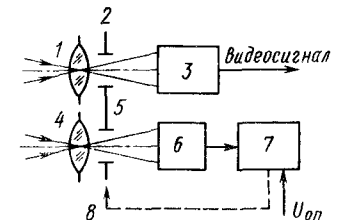


Рис. 4.12. Схема автоматической регулировки освещенности

няют на основе генераторов ступенчатых напряжений, содержащих пересчетные схемы и ЦАП (см. п. 3.4).

При аналоговой развертке видеосигнал соответствует зарядовому рельефу, считываемому электронным лучом при его движении по определенной траектории. Наибольшее применение в телевизионных устройствах СТЗ нашли прямая строчная и чересстрочная развертки. В случае чересстрочной развертки (ГОСТ 7845—79) последовательно во времени считываются два полукадра, первый содержит нечетные строки, а второй — четные, что необходимо учитывать при построении аппаратных средств обработки видеoinформации и при ее вводе в запоминающее устройство микроЭВМ.

Помимо строчной развертки, в специализированных ТПК применяют развертку по спиральным, розеточным и другим траекториям. Схемы развертки такого типа строят на основе генераторов гармонических сигналов, выполненных на аналоговых ИМС.

Усиление и преобразование видеосигнала осуществляется электронными блоками ТПК.

В состав ТПК входит ряд вспомогательных электронных узлов — схем автоматики. К числу наиболее важных относятся схемы автоматической регулировки освещенности фоточувствительной мишени; схемы автоматической фокусировки; схемы автоматического наведения.

Принцип действия автоматической регулировки освещенности схемы с независимым контуром управления поясняет рис. 4.12. В ТПК помимо основного объектива 1 установлен второй объектив 4, проецирующий изображение на фотоприемник 6, с которого снимается сигнал, пропорциональный средней освещенности в поле изображения. Сравнение этого сигнала с опорным в блоке 7 позволяет формировать сигналы, управляющие исполнительным механизмом 8 (электродвигатель с редуктором), который изменяет диаметр апертурных диафрагм 2, 5 основного и вспомогательного объективов. В результате работы схемы поддерживается примерно постоянный уровень освещенности мишени передающей телевизионной трубки 3.

Если фотоприемник разместить у фоточувствительной поверхности трубки в пределах поля зрения объектива, но за границами кадра, то можно осуществлять регулировку уровня освещенности мишени без дополнительного объектива. В качестве датчика уровня освещенности можно использовать передающую телевизионную трубку, если измерять среднее значение видеосигнала.

В ТПК на видеоканалах необходимую стабилизацию уровня видеосигнала при различных освещенностях в поле изображения обеспечивает схема автоматической регулировки чувствительности. Освещенность мишени в данном случае не регулируется, а изменяется режим работы видеоканала таким образом, чтобы он был оптимальным для заданного уровня освещенности.

## ГЛАВА 5

### АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

#### 5.1. ФОТОРЕЛЕ И ФОТОСЧЕТЧИКИ

Фотореле выполняют функции пороговых элементов СТЗ роботов и характеризуются: релейной зависимостью выходного сигнала  $U$  от освещенности  $E$  (рис. 5.1, а); пороговым уровнем освещенности  $E_{\text{п}}$  и погрешностью его задания  $\Delta E_{\text{п}}$  при определенном спектральном составе излучения; временем переключения  $t_{\text{вкл}}$  и  $t_{\text{выкл}}$ . В общем случае фотореле (рис. 5.1, б) содержит: источник излучения 1; оптическую систему источника 2; объект 3; фотоприемное устройство 4; приемную оптическую систему 5; приемник излучения 6; усилитель 7; компаратор 8; триггер-защелку 9.

В зависимости от компоновки можно выделить следующие четыре группы схем фотореле: 1) в которых фотоприемник непосредственно воспринимает излучение объекта, например поковки, раскаленной полосы металла и т. п.; 2) фиксирующие резкое изменение прозрачности окружающей среды или объекта (поглощения, рассеивания, преломления или поворота плоскости поляризации); 3) фиксирующие прерывание светового потока объектом; 4) фиксирующие пороговое изменение светового потока, отраженного от объекта.

Проектирование фотореле при выбранной схеме его компоновки начинают с энергетических расчетов для определения уровнем освещенности  $E_1$  и  $E_2$  (см. рис. 5.1, а) или соответствующих потоков излучения  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в отсутствие и при наличии регистрируемого объекта. Методика энергетических расчетов подробно изложена ниже в п. 6.1.

Для фотореле с угловым полем  $2\beta$  (рис. 5.2), регистрирующего плотность яркости  $L_1$  фона и яркости  $L_2$  протяженного объекта (минимальный размер которого  $a \geq \sqrt{\pi l \operatorname{tg} \beta}$ ), расчетные формулы имеют вид [52]

$$\Phi_{1,2} = \tau_c \tau_{o.c} L_{1,2} A_{\text{ф.п}} A_{\text{вх}} / l'^2; \quad E_{1,2} = \tau_c \tau_{o.c} L_{1,2} A_{\text{ф.п}} / l'^2,$$

где  $\tau_c$ ,  $\tau_{o.c}$  — коэффициенты пропускания среды и оптической системы;  $A_{\text{ф.п}} = q$  — площадь фоточувствительной площадки (полевой диафрагмы);  $A_{\text{вх}}$  — площадь входного зрачка оптической системы.



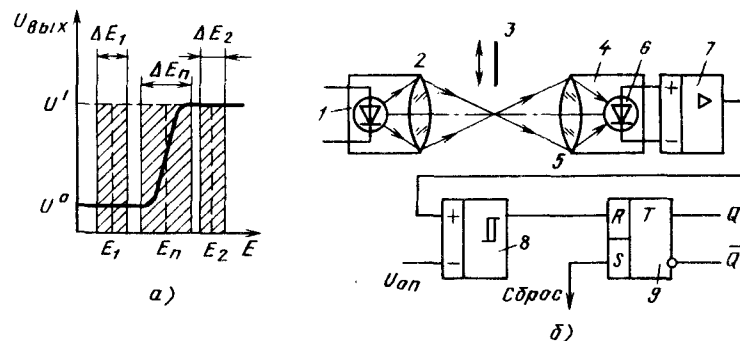


Рис. 5.1. Релейная характеристика фотореле и его обобщенная структурная схема

ской системы;  $f'$  — заднее фокусное расстояние оптической системы фотореле. При круглом входном зрачке оптической системы

$$\Phi_{1,2} = 0,25\pi\tau_{\text{с.с.}}L_{1,2}A_{\text{ф.п.}}(D_{\text{вх}}/f')^2.$$

На практике широко применяют фотореле, регистрирующее прерывание светового потока объектом. Для простейшей безлинзовой схемы (рис. 5.3, а) такого фотореле (без учета коэффициента пропускания излучения средой) справедливы соотношения [52]

$$E_1 \approx L_1 \operatorname{tg}^2 \omega; \quad E_2 = 0,25\pi L_{\text{н}}(D_{\text{н}}/d)^2,$$

где  $L_1$  — яркость протяженного объекта;  $2\omega$  — угол поля приемника излучения;  $L_{\text{н}}$  — яркость источника излучения (световода);  $D_{\text{н}}$  — диаметр излучающего участка источника;  $d$  — расстояние между входной и выходной полевыми диафрагмами.

Схемы компоновки линзовых фотореле, регистрирующих перекрытие потока излучения объектом, выполняются с использованием собирающей линзы (рис. 5.3, б), линзовой системы с фокусировкой на бесконечность (рис. 5.3, в). Находят применение и зеркальные системы (рис. 5.3, г). Для повышения чувствительности фотореле к смещению объекта используют схему с фокусирующими линзами (рис. 5.3, д). Для построения фотореле, регистрирующих отраженное от объекта излучение, применяют как линзовые (рис. 5.3, е), так и зеркальные (рис. 5.3, ж) системы.

После нахождения значений освещенностей  $E_1$  и  $E_2$  (или пото-

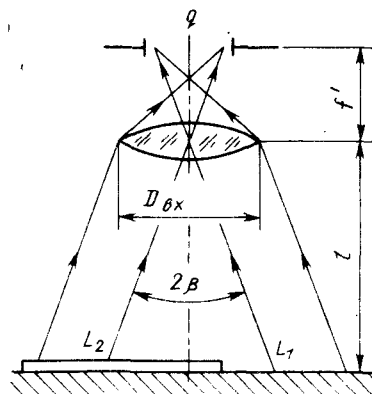


Рис. 5.2. Схема фотореле для регистрации разности яркостей фона и объекта

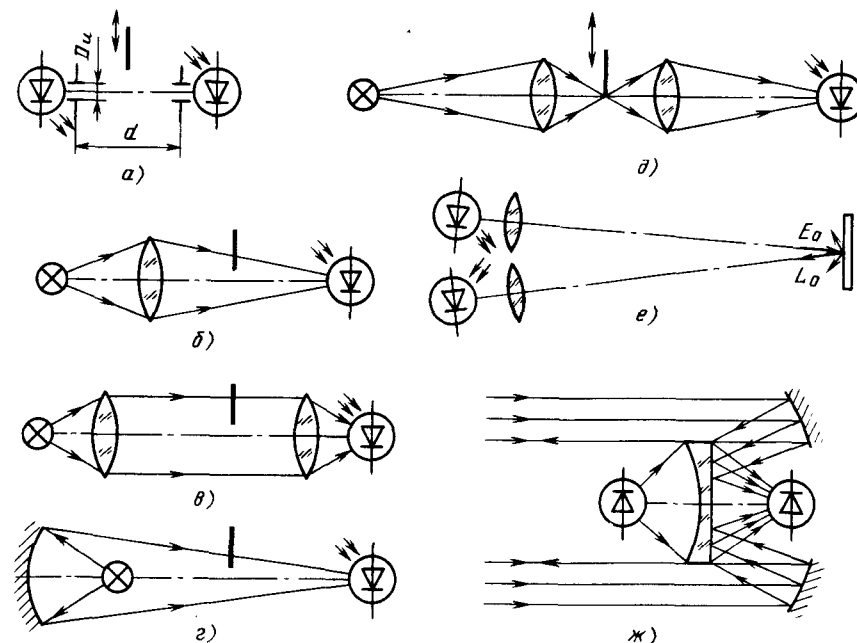


Рис. 5.3. Типовые оптические схемы фотореле

ков излучения  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ), а также соответствующих зон  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$ , определяющих погрешность задания  $E_1$  и  $E_2$ , выбирают пороговую освещенность  $E_{\text{п}}$  и соответствующую ей зону  $\Delta E_{\text{п}}$  (см. рис. 5.1, а). Для устойчивой работы фотореле необходимо исключить перекрытие зон  $\Delta E_1$  и  $\Delta E_2$  с  $\Delta E_{\text{п}}$ ; в противном случае возможны «ложные» переключения фотореле. Вероятность ложного переключения можно рассчитать по известным методикам [52].

Реакция на релейные сигналы в СТЗ вырабатывается: путем непосредственной их подачи на исполнительные устройства (электропривод, устройства сигнализации, защиты и т. п.); после предварительной аппаратной обработки, например кодирования-дешифрирования; после программной обработки в микропроцессоре или микроЭВМ, куда они поступают через интерфейс ввода дискретной информации без мультиплексирования или через мультиплексор [28].

Типовая обобщенная схема **аппаратного фотосчетчика** содержит фотореле 1, логическое устройство 2,  $n$ -разрядный счетчик 3 и цепи управления 4 (рис. 5.4). Фотосчетчик выполняет операции: ре-

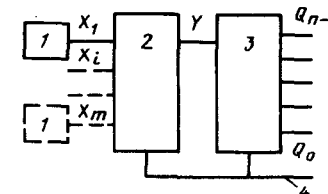


Рис. 5.4. Обобщенная структурная схема аппаратного фотосчетчика

гистрации релейных логических сигналов  $X_1, \dots, X_m$ ; логического преобразования совокупности регистрируемых сигналов; счета сигналов  $Y$  — результата преобразования; передачи результата счета  $Q_0, \dots, Q_{n-1}$  другим узлам СТЗ робота или исполнительным устройствам. Фотосчетчик является суммирующим, если выполняет операцию  $C := C + 1$ , где  $C$  — слово его состояния ( $Q_0, \dots, Q_{n-1}$ ). Вычитающий счетчик осуществляет операцию  $C := C - 1$ . В случае реализации двух операций фотосчетчик является реверсивным.

Основной недостаток аппаратных фотосчетчиков с жесткой структурой — отсутствие возможности перенастройки на реализацию различных логических функций над релейными фотосигналами. Фотосчетчики с перестраиваемой структурой выполняют на основе аппаратно-программных средств. Релейные фотосигналы вводятся в вычислительную систему, например, в микропроцессор или микроЭВМ, где и реализуются программным путем функции логического преобразования и счета [28].

## 5.2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРЫ

Значение потока отраженного, рассеянного или проходящего излучения является носителем информации в СТЗ роботов, оснащенных *фотометрическими преобразователями* (ФМП). Обобщенная структурная схема ФМП (рис. 5.5) содержит блок 1 формирования потока излучения, в состав которого входят источник излучения 4 с оптической системой 5, а также следящее устройство стабилизации потока излучения, объект 7, приемник излучения 9 с оптической системой 8 и блок 10 преобразования фотосигнала. Стабилизатор потока излучения обычно выполняют на базе операционных усилителей 2, подключенных к дополнительному приемнику излучения 3, на который падает часть потока излучения, расщепляемого полупрозрачным зеркалом 6.

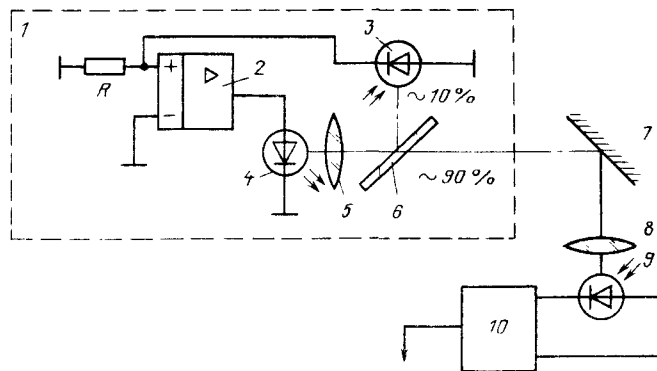


Рис. 5.5. Обобщенная структурная схема ФМП

В зависимости от функций, реализуемых в блоке преобразования фотосигнала, ФМП делят на аналоговые (реализуемые функции — фильтрация, усиление, логарифмирование и т. п.) и цифровые. В составе цифровых ФМП, помимо узлов аналогового преобразования фотосигнала, имеется АЦП [28, 50].

Различают ФМП, реагирующие на *мгновенные значения* потока излучения  $\Phi$  (освещенности  $E$ ), и *интегрирующие* ФМП, регистрирующие энергию излучения  $Q$ , падающую на приемник в течение заданного промежутка времени  $t$ .

Основными параметрами ФМП являются: порог чувствительности  $\Phi_n$  ( $E_n$  или  $Q_n$ ); рабочий диапазон  $\Phi_{\min} \dots \Phi_{\max}$ ; амплитудная  $\Delta\Phi$  и фазовая  $\Delta\varphi$  погрешности регистрации  $\Phi$ . Быстродействие ФМП описывают амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики.

Критерием качества аналогового выходного сигнала ФМП является отношение сигнал—шум  $\mu$ , приведенное ко входу блока преобразования. Вероятность  $P$  того, что измеренное значение потока излучения  $\Phi$  или фазы  $\varphi$  находится в области  $\Delta\Phi$  или  $\Delta\varphi$ , расположенной симметрично относительно истинного значения измеряемой величины, является функцией отношения сигнал—шум  $\mu$  [41];

$$P(\Delta\Phi, \Phi) = \text{erf} [\Delta\Phi \sqrt{\mu} / (2\Phi)];$$

$$P(\Delta\varphi, \varphi) = \text{erf} [\Delta\varphi \sqrt{\mu} / (2 \cdot 57,3)];$$

где  $\text{erf}(x)$  — функция ошибок.

Значения  $\Delta\Phi/\Phi$  и  $\Delta\varphi$  для  $P = 0,68$  приведены в табл. 5.1. Качество цифрового сигнала для цифровых ФМП характеризует разрядность используемого АЦП (табл. 5.2).

В качестве приемников излучения в ФМП часто используют фотодиоды, обеспечивающие максимальную протяженность динамического диапазона  $\Phi_{\min} \dots \Phi_{\max}$  (до 100 дБ с искажениями

Таблица 5.1

Допустимые амплитудная и фазовая погрешности (при доверительной вероятности измерений 68 %) в зависимости от требуемого отношения сигнал—шум

| $\mu$  | Погрешность    |            | $\mu$     | Погрешность    |            |
|--------|----------------|------------|-----------|----------------|------------|
|        | амплитудная, % | фазовая, ° |           | амплитудная, % | фазовая, ° |
| $10^1$ | 44,0           | 22,5       | $10^6$    | 0,14           | 0,09       |
| $10^2$ | 14,0           | 7,5        | $10^7$    | 0,044          | 0,027      |
| $10^3$ | 4,4            | 2,5        | $10^8$    | 0,014          | 0,009      |
| $10^4$ | 1,4            | 0,82       | $10^9$    | 0,0044         | 0,003      |
| $10^5$ | 0,44           | 0,27       | $10^{10}$ | 0,0014         | 0,001      |

Таблица 5.2

Эквивалентное соотношение между разрядностью двоичного числа и качеством сигнала

| Разрядность двоичного числа | МЗР (при $U_{шк} = 10$ В), мВ | 1/2 МЗР (от полной шкалы), % | μ на выходе фильтра   |     |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----|
|                             |                               |                              | относительные единицы | дБ  |
| 4                           | 625                           | 3,2                          | $2,0 \cdot 10^3$      | 33  |
| 5                           | 312                           | 1,6                          | $8,0 \cdot 10^3$      | 39  |
| 6                           | 156                           | 0,8                          | $3,2 \cdot 10^4$      | 45  |
| 7                           | 78,1                          | 0,4                          | $1,3 \cdot 10^5$      | 51  |
| 8                           | 39,0                          | 0,2                          | $5,0 \cdot 10^5$      | 57  |
| 9                           | 19,6                          | 0,1                          | $2,0 \cdot 10^6$      | 63  |
| 10                          | 9,8                           | 0,05                         | $8,0 \cdot 10^6$      | 69  |
| 11                          | 4,9                           | 0,025                        | $3,2 \cdot 10^7$      | 75  |
| 12                          | 2,45                          | 0,012                        | $1,3 \cdot 10^8$      | 81  |
| 13                          | 1,22                          | 0,006                        | $5,0 \cdot 10^8$      | 87  |
| 14                          | 0,61                          | 0,003                        | $2,0 \cdot 10^9$      | 93  |
| 15                          | 0,305                         | 0,0015                       | $8,0 \cdot 10^9$      | 99  |
| 16                          | 0,153                         | 0,00075                      | $3,2 \cdot 10^{10}$   | 105 |

МЗР — младший значащий разряд.

передаточной характеристики не более 1 %) и малые значения пороговых потоков  $\Phi_n$ .

Типовые схемы включения фотодиодов приведены на рис. 5.6. Недостатком схем со смещением фотодиода (рис. 5.6, а) является сильная температурная зависимость темнового тока. При регистрации модулированных оптических сигналов в качестве нагрузки включают частотно-зависимый элемент — дроссель (рис. 5.6, б), что позволяет существенно уменьшить вклад шумовой составляющей в выходной сигнал.

Наибольшую температурную стабильность и исключение избыточного шума обеспечивает схема «короткого замыкания», когда сигнал снимается с низкоомной нагрузки  $R_n$ , подключенной к фотодиоду без смещения (рис. 5.6, в). Аналогичные схемы выполняются с дроссельной (рис. 5.6, г) или трансформаторной (рис. 5.6, д) нагрузкой.

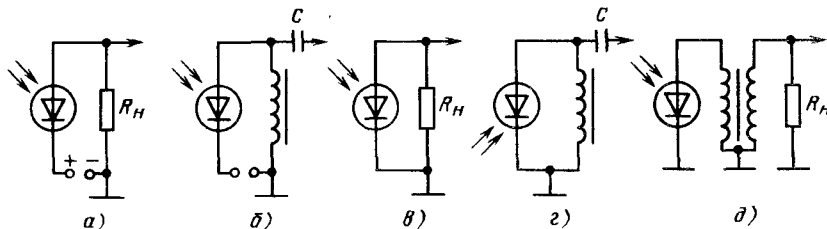


Рис. 5.6. Типовые схемы включения фотодиодов

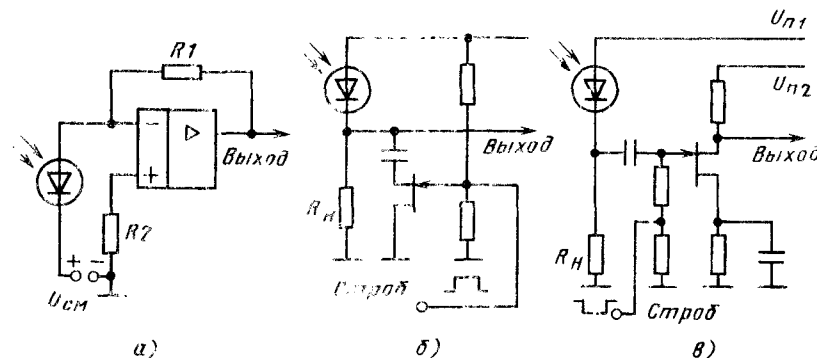


Рис. 5.7. Схемы подключения фотодиода к операционному усилителю и к схемам со стробированием

Типовая схема подключения фотодиода к операционному усилителю показана на рис. 5.7, а, где эффективное сопротивление нагрузки для фотодиода составляет  $R1/K_{yu}$ . Сопротивление  $R2$  служит для исключения влияния темнового тока на смещение на входе усилителя. При  $U_{см} = 0$  фотодиод работает в режиме «короткого замыкания». Для исключения влияния сильных фоновых засветок на входные цепи ФМП используют схемы со стробированием входной цепи (рис. 5.7, б, в) или аналоговые ключи.

Ниже рассмотрена одна из возможных процедур выбора характеристик *предусилителя, предварительного фильтра и АЦП* при заданных значениях эффективного напряжения  $U_{ш.э}$  синфазной помехи, динамического диапазона  $\Phi_{min} \dots \Phi_{max}$  ФМП, порога чувствительности  $\Phi_n$  приемника излучения и разрядности  $n$  АЦП. Значение  $n$  не должно превышать значения  $n_{max} = \log_2 [(\Phi_{max} - \Phi_{min})/\Phi_n]$ .

По табл. 5.2 находят значение отношения сигнал—шум  $\mu_{ф. вых}$  на выходе предварительного фильтра (на входе АЦП) по заданному значению разрядности  $n$ . Отношение сигнал—шум  $\mu_{ф. вх}$  на входе предусилителя ФМП рассчитывают по формуле

$$\mu_{ф. вх} = \Phi_{min} S_U / (1,127 U_{ш.э}),$$

где  $S_U$  — вольтовая чувствительность приемника излучения.

На выходе предусилителя необходимо получить значение  $\mu_{ф. вх} \geq 100$ , так как в этом случае эффективность линейной фильтрации сигнала приближается к эффективности корреляционно-согласованного фильтра, частотная характеристика которого близка к спектральной характеристике сигнала. Таким образом, предусилитель должен обеспечить ослабление синфазного сигнала в  $K_{ос.сф} = \sqrt{\mu_{ф. вх} / \mu_{ф. вых}} = 10 \sqrt{\mu_{ф. вх}}$  раз. Если задан коэффициент  $K_{yu,сф}$  усиления синфазного сигнала, то можно найти дифференциальный коэффициент усиления по напряжению предусилителя по формуле  $K_{yu} = K_{yu,сф} K_{ос.сф}$ .

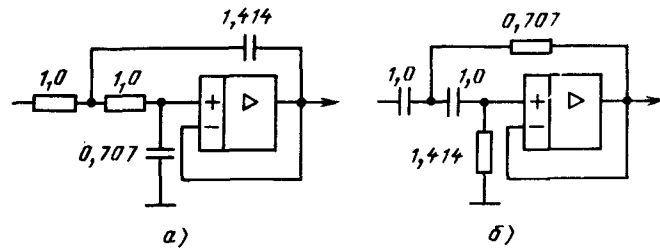


Рис. 5.8. Фильтры нижних и верхних частот

После выбора схемы предусилителя и полосы его пропускания  $\Delta f_{\text{пу}}$  находят отношение  $\mu_{\text{вых. пу}} = \mu_{\text{вх. пу}} K_{\text{ос. сф}}$  и частоту среза фильтра  $f_{\text{ср. ф}} = \Delta f_{\text{пу}} \mu_{\text{вх. пу}} / \mu_{\text{ф. вых.}}$ , которая должна превышать характерную частоту  $f_{\text{ср. ф}}$  спектральной характеристики фотосигнала. Для медленно изменяющихся со скоростью  $\nu$  оптических сигналов  $f_{\text{ср. ф}} = 1/\nu$ ; для синусоидальных фотосигналов  $f_{\text{ср. ф}} = 1/T$  ( $T$  — период колебаний); для сложных периодических оптических сигналов  $f_{\text{ср. ф}} = 20/T_0$  ( $T_0$  — основной период); для одиночных импульсов с длительностью  $t_{\text{и}}$   $f_{\text{ср. ф}} = 1/t_{\text{и}}$ .

Общий коэффициент усиления фотосигнала для системы предусилитель—предварительный фильтр должен составлять

$$K_{\text{У общ}} = K_{\text{У уп. у}} K_{\text{У уф}} = U_{\text{шк}} / S_{\text{У внт}} (\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}),$$

где  $K_{\text{У уп. у}}$ ,  $K_{\text{У уф}}$  — коэффициенты усиления соответственно предусилителя и фильтра;  $U_{\text{шк}}$  — напряжение шкалы АЦП.

Активные фильтры ФМП выполняют на основе операционных усилителей с частотно-зависимыми элементами в цепях обратной связи. Примеры схем фильтров нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот приведены на рис. 5.8. Сопротивления резисторов и емкости конденсаторов фильтров указаны для случая  $f_{\text{ср. ф}} = 1$  кГц. Пересчет на другую частоту среза ведут по формулам

$$R_f = mR_{1,2}; \quad C_f = C_{1,2} / (2\pi m f_{\text{ср. ф}}),$$

где  $m$  — масштабный множитель для подбора используемых на практике номиналов емкостей и сопротивлений [28].

Для построения цифровых ФМП можно использовать АЦП, например, БИС К1113ПВ1 (рис. 5.9, а), с однополярной шкалой 0 ... 10 В (вывод 15 заземлен) или с двуполярной шкалой 5 В (на вывод 15 напряжение не подается). Процесс преобразования начинается при подаче на вывод 11 логического «0». Готовность

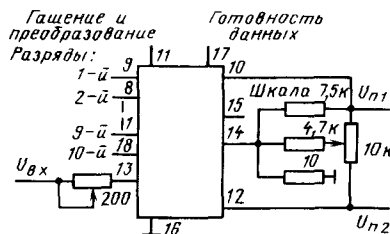


Рис. 5.9. Схема включения БИС К1113ПВ1 в качестве АЦП ФМП

данных для передачи в микроЭВМ или микропроцессор определяется по логическому сигналу, снимаемому с вывода 17 [28].

Ввод аналоговых сигналов в микроЭВМ и микропроцессор осуществляют с помощью стандартных или специализированных интерфейсов, например, ввод цифрового кода, снимаемого с выхода рассмотренных выше схем АЦП, можно осуществить с помощью устройств параллельного обмена цифровыми сигналами.

Измерение спектрального состава рассеянного, отраженного или проходящего через объект излучения позволяет классифицировать объекты, определять качество обработки их поверхности и т. п. Для измерения спектрального состава излучения СТЗ роботов оснащаются спектроанализаторами, выполненными на основе многоканальных или сканирующих ФМП. Возможно построение спектроанализаторов на фоторелейных схемах, если необходимо не измерение спектральных составляющих, а регистрация их наличия.

В СТЗ роботов находят применение следующие схемы простейших спектроанализаторов, выполненные на основе: многоканального ФМП с индивидуальными спектральными фильтрами для каждого канала; ФМП со сменными фильтрами; диспергирующего узла (например, призмы или дифракционной решетки) и многоканального ФМП; диспергирующего узла и сканирующего ФМП (подвижным элементом является диспергирующий узел или приемник излучения ФМП). Более сложные схемы спектроанализаторов (матричные, растровые, Фурье-спектроанализаторы и т. п.) пока не нашли широкого распространения в робототехнике.

### 5.3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВИДЕОПРОЦЕССОРЫ

Аппаратная реализация основных функций СТЗ осуществляется специализированными средствами, так как универсальные вычислительные средства не обеспечивают оптимальные способы хранения и обработки информации, а также требуемого быстродействия.

Ниже приведены основные функции СТЗ и аппаратные средства их реализации.

| Функция   | Аппаратные средства   |
|---|---|
| Регистрация изображения                                   | Фотоприемники, линейки и матрицы фотоприемников, видеодатчики телевизионного типа |
| Кодирование   | Фотореле, фотометрические преобразователи, аналого-цифровые преобразователи       |
| Хранение  | ЗУ с последовательной, параллельной или произвольной выборкой                     |
| Преобразование формы представления, обработка изображения | Видеопроцессоры, специализированные и универсальные микропроцессоры и микроЭВМ    |

В аппаратные средства СТЗ видеосигналы, несущие информацию об изображении, поступают последовательно, параллельно или параллельно-последовательно во времени. Последовательный

Таблица 5.3

## Основные способы первичного кодирования изображения

| Способ кодирования (изображение)                            | Условное представление | Способ реализации  |
|---|------------------------|--|
| Позэлементный бинарный: 101111 (бинарное)                   |                        | Последовательное, параллельно-последовательное подключение к фотореле, к электронным релейным схемам                                 |
| Позэлементный числовой: $a_{ij}, \dots$ (полутоновое)       |                        | Последовательное, параллельно-последовательное аналого-цифровое преобразование видеосигналов   |
| С переменной длиной кода: $l_i, l_{i+1}, \dots$ (контурное) |                        | Подсчет временных интервалов (опорных импульсов) счетчиком, управляемым сигналами от фотореле, на вход которого подается видеосигнал |
| Цепное кодирование: 130006 (контурное)                      |                        | Сочетание следящих устройств, например телевизионного типа, с анализаторами направления траектории слежения                          |

ввод видеосигнала осуществляется, например, при регистрации изображения датчиками телевизионного типа. Параллельно-последовательный ввод характерен для устройств с твердотельными приемниками изображения. Параллельный ввод осуществляется в мозаичных матричных устройствах.

Одной из важнейших функций аппаратных средств СТЗ является кодирование изображения. Основные способы первичного кодирования изображения представлены в табл. 5.3.

Хранение видеoinформации осуществляется в ЗУ трех основных типов. В последовательных ЗУ (рис. 5.10, а) видеoinформация

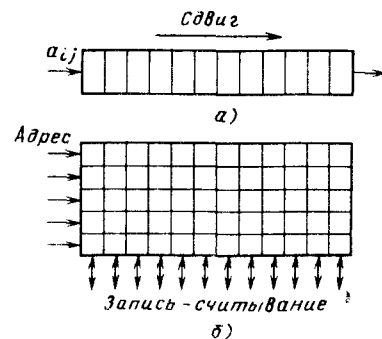


Рис. 5.10. Структуры ЗУ для хранения видеoinформации последовательного и матричного типа

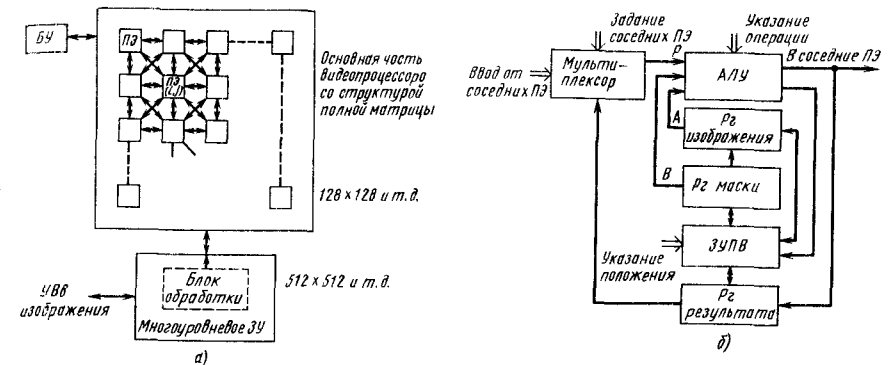


Рис. 5.11. Структуры матричного (клеточного) видеопроцессора и одного процессорного элемента:

БУ — блок управления; ПЭ — процессорный элемент; УВВ — устройство ввода; АЛУ — арифметико-логическое устройство; Рег — регистр; ЗУПВ — запоминающее устройство с произвольной выборкой

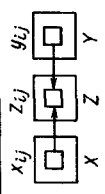
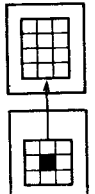
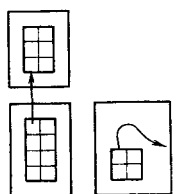

ция вводится поэлементно последовательно во времени и так же считывается. В матричных ЗУ со словарной выборкой (рис. 5.10, б) запись и считывание информации осуществляется параллельно-последовательным способом (по строкам матрицы с заданным адресом — номером строки). В матричных ЗУ с произвольной выборкой возможны запись и считывание видеoinформации с произвольного элемента матрицы при задании его адреса.

Универсальные микропроцессоры и микроЭВМ в основном предназначены для обработки информации, представляемой в виде слов — бинарных кодов с длиной в 1, 2, 3, ... байт (1 байт равен 8 бит), что создает неудобства при обработке видеoinформации. В этой связи созданы специальные аппаратные и аппаратно-программные средства — видеопроцессоры. Структура видеопроцессоров определяется реализуемыми видами обработки видеoinформации (табл. 5.4) [17, 38, 45].

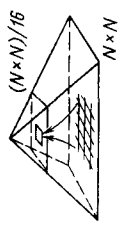
Видеопроцессор матричной (клеточной) структуры содержит двумерный массив процессорных элементов ПЭ (рис. 5.11, а) размерностью  $4 \times 4, 8 \times 8, 16 \times 16, \dots, 256 \times 256$  в зависимости от используемой технической базы. Видеoinформация в матричном представлении разбивается на блоки в соответствии с размерностью массива процессорных элементов и обрабатывается по блочно (по принципу SIMD — один поток команд, множество потоков данных).

Типовая структура процессорного элемента матричного видеопроцессора приведена на рис. 5.11, б. Алгоритм работы видеопроцессора рассмотрим на примере выполнения операции увеличения (фрагмент бинарного изображения  $3 \times 3$  принимает значение «черный» — «1», если как минимум четыре соседних элемента центрального «черного» являются также «черными»). В регистр маски из ЗУПВ вводится массив В (01010101), в регистр изобра-

Основные виды обработки видеoinформации

| Вид обработки  | Условное представление  | Типовые операции   | Рекомендуемая структура видеопроцессора |                            |             |                      |              |                    |
|--|---|--|---|----------------------------|-------------|----------------------|--------------|--------------------|
|  |   |  | матричная (клеточная)                   | пирамидальная (трехмерная) | конвейерная | системная (волновая) | параллельная | мультипроцессорная |
| Операции между изображениями $X$ и $Y$   |   | Сложение, вычитание, сравнение   | +                                       | —                          | +           | +                    | +            | +                  |
| Просторные операции над определенным элементом   |   | Фильтрация, увеличение, уменьшение, пороговая сегментация, свертка, сортировка, корреляция | +                                       | +                          | +           | +                    | +            | +                  |
| Повторные (рекурсивные) операции над окрестностью определенного элемента, отслеживание |   | Увеличение, уменьшение, сегментация, выделение точек, линий                                | +                                       | +                          | +           | —                    | +            | +                  |
| Операции над всем полем изображения  |  | Гистограммы, преобразование Фурье и т. д.  | +                                       | +                          | +           | +                    | +            | +                  |

Продолжение табл. 5.4

| Вид обработки   | Условное представление   | Типовые операции  | Рекомендуемая структура видеопроцессора |                            |             |                      |              |                    |
|---|--|---|---|----------------------------|-------------|----------------------|--------------|--------------------|
|   |  |   | матричная (клеточная)                   | пирамидальная (трехмерная) | конвейерная | системная (волновая) | параллельная | мультипроцессорная |
| Многоуровневые операции над данными с «пирамидальной» структурой                  |  | Быстрый «просмотр», сжатие-расширение, матричные операции | +                                       | +                          | —           | +                    | +            | +                  |
| Операции высшего порядка над сложно закодированными или абстрагированными данными | —  | Классификация, распознавание, интерпретация               | —                                       | —                          | —           | —                    | +            | +                  |

жения из ЗУПВ вводятся массивы  $A$ , соответствующие фрагментам изображения  $(x_1 \dots x_9)$ . Арифметическое устройство выполняет операцию

$$R = \begin{cases} (11111111), & \text{если} \\ & \text{поэлементная} \\ & \text{свертка матриц } A \\ & \text{и } B \text{ дает матрицу } B; \\ A, & \text{если поэлементная} \\ & \text{свертка матриц } A \text{ и } B \\ & \text{не дает матрицу } B \end{cases}$$

В результате матричный видеопроцессор выполняет операцию увеличения. Аналогично выполняются операции уменьшения и сравнения, что дает возможность, например, удалить дефекты  $I, J$  и элементы шума  $H, K$  на изображении  $I$  полосы (рис. 5.12). В увеличенном изображении  $II$  устранены дефекты и слиты элементы шума с увеличенным исходным изображением. Двукратно уменьшенное изображение  $III$  не содержит элементов шума  $H, K$ . Окончательная операция (увеличение), совмещенная со сравнением с исходным искаженным изображением, восстанавливает неискаженное исходное изображение  $IV$  [17].

Пирамидальная структура видеопроцессора (рис. 5.13, а) содержит несколько «слоев» процессорных матриц с межслойными связями (рис. 5.13,

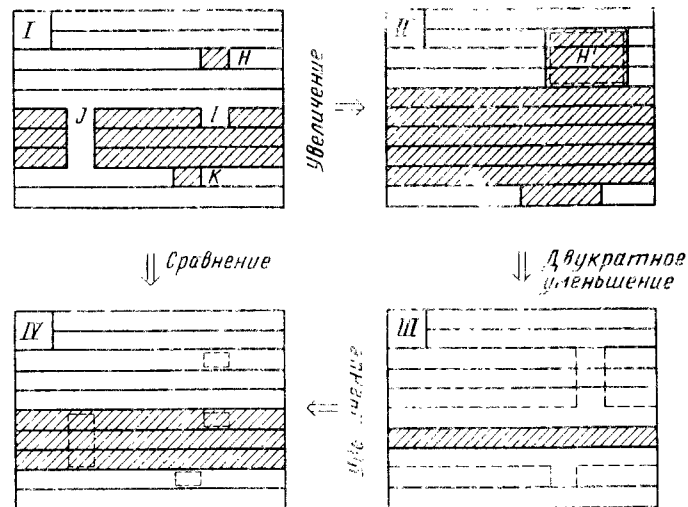


Рис. 5.12. Схема удаления «дефектов» и «шума»

б). Если все процессорные слои имеют одинаковое число процессорных элементов, то реализуется «трехмерная» структура видеопроцессора, принцип действия которого поясняет рис. 5.13, в. Свертка элементов  $x_{11}, \dots, x_{45}$  плоскости изображения с элементами маски, содержащей фрагмент единичных элементов с размерностью  $3 \times 2$ , позволяет выделить в плоскости результирующего изображения фрагмент из элементов  $x_{ij}$  с той же размерностью  $3 \times 2$ .

В конвейерных видеопроцессорах (рис. 5.14, а) процессорные элементы составляют последовательный ряд, поэтому они являются оптимальными для обработки изображений, представляемых растровой (построчной) разверткой.

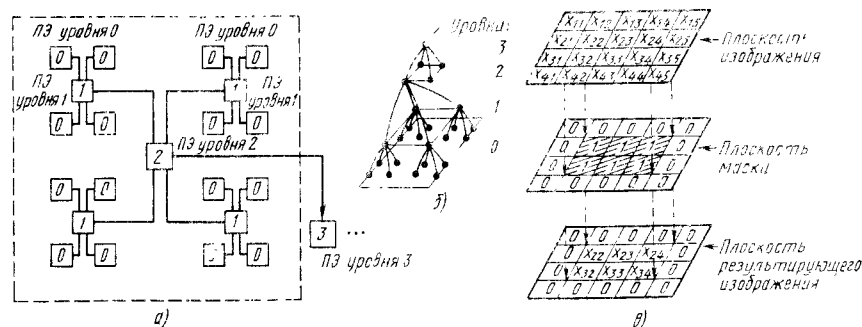


Рис. 5.13. Пирамидальная структура видеопроцессора и схема, поясняющая принцип выполнения простейших операций над изображениями в трехмерной процессорной структуре

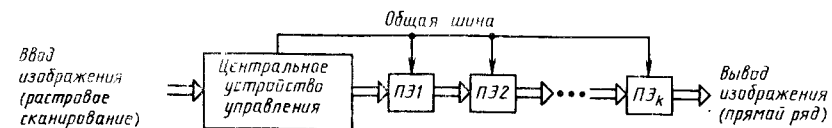


Рис. 5.14. Структура конвейерного видеопроцессора

Принцип работы конвейерного видеопроцессора, состоящего из четырех процессорных элементов  $P31-P34$ , поясняет алгоритм выполнения операции свертки матрицы  $4 \times 3$ :

$$S(i) = A(i, 1) + A(i, 2) + A(i, 3),$$

где  $i = 1, 2, \dots, 4$ ;  $A(i, j)$  — элементы исходной матрицы;  $S(i)$  — элементы строки — свертки.

В каждом такте работы конвейера осуществляется: ввод видеoinформации; операция суммирования; операция передачи информации между процессорными элементами.

Видеопроцессоры со систолической структурой содержат регулярную сеть процессорных элементов, каждый из которых работает циклически, чередуя прием и передачу видеoinформации, подобно элементам конвейерных видеопроцессоров. На рис. 5.15 приведена структура, реализующая, например, матричную операцию  $D = A \cdot B + C$  за число тактов, соответствующее размерности матриц.

Видеопроцессоры с параллельной (рис. 5.16, а) структурой содержат ряд аппаратных специализированных процессоров для

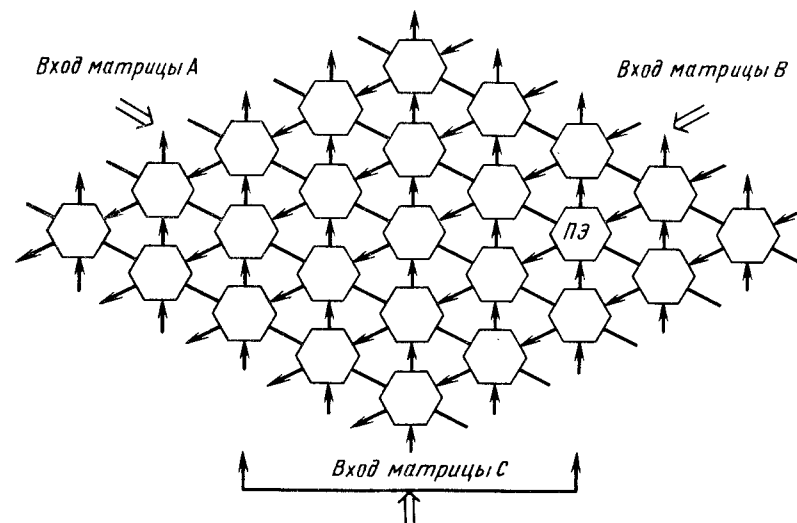


Рис. 5.15. Систолическая структура видеопроцессора



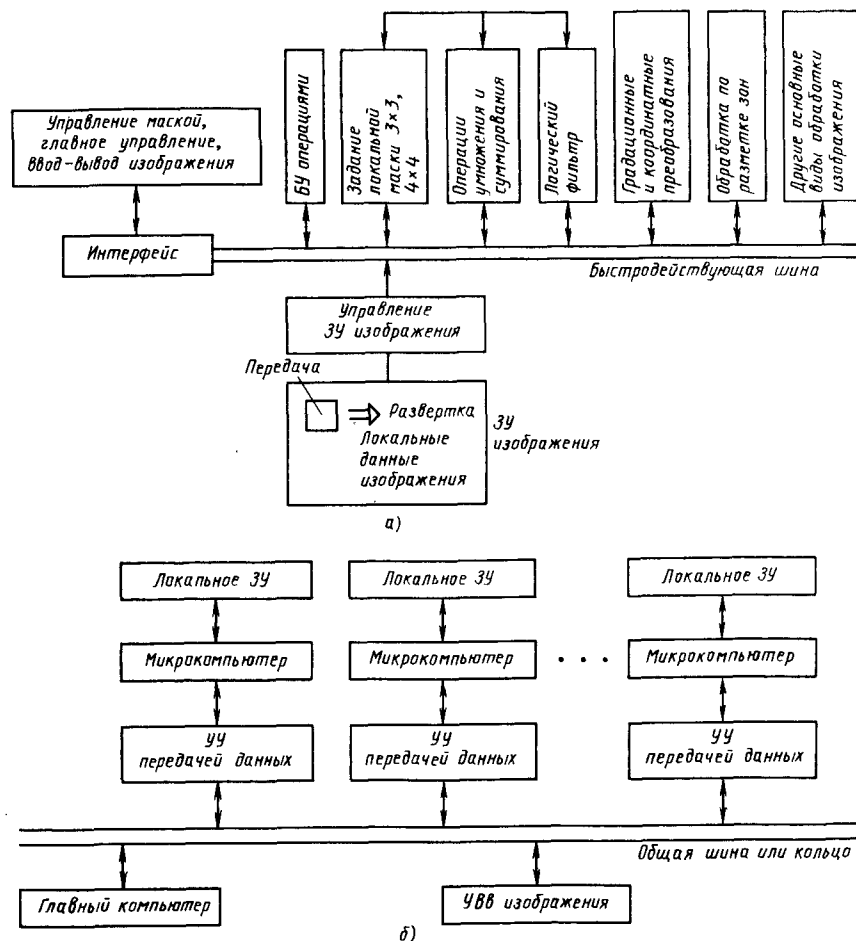


Рис. 5.16. Видеопроцессоры с параллельной и мультипроцессорной структурами

решения частных задач, связанных общей быстродействующей шиной передачи видеoinформации. Процессорные элементы выполняют свои функции параллельно во времени. Так как создание процессоров сопряжено со значительными аппаратными затратами, то видеoinформация обрабатывается по фрагментам.

Видеопроцессоры с мультимикропроцессорной структурой (рис. 5.16, б) позволяют реализовать необходимое быстродействие путем объединения ряда универсальных микропроцессоров общей шиной, кольцевой шиной или коммутируемой сетью. Быстродействие видеопроцессоров принято измерять в единицах MOPS (*million of pixels per second*) — миллион пикселей (элементов изображения) в секунду [17].

#### 5.4. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Для измерения линейных и угловых величин СТЗ роботов оснащаются фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП), обладающими высокой точностью и хорошим быстродействием.

Аналоговые ФЭП часто выполняются на основе координатных приемников (см. п. 4.1), передающих телевизионных камер (см. п. 4.4), одно- и многоканальных ФМП (см. п. 5.2). Различные схемы построения аналоговых ФЭП описаны в литературе (см., например, [5, 48]). Некоторые алгоритмы получения информации о пространственном положении наблюдаемых СТЗ объектов были приведены в предыдущих главах.

Рассмотрим в качестве примера схему построения ФЭП для определения линейных или угловых координат, а также габаритных размеров и ориентации неподвижных и движущихся объектов, разработанную в Томском институте автоматизированных систем управления и радиоэлектроники под руководством проф. И. Н. Пустынского.

В ФЭП использован приемный объектив типа «Индустар» с относительным отверстием 1:3,5 и фокусным расстоянием 50 мм. В качестве приемника-анализатора используется диссектор ЛД605-1.

ФЭП работает в двух режимах — обучения и рабочем. В режиме обучения сначала осуществляется автоматическое обнаружение эталонного объекта, помещающего в угловое поле объектива, и измерение его координат, поиск «центра» изображения. Затем растр обнаружения автоматически отключается и включается измерительный растр, центр которого совмещается с «центром» изображения эталонного объекта. В запоминающее устройство записываются габаритные размеры эталона и порядок их следования при определенном наборе углов поворота растра относительно изображения.

В рабочем режиме выполняются следующие операции: автоматическое включение растра обнаружения; измерение габаритных размеров объекта по двум осям координат; определение координат «центра» изображения объекта; выключение растра обнаружения; включение растра измерения; совмещение его с центром объекта, измерение размеров объекта для всех углов поворота растра; запись их в ОЗУ; уточнение координат центра объекта; определение максимального и минимального размеров объекта и его ориентации; определение формы объекта. Считывание и обработка информации об объекте осуществляются одновременно с обнаружением и определением координат следующего объекта. Работа в параллельных режимах повышает быстродействие ФЭП.

Для повышения точности и уменьшения объема обрабатываемой информации применены режим обнаружения и грубого определения размеров и координат объекта в широком угловом поле

и режим определения размеров, ориентации объекта и его формы в малом угловом поле, значение которого выбирают пропорциональным габаритным размерам объекта, а центр совмещают с центром обнаруженного объекта. В режиме обнаружения растр поворачивается на угол  $90^\circ$  вокруг своего центра, а в режиме измерения — вокруг центра объекта. Это позволяет проводить обработку видеоинформации только в направлении кадровой развертки и определять параметры объекта путем подсчета и запоминания числа строк, в которых сигнал обнаружен, и строк, в которых сигнал отсутствует.

Система имеет следующие характеристики:

| В режиме обнаружения  |             |
|---|-------------|
| Размер раstra на фоточувствительной площадке, мм  | 22          |
| Угловое поле, °   | 20          |
| Число строк   | 256         |
| Время определения размера, мс   | 50          |
| Относительная погрешность измерения координат и размеров (в долях от всего углового поля), %  | 0,8         |
| В режиме измерения  |             |
| Размер раstra, мм   | 2 ... 8     |
| Угловое поле, °   | 1,9 ... 7,0 |
| Число строк в измерительном растре  | 64          |
| Число дискретных положений раstra по углу поворота  | 16          |
| Время определения размера при одном угле поворота, мс   | 12          |
| Относительная погрешность определения размеров (в долях углового поля), %   | 0,2 ... 1,0 |
| Время определения размеров, координат, ориентации и формы объекта, с  | 0,2         |
| Уровни выходного сигнала, В (сигнал имеет вид 8-разрядного двоичного кода)  | 0,3; 3,0    |
| Освещенность объекта, не менее, лк (при контрасте не менее 0,5 и отношении сигнала к уровню помех от неоднородностей фона больше 4) | 500         |

Основные инструментальные погрешности измерения линейных и угловых величин аналоговыми ФЭП определяются нелинейностью и нестабильностью координатной характеристики координатных приемников, погрешностями оптико-механических узлов, в первую очередь анализаторов изображения, погрешностями ФМП, а также нестабильностью формы и освещенности изображения наблюдаемого объекта в плоскости анализа приемной оптической системы преобразователя [52].

В амплитудно-фазовых ФЭП оптическая система формирует малоразмерное изображение объекта, информацию о положении которого в угловом поле несут амплитуда и фаза фотосигнала. Фотоприемное устройство такого ФЭП содержит оптическую систему 1, растровый анализатор-модулятор 2, выполненный, например, в виде вра-

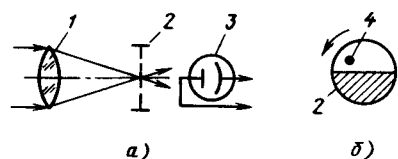


Рис. 5.17. Преобразователь с анализатором-полудиском:  
а — структурная схема; б — вид плоскости анализа

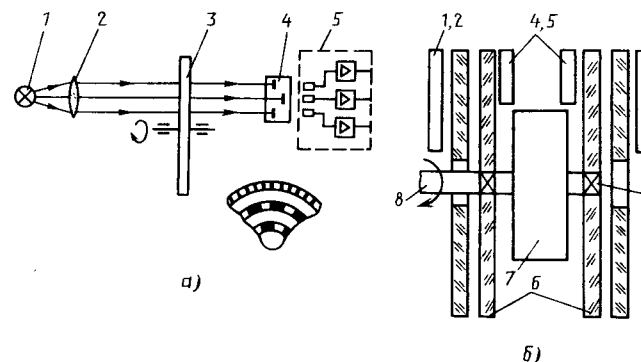


Рис. 5.18. Схема ФЭП-15

щающегося полудиска (рис. 5.17, а), и фотометрический приемник 3, регистрирующий мгновенное значение фотосигнала. При изменении положения изображения 4 (на рис. 5.17, б оно имеет форму круглого пятна) в плоскости анализатора изменяются амплитуда и фаза сигнала на выходе приемника. Амплитуда переменной составляющей сигнала при небольших смещениях изображения от оси вращения анализатора пропорциональна значению смещения, а фаза определяет фазовый угол в полярной системе координат. Разнообразные конструкции ФЭП такого типа, различающиеся видом раstra, оптическими системами и т. п., описаны, например, в [25, 52].

Во время импульсных (фазоимпульсных) ФЭП информация о положении объекта преобразуется во временные интервалы или фазу электрических сигналов (импульсов). В таких ФЭП в качестве анализаторов используют подвижные анализаторы в виде щелевых диафрагм как прямолинейной, так и более сложной формы (например, в виде спирали Архимеда или эвольвенты), а также диафрагмы-заслонки, перекрывающие световой пучок, образующий изображение наблюдаемого объекта. В ряде ФЭП анализатор неподвижен, а по нему перемещается изображение, что достигается оптическими сканирующими системами. Различные схемы построения ФЭП времяимпульсного типа рассмотрены, например, в [5, 52].

Цифровые ФЭП выполняются обычно на основе фотореле, регистрирующих: оптические коды (растры), нанесенные на вращающиеся диски или линейки; число муаровых полос, возникающих при смещении одного раstra относительно другого; число интерференционных полос в интерферометрических схемах.

Типичная схема построения цифрового кодового ФЭП (на примере преобразователя ФЭП-15 [51]) приведена на рис. 5.18, а. ФЭП содержит осветительную систему 1, 2, кодовый диск 3, диафрагму 4 и фотоприемное устройство 5 (группу фотореле). На кодовый диск может быть нанесен двоичный код, двоично-десятичный код, код Грея и т. п. Погрешность преобразователя

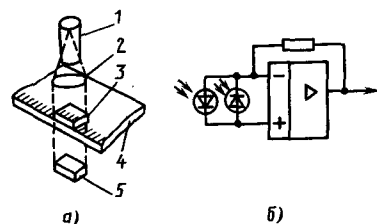


Рис. 5.19. Преобразователь с муаровыми полосами:  
а — функциональная схема; б — схема включения фотоприемников

такого типа определяется качеством изготовления кодового диска и его разрядностью. Для повышения разрядности используют несколько кодовых дисков. В преобразователе ФЭП-15 имеется два однотипных диска 6, соединенных между собой через редуктор 7 с передаточным числом  $i = 2^4 = 16$  (рис. 5.18, б). На входном валу 8 ФЭП закреплен диск, с которого считываются 11 младших разрядов кода, а на выходном валу 9 редуктора — диск, с которого считываются четыре старших разряда. Дополнительный разряд, необходимый для синхронизации схем обработки релейных сигналов, считывается со второго диска. Пятнадцатиразрядный преобразователь ФЭП-15 имеет разрешающую способность 2048 дискрет/об (общее число кодовых комбинаций 32 768) и допускает вращение входного вала с частотой до 900 мин<sup>-1</sup>; габаритные размеры преобразователя 71 × 140 мм.

В растровых ФЭП регистрация линейных или угловых смещений осуществляется путем подсчета фоторелейными схемами подвижных световых муаровых полос, образующихся при прохождении светового пучка, формируемого осветительной системой 1, 2, через растры 3, 4, один из которых неподвижен, а другой подвижен и жестко связан с объектом (рис. 5.19, а). Фотоприемное устройство 5 таких ФЭП выполняется на основе дифференциальной схемы включения приемников излучения (рис. 5.19, б), исключающей влияние постоянной составляющей сигнала на ре-

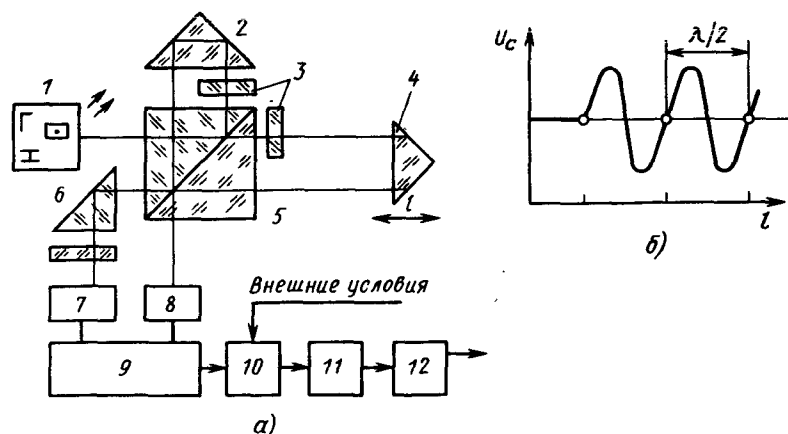


Рис. 5.20. Типовая схема интерферометра

зультаты измерений. Для формирования сигнала, несущего информацию о направлении вращения или линейного смещения, фотоприемное устройство содержит по крайней мере две дифференциальные пары приемников излучения, с которых снимаются сдвинутые по фазе сигналы. Знак фазового сдвига фотосигналов дает информацию о направлении вращения или линейного смещения объекта.

Отечественная и зарубежная промышленность выпускает ряд ФЭП рассмотренного типа. Основные характеристики некоторых из них приведены в табл. 5.5.

К числу наиболее точных устройств для измерения линейных и угловых величин относятся *интерферометрические* ФЭП. Типовая схема интерферометра приведена на рис. 5.20, а. ФЭП содержит одночастотный лазер 1, светоделительный кубик 5, подвижный 4 и неподвижный 2 уголкового отражателя, которые образуют собственно интерферометр. Для устранения влияния вибраций и построения электронной схемы, чувствительной к направлению смещения отражателя, связанного с объектом, в интерферометр введены четвертьволновые пластинки 3 и поляризаторы 6, а также два фотоприемных устройства 7 и 8, регистрирующие фотосигналы. В блоке 9 формируются цифровые сигналы, которые корректируются в блоке 10 с учетом

Таблица 5.5

Сравнительные характеристики ФЭП

| Типовые параметры                                | Тип преобразователя                              |   |   |   |  |   |      |
|--|--|---|---|---|--|---|------|
|  | BE-51 В  | BE-106  | IRC-111   | ROD 120   | mini-ROD                                       | Величина  | 23 L |
|  | СССР   |   | ЧССР  | ФРГ   |  |   |      |
|  |  |   |   |   |  |   |      |
| Число отсчетов на оборот                         | (1 ... 5) · 10 <sup>3</sup>                      | 1000; 1024                                    | 200 ... 2500  | 360 ... 18 000                                    | 100 ... 3600                                   | 96 ... 2500                                     | 3    |
| Число выходных сигналов                          | 6  |   |   |   |  |   |      |
| Максимальная частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 3 · 10 <sup>3</sup><br>50<br>±1<br>100×96<br>1,5 | 3 · 10 <sup>3</sup><br>50<br>±2,5<br>—<br>0,6 | 6 · 10 <sup>3</sup><br>150<br>±2,5<br>80×126<br>1,5 | 6 · 10 <sup>3</sup><br>100<br>—<br>100×100<br>1,7 | 3 · 10 <sup>3</sup><br>50<br>—<br>36×36<br>0,1 | 6 · 10 <sup>3</sup><br>100<br>—<br>58×70<br>0,6 | 3    |
| Рабочая частота, Гц                              |  |   |   |   |  |   |      |
| Погрешность, %                                   |  |   |   |   |  |   |      |
| Габаритные размеры, мм                           |  |   |   |   |  |   |      |
| Масса, кг  |  |   |   |   |  |   |      |

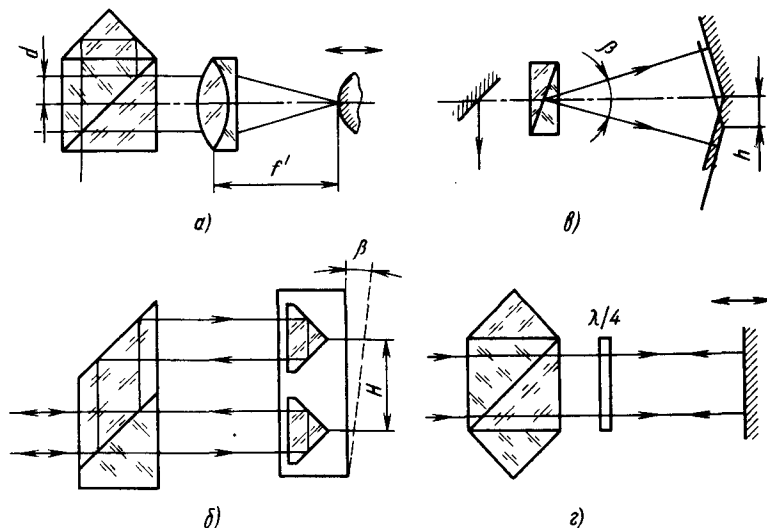


Рис. 5.21. Схемы интерферометрических ФЭП

условий внешней среды (давления, температуры, влажности). Число интерференционных полос регистрирует реверсивный счетчик 11. Цифровой код, представляющий результаты измерений, передается в устройство сопряжения 12 с ЭВМ. Распределение потока излучения в интерференционной картине во времени или по координате  $l$ , что то же самое при постоянной скорости смещения объекта, показано на рис. 5.20, б. Изменение разности фаз  $\Delta\varphi$  лучей в интерферометре, определяющее амплитуду фотосигнала  $U_c = U_0 \cos(\Delta\varphi)$ , связано с линейным смещением  $\Delta l$ , так как  $\Delta\varphi = (4\pi/\lambda) \Delta l$ .

На основе интерферометров строят ФЭП различного назначения. Фокусировка излучения на поверхности объекта (рис. 5.21, а) позволяет использовать отраженный сигнал для регистрации его малых смещений. Изменение фазы оптического сигнала  $\Delta\varphi$  связано с перемещением  $\Delta l$ :  $\Delta\varphi = (4\pi/\lambda) (f' / \sqrt{a^2 + f'^2}) \Delta l$ .

Для измерения угла поворота отражателя, закрепленного на объекте, используется автоколлимационная схема (рис. 5.21, б). При наклоне на угол  $\beta$  разность фаз изменяется на  $\Delta\varphi = (4\pi/\lambda) H \sin \beta$ . Схема интерферометра, чувствительного к направлению смещения, показана на рис. 5.21, в. При смещении отражателя на  $h$  возникает сдвиг фаз  $\Delta\varphi = (4\pi/\lambda) h \sin(\beta/2)$ , где  $\beta$  — угол между лучами после светоделителя. В схеме, представленной на рис. 5.21, г, возвращенные в светоделительное устройство пучки лучей создают систему интерференционных полос, которая не зависит от угла наклона плоского отражателя

и весьма чувствительна к его продольным линейным смещениям. Схемы такого типа находят применение в высокоточных координатных столах робототехнических систем.

## 5.5. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ И ФОКУСИРОВКИ

Оптико-механические системы видеосенсоров СТЗ роботов по способу наведения и фокусировки подразделяют на три группы: 1) с «жесткими» наведением и фокусировкой, устанавливаемыми на этапе монтажа и наладки СТЗ; 2) с управляемыми с пульта оператора наведением и фокусировкой; 3) с автоматическими наведением и фокусировкой.

Системы автоматической фокусировки, в свою очередь, разделяют на *активные* и *пассивные*. Основу активных систем составляет дальномер с источником ультразвуковых волн, радиоволн, пучка инфракрасных лучей или видимого модулированного излучения [51].

В *ультразвуковых дальномерах* к объекту направляются волны нескольких различных частот в диапазоне 40 ... 80 кГц и измеряется время их распространения до объекта и обратно. По времени распространения определяют расстояние до объекта и устанавливают объектив оптико-механической системы в одну из возможных позиций с помощью исполнительного механизма. В ультразвуковой системе, в отличие от других систем, рассматриваемых ниже, угол рассеяния посылаемого пучка довольно широк, поэтому настройку ведут на самое «быстрое» эхо, что соответствует фокусировке на ближайший к видеосенсору объект, попадающий в угловое поле ультразвукового пучка.

В *инфракрасных системах автоматической фокусировки* базу дальномера составляют два окна, расположенные на определенном расстоянии друг от друга. Сзади одного окна находится источник инфракрасного излучения (светодиод), сзади другого —

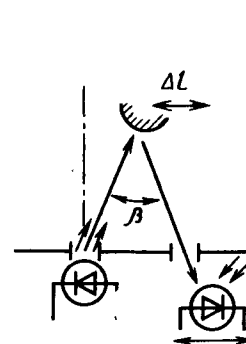


Рис. 5.22. Базовый способ фокусировки

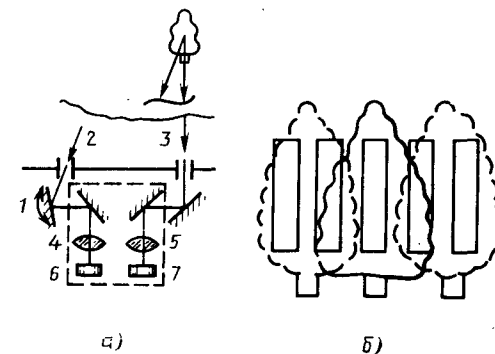


Рис. 5.23. Схема корреляционного дальномера

приемник излучения (кремниевый фотодиод). Объект освещается узким пучком инфракрасного излучения, а фотодиод смещается исполнительным механизмом в направлении базы дальномера, пока на него не попадет отраженный от объекта пучок излучения (рис. 5.22). Смещение объекта на расстояние  $\Delta l$  вызывает смещение пучка излучения на  $\Delta x = 2 \Delta l \operatorname{tg} \beta$ , где  $\beta$  — угол параллакса. Одновременно со смещением фотодиода смещается соответствующий узел объектива для фокусировки изображения, положение которого фиксируется в момент времени, соответствующий максимуму сигнала на фотодиоде. Вместо подвижного одиночного фотодиода можно использовать МЭПИ, например, линейку фотодиодов или фоторезисторов. В такой системе объектив устанавливается в положение, определяемое тем, на какой именно элемент МЭПИ попадает отраженный от объекта пучок инфракрасного излучения [51].

Известны различные способы построения пассивных систем автоматической фокусировки. Разностные (корреляционные) схемы содержат два идентичных МЭПИ 6 и 7, на которые проецируются объективами 4, 5 два изображения объекта через окна 2 и 3, разнесенные на некоторое расстояние (рис. 5.23, а). Для поперечного смещения одного изображения относительно другого предусмотрен компенсатор в виде поворотного зеркала 1. При точной фокусировке изображения объекта на обоих МЭПИ совпадают (случай несовпадения показан на рис. 5.23, б).

Каждый МЭПИ может состоять, например, из пяти отдельных элементов. Фотосигналы от соответствующих элементов МЭПИ сравниваются попарно. Минимальная сумма разностных сигналов наблюдается в момент совпадения двух изображений, т. е. в момент точной фокусировки. В данном устройстве исполнительная электромеханическая система должна отслеживать минимум суммарного разностного сигнала с МЭПИ [51].

Существенным недостатком рассмотренной выше системы является возможность «ложной» фокусировки, обусловленной наличием локальных минимумов на кривой зависимости разностного сигнала с МЭПИ от смещения компенсатора.

В системе автоматической фокусировки с памятью, где указанный недостаток устранен, вначале объектив неподвижен, а зеркало компенсатора поворачивается из положения на «бесконечность» в положение на кратчайшее расстояние до объекта  $l_{\min}$ . При этом регистрируется разностный (корреляционный) сигнал. Специальная электронная схема запоминает, при каком положении компенсатора наблюдался абсолютный минимум сигнала, соответствующий точной фокусировке. Затем компенсатор вместе с объективом из положения, соответствующего  $l_{\min}$ , перемещается на найденное расстояние  $l_0$ , соответствующее абсолютному минимуму суммарного разностного сигнала.

В подобных системах автоматической фокусировки можно использовать только один МЭПИ, если сравнение двух проеци-

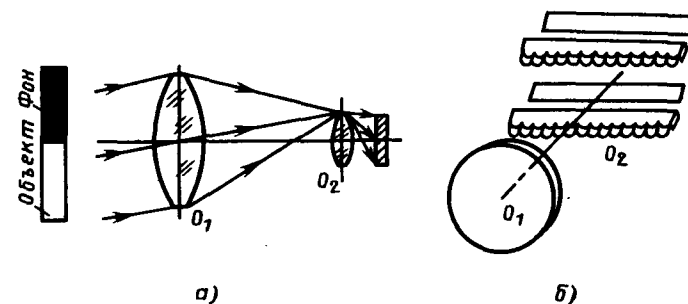


Рис. 5.24. Система автоматической фокусировки, работающая по принципу «нулевого контраста»:

а — общая схема; б — схема с линзовым растром

руемых на него изображений выполнять с помощью заслонки-модулятора, а для запоминания аналоговых фотосигналов использовать схемы выборки-хранения.

В системах автоматической фокусировки, работающих по принципу «нулевого контраста», вблизи плоскости изображения фокусируемого объектива вместо МЭПИ используется второй, более короткофокусный объектив (рис. 5.24). Регистрирующий МЭПИ помещается вблизи заднего фокуса второго объектива (в плоскости выходного зрачка оптической системы, состоящей из двух объективов). Система из двух объективов обладает следующим свойством: в положении, соответствующем точной фокусировке, фоточувствительные площадки МЭПИ освещены наиболее равномерно, граница между фоном и объектом размыта. При расфокусировке равномерность освещения элементов МЭПИ нарушается. При значительной расфокусировке в плоскости МЭПИ можно видеть изображение фона или объекта.

В системах автоматической фокусировки такого типа второй объектив выполняют в виде линзового растра, располагаемого вдоль предполагаемой границы между объектом и фоном в плоскости изображения фокусируемого объектива (рис. 5.24, б).

Применение МЭПИ, например фотодиодных линеек или ПЗС, позволяет строить системы автоматической фокусировки, основанные на сравнении уровня контрастности изображений, получаемых в плоскостях, смещенных на расстояние  $\pm \Delta l$  относительно плоскости изображений фокусируемого объектива вдоль его оптической оси. Изображения на МЭПИ, выполненные в виде линеек фотодиодов, проецируются с помощью полупрозрачных зеркал и отражающего зеркала. Установке объектива на точную фокусировку соответствует минимальная разность фотосигналов, снимаемых с МЭПИ. При расфокусировке контраст изображений в плоскости одного из МЭПИ возрастает, разностный сигнал увеличивается. Знак разностного сигнала определяет направление перемещения объектива [51].

Автоматическая фокусировка и наведение видеосенсоров СТЗ роботов осуществляются достаточно медленно действующими исполнительными электромеханическими устройствами. Большие затраты времени на фокусировку и наведение (1 ... 5 с) накладывают существенное ограничение на количество и частоту выполнения таких операций в технологических циклах работы СТЗ промышленных роботов.

### 5.6. ОПТИЧЕСКИЕ ТРЕХМЕРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Во многих промышленных роботах необходимо определять положение контролируемого объекта или отдельных его точек в трехмерном пространстве. Простейшие СТЗ, предназначенные для решения таких задач, либо строят по классической стереоскопической схеме, либо используют двумерный анализатор плоских изображений, например, координатный или матричный фотоприемник в сочетании с дальномерным устройством.

Простейшей стереоскопической схемой геометрического типа является оптическая система, состоящая из двух одинаковых объективов  $O_1$  и  $O_2$  с параллельными оптическими осями. Главные точки объективов (см. ГОСТ 7427—76) расположены на одной линии (линии базы), перпендикулярной к оптическим осям (рис. 5.25).

Если выбрать начало координат  $O$  в середине линии базы длиной  $B$ , то, измеряя координаты изображений  $x_1$  и  $x_2$  произвольной точки  $A$  и их разность  $p = x_1 - x_2$ , называемую линейным параллаксом, можно определить координату  $X$  точки  $A$ :

$$X = B(0,5 - x_2/p).$$

Две другие координаты (на рис. 5.25 не показаны)

$$Y = -By/p; Z = f'B/p,$$

где  $y = y_1 = y_2$  — координата изображений точки по оси  $y$ , перпендикулярной к плоскости чертежа;  $Z$  — ось системы координат, направленная от середины базы  $O$  к плоскости предметов.

Одной из основных проблем при использовании подобных устройств пассивного типа, т. е. без подсветки объекта, является

обнаружение идентичных точек, для которых измеряется параллакс. В случае простых по форме объектов часто используют края изображений, но и в этом случае объем программной обработки бывает большим. Для его уменьшения применяют иерархический

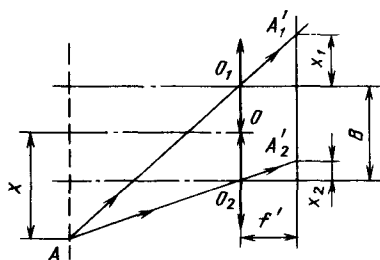


Рис. 5.25. Стереоскопическая схема дальмера геометрического типа

принцип, при котором сначала идентифицируются наиболее крупные детали объекта, а затем все более мелкие. Однако при неравномерной или меняющейся в процессе работы СТЗ освещенности объекта и при наличии дисторсии по угловому полю СТЗ этот путь достаточно сложен.

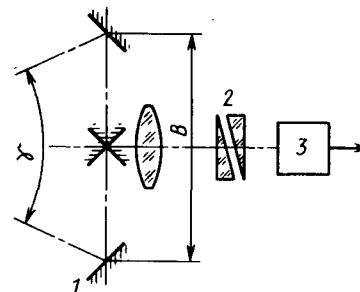
Другими способами решения проблемы являются масштабирование и оконтуривание изображений, применение специальных меток или марок на объектах, а также методы оптической корреляции. Частично эти способы уже рассмотрены в настоящей книге (см. гл. 2 и 5).

Дальномерные устройства (*дальмеры*), используемые в СТЗ, можно разделить на: 1) геометрического типа (пассивные и активные); 2) локационные (с импульсной и фазовой модуляцией); 3) интерференционные; 4) дифракционные.

Среди дальмеров первой группы наиболее широко используются *базовые дальмеры*, действующие по триангуляционной схеме. В них измеряется параллактический угол, образованный направлениями на концы некоторой измерительной базы. Эта база может быть расположена внутри дальмера или на объекте. Возможны схемы и с двумя базами: на объекте и в приборе.

Разновидностью дальмеров геометрического типа, в которых не нужно обнаруживать идентичные точки, являются устройства с оптической корреляцией. Например, в схеме, представленной на рис. 5.26, формируются два наложенных одно на другое изображения объекта. При изменении расстояния до объекта эти изображения расходятся. Поворачивая зеркала 1 (рис. 5.26), а также используя оптические компенсаторы (например, клиновый 2, см. рис. 5.26), фиксируют максимум сигнала на выходе оптического коррелятора (на выходе приемника 3), соответствующий максимуму функции взаимной корреляции двух изображений, имеющему место при их совпадении. Угол поворота объектива, зеркала или компенсатора, т. е. изменение параллактического угла  $\varphi$ , при постоянной базе пропорционален изменению расстояния до объекта.

На рис. 5.27 приведена упрощенная схема оптического дальмера с постоянной внутренней базой на основе жидкокристаллического датчика взаимной корреляционной функции (ВКФ).



Изображения, получаемые в двух оптических каналах дальмера, через объективы 1 и 2 проецируются на датчик 3 ВКФ, создавая в плоскости фоточувствительных слоев этого датчика распре-

Рис. 5.26. Дальмер с базой внутри прибора

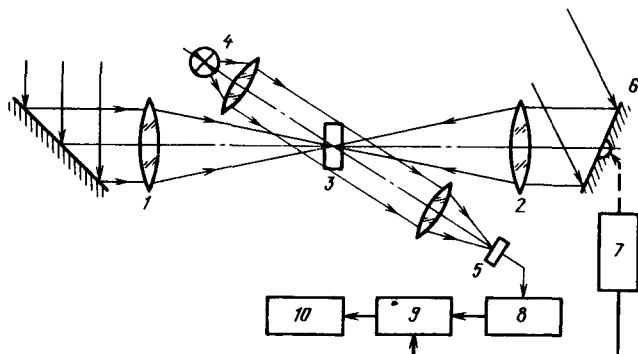


Рис. 5.27. Дальномер корреляционного типа с жидкокристаллическим датчиком взаимной корреляционной функции

деления освещенностей  $E_1(x, y)$  и  $E_2(x, y)$ . Датчик ВКФ представляет собой многослойную конструкцию, включающую две симметрично расположенные структуры типа «фотополупроводник — жидкий кристалл». В результате двукратной амплитудной модуляции интегральный световой поток  $\Phi$ , создаваемый системой подсветки 4 и поступающий на фотоприемник 5, пропорционален ВКФ:

$$\Phi = \frac{k}{A} \int_A E_1(x, y) E_2(x + x_0, y + y_0) dx dy,$$

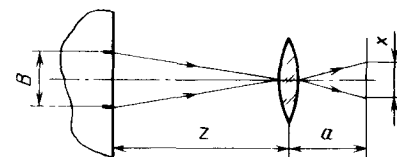
где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $A$  — область, по которой осуществляется процесс корреляции, ограниченная площадью изображения на датчике ВКФ.

Ввиду малости параллактического угла изображения в каналах дальномера идентичны; они сдвинуты относительно друг друга, поэтому можно рассматривать автокорреляционную функцию, имеющую максимум при совмещении изображений. Для определения угла, соответствующего совмещению изображений на датчике ВКФ, проводят сканирование оптической системы в одном из оптических каналов с помощью зеркала 6, управляемого блоком сканирования 7.

Сигналы с фотоприемника поступают на устройство 8, выделяющее максимум автокорреляционной функции. Координатор 9 формирует сигнал, пропорциональный параллактическому углу. Блок регистрации 10 по заданному значению базы дальномера и полученному значению угла вычисляет расстояние до наблюдаемого объекта.

Наиболее просто задача определения дальности  $z$  до объекта решается, если измерительную базу  $B$  удастся создать на объекте (рис. 5.28). При известных  $B$  и  $a$  необходимо измерить  $x$  и рассчитать  $z = Ba/x$ .

Рис. 5.28. Схема дальномера с базой на объекте



Очевидно, что  $z$  является монотонной функцией  $x$  и что зависимость  $z = f(x)$  нелинейна, т. е. точность измерения  $z$  зависит от абсолютного ее значения. Наибольшее распространение в СТЗ получили дальномеры с базой внутри прибора. Часто базой является расстояние между узловыми точками объективов или между изображениями этих точек, построенными системой призм или зеркал, формирующей параллактический угол  $\gamma$ . Дальномеры с базой внутри прибора могут иметь постоянную базу и изменяющийся в зависимости от дальности  $z$  параллактический угол  $\gamma$  или постоянный  $\gamma$  при переменной  $B$ . При изменении высот и углов падения лучей на оптические элементы, образующие базу (зеркала, призмы, объективы), в плечах базы ход этих лучей различен, поэтому база  $B$  изменяется, т. е. понятие постоянства  $B$  или  $\gamma$  становится условным, что и следует учитывать при достаточно точных измерениях  $z$ .

Очень часто в таких дальномерах для измерения рассогласований  $x$  используют оптические и оптико-механические компенсаторы — клинья, пластины, телескопические линзы и некоторые другие, а также высокоточные анализаторы [52]. Погрешности автоматического определения или считывания рассогласования составляют десятые и сотые доли миллиметра или угловой секунды. При выборе компенсаторов часто особое внимание приходится уделять скорости их перемещения, так как она в значительной степени определяет быстродействие всей СТЗ и возможность провести многократное измерение дальности с усреднением получаемых при этом результатов. В то же время следует отметить, что при изменении расстояния до контролируемого объекта иногда приходится осуществлять перемещения одного или нескольких компонентов оптической системы СТЗ, например, поворачивать зеркала в схеме, представленной на рис. 5.26, или перемещать вдоль оптической оси один или несколько компонентов объектива (см. п. 3.3). Все это заметно усложняет конструкцию дальномера СТЗ.

Достаточно общая методика точностного анализа и расчета базовых дальномеров геометрического типа приведена в [7].

Часто дальномеры геометрического типа работают активным методом, т. е. с подсветкой объекта. Простейшей схемой такого типа является схема проекции одной точки (марки) на поверхность объекта и получения изображения этой точки в плоскости анализа. Смещение изображения точки относительно некоторого нулевого положения дает сигнал, пропорциональный расстоянию до объекта. Проецируемую точку можно сканировать по поверхности объекта, что позволяет получить информацию о рельефе его поверхности.



Часто на поверхность объекта проецируется не точка, а линия или совокупность линий, например, световая сетка. Ряд устройств такого типа описан в [80]. Схема одного из них приведена на рис. 5.29.

Источники излучения 3 с помощью передающих оптических систем, например цилиндрических линз 4, создают на поверхности конвейера 6 изображение прямой линии 7. При попадании в угловое поле приемного объектива 2 объекта (детали) 5 изображение световой линии 7 в плоскости анализатора 1 раздваивается. Значение «раздвоения», т. е. расстояние между участками линии 7 на поверхности объекта, измеряемое с помощью анализатора 1, пропорционально высоте объекта 5, т. е. расстоянию между верхней плоскостью объекта и приемной системой. Сигнал с фотоприемника 10 поступает на вычислительное устройство 9, куда приходит также сигнал от датчика 8 скорости конвейера.

Обобщенная оптическая схема дальномерного устройства описанного типа представлена на рис. 5.30. В плоскости  $x-z$  координата  $z$  некоторой точки  $(x, y, z)$

$$z = x \operatorname{tg} \theta + d.$$

В плоскости анализа координата этой точки  $x_a$  определится как

$$x_a = ax/(z-a).$$

Малому изменению  $z$  соответствует сдвиг изображения точки в плоскости анализа на  $\Delta x_a$ . Чувствительность к перемещению вдоль оси  $z$  составит

$$S_z = \frac{\Delta x_a}{\Delta z} = -\frac{a}{(z-a) \operatorname{tg} \theta} + \frac{a(z-d)}{(z-a)^2 \operatorname{tg} \theta}.$$

Угол  $\theta$ , определяющий ориентацию пучка, создаваемого передающей системой, выбирают так, чтобы в достаточно большом диапазоне расстояний  $z$  обеспечивалась номинальная чувствительность. Максимальная чувствительность обычно реализуется для  $z = d$ .

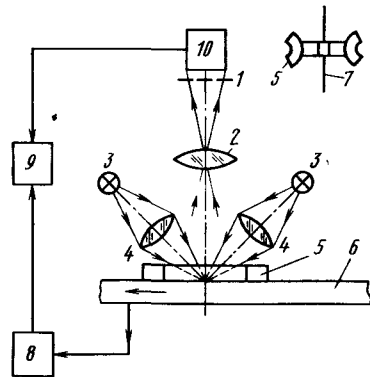


Рис. 5.29. Дальномер геометрического типа, работающий активным методом

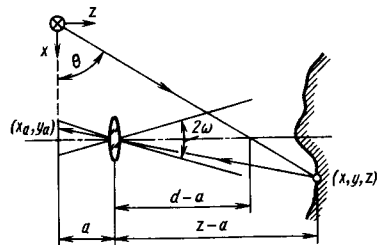


Рис. 5.30. Обобщенная оптическая схема дальмера, работающего активным методом

Иногда вместо одного источника берут несколько, расположенных, например, по кругу, причем для отдельных источников или диаметрально расположенных пар источников углы  $\theta$  выбирают различными. При этом достигается высокая чувствительность  $S_z$  в большом диапазоне  $z$ . Так, в опытном образце, описанном в [59], при использовании 12 источников света, расположенных по кругу и образующих несколько световых «конусов», погрешность измерения  $\Delta z$  не превышает 0,07 мм для  $z$  в диапазоне 40 ... 50 мм. Датчик имеет диаметр 11 см. При фокусном расстоянии объектива 16 мм  $a = 20,67$  мм.

Во многом аналогичны рассмотренной выше системы, где вместо линии на поверхность объекта проецируется сетка линий. На разных гранях объекта отклонения изображений этих линий от первоначального положения будут различны, а значения этих отклонений, измеряемые в плоскости анализа, дают информацию о расстояниях до различных частей объекта и их взаимной ориентации.

В последние годы появились преобразователи, в которых используется муаровый эффект, возникающий при наложении изображений двух сеток, причем одна из них образуется путем освещения объекта структурированным светом, например в виде ряда линий, а другая устанавливается в плоскости анализа. Поскольку период изображения первой сетки зависит от расстояния до объекта, период возникающей в плоскости анализа муаровой картины также зависит от этого расстояния. Измеряя частоту биений, соответствующую периоду муара при сканировании плоскости анализа, можно получать информацию о положении объекта.

Точность описанных дальномерных устройств активного типа зависит от разрешающей способности анализатора. В тех случаях, когда функции анализатора изображений выполняет координатно-чувствительный фотоприемник, это разрешение во многом определяется размером изображения точки или линий и распределением освещенности в этом изображении. Для минимизации этого размера иногда используют оптические волоконные световоды.

В импульсных локационных дальмерах к объекту посылается короткий световой импульс, и по времени  $t$  между его посылкой и возвращением при постоянной скорости распространения  $v$  импульса определяется расстояние  $z$  до объекта:  $z = vt/2$ . Вследствие ограниченной точности измерения малых  $t$  погрешности таких устройств довольно велики. Так, если обеспечить достаточно малую погрешность измерения временного интервала  $\Delta t \leq 10^{-9}$  с, то погрешность измерения расстояния в воздухе  $\Delta z \approx 1,5$  см. Одним из путей увеличения точности является уменьшение длительности импульса, однако при этом уменьшается энергия сигнала. Поэтому вместо одиночного импульса и одиночного измерения дальности до какой-либо точки объекта используют сигналы сложной формы, а также многократные измерения с усреднением

результатов. В качестве источников излучения в таких дальномерах наиболее часто служат твердотельные или полупроводниковые лазеры, а также светодиоды.

Более точны *фазовые локационные светодальномеры*, в которых поток обычно модулируется по гармоническому закону. Расстояние между дальномером и объектом

$$z = c_0 / (2nf_m) (N + \varphi/2\pi) + \delta,$$

где  $c_0$  — скорость распространения излучения в вакууме;  $n$  — показатель преломления среды распространения;  $f_m$  — частота модуляции излучения (масштабная частота);  $N$  — целое число волн с длиной  $\lambda_m = c_0 / (nf_m)$ , укладывающихся на двойном расстоянии от дальномера до объекта;  $\varphi$  — разность фаз излучаемой и принимаемой (отраженной и возвратившейся) волн;  $\delta$  — так называемая постоянная поправка дальномера.

С помощью поправки  $\delta$  учитывают несовпадение условных плоскостей, соответствующих началу излучения модулированного потока и началу фазового сравнения принимаемого потока; несовпадение этих условных плоскостей с началом измерения расстояния; временные и фазовые задержки в электронных цепях; непостоянство показателя преломления  $n$  по пути распространения потока.

Измерение дальности обычно сводится к определению  $\varphi$  и  $N$  при известных  $c_0$ ,  $n$  и  $f_m$ . Для исключения неоднозначности используется несколько масштабных частот. Расстояние  $z$  измеряется на нескольких  $f_m$ , и по результатам этих измерений определяется  $N$ . Минимальную частоту рассчитывают из условия

$$f_{m \min} \geq c_0 \Delta\varphi / (4\pi n \Delta z),$$

где  $\Delta\varphi$  — достижимая погрешность измерения разности фаз;  $\Delta z$  — допуск на погрешность измерения  $z$ .

Методика расчета фазовых локационных светодальномеров достаточно полно рассмотрена в ряде монографий, например в [3]. Следует отметить, что гораздо более высокая точность фазовых дальномеров по сравнению с точностью импульсных устройств и дальномеров геометрического типа реализуется при работе на сравнительно больших расстояниях, где мало сказывается неопределенность или непостоянство поправки  $\delta$ . Кроме того, фазовые дальномеры конструктивно сравнительно сложны. По этим причинам и ряду других их редко используют в робототехнике.

Наиболее точны *интерференционные дальномеры*, в которых измерение осуществляется обычно по схеме асимметричного двухлучевого интерферометра Майкельсона. Световой пучок, создаваемый передающей системой, делится на две части, одна из которых направляется к объекту и отражается от него, а другая проходит путь известной длины до опорного отражателя. Относительный сдвиг фаз, соответствующий разности путей, проходимых

двумя частями пучка, измеряется в единицах длины волны  $\lambda$ . Интенсивность приходящего на приемник излучения изменяется по закону

$$E = 1 + a \cos (2\pi z/\lambda),$$

где  $a$  — постоянная. Отсюда находят  $z$ .

Для определения знака изменения расстояния, т. е. при реверсивных перемещениях контролируемого объекта, можно использовать второе опорное зеркало, сдвинутое по фазе на  $1/8$  периода, и вторую приемную систему. По сдвигу фаз сигналов на выходах первой и второй приемных систем находят знак перемещения. Можно также изменять длину волны  $\lambda$ , являющуюся в интерференционных дальномерах рабочей мерой, и работать на двух или более длинах волн. Поскольку изменение  $E$  периодически, в таких устройствах ведется отсчет целых фазовых циклов (полос) и долей интерференционной полосы. Современные устройства аналогового типа позволяют оценивать сдвиг полосы на  $\sim 0,01$  периода. Выпускаемые промышленностью устройства измеряют расстояния до нескольких десятков метров с разрешением в десятые и даже сотые доли микрометра, т. е. имеют относительную погрешность порядка  $10^{-7}$ . Однако трудность обеспечения высокой стабильности конструкции и необходимость поддерживать когерентность интерферирующих пучков в сложных условиях эксплуатации, например в сильно запыленной (загрязненной, рассеивающей и т. д.) среде, значительно снижают точность интерференционных дальномеров и ограничивают их применение в СТЗ роботов.

Сравнительно недавно в робототехнике начали использовать *дифракционные дальномеры*, работа которых основана либо на измерении радиуса корреляции пятнистой дифракционной картины, образующейся при освещении объекта когерентным светом, либо на измерении контраста в изображении периодической дифракционной структуры при когерентном освещении объекта через дифракционную решетку. В первом случае используется зависимость радиуса корреляции от расстояния между освещенным объектом и экраном, на котором образуется пятнистая структура (спекл), во втором — зависимость освещенности в различных порядках дифракции, наблюдаемых на поверхности объекта, от расстояния между решеткой и объектом. Предполагается, что дифракционные устройства будут эффективно применяться в малогабаритных СТЗ, однако пока их используют очень редко.

Более сложными СТЗ, предназначенными для определения координат наблюдаемого объекта или какой-либо его точки в трехмерном пространстве, являются устройства, где используются две или более оптические системы, разнесенные друг относительно друга. Их работа основана на известных геометрических соотношениях.

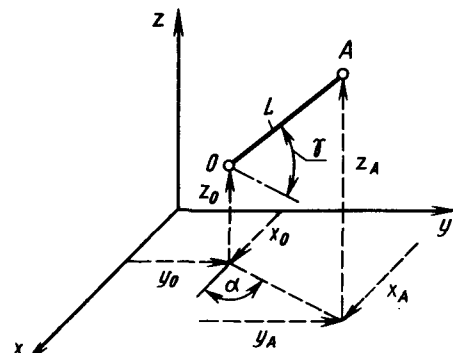


Рис. 5.31. Схема определения координат точки A путем угловых измерений

Схема определения координат некоторой точки A путем наблюдения ее из точки O и измерения углов азимута  $\alpha$  и возвышения  $\gamma$  представлена на рис. 5.31. Точкой O может быть, например, узловая точка объектива СТЗ, координаты которой  $(x_0, y_0, z_0)$  известны. Очевидно, что

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= (y_A - y_0)/(x_A - x_0); \\ \operatorname{tg} \gamma &= (z_A - z_0)/\sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2}; \\ L &= \sqrt{(x_A - x_0)^2 + (y_A - y_0)^2 + (z_A - z_0)^2}. \end{aligned}$$

Используя две или более СТЗ, т. е. наблюдая A из двух или более точек пространства  $(x, y, z)$  и измеряя углы  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \gamma_1, \gamma_2, \dots$ , можно решить полученную систему уравнений относительно  $x_A, y_A, z_A$  и L, т. е. найти координаты точки A и дальность до нее.

Возможные варианты расположения СТЗ, рациональные прежде всего с точки зрения точности измерений, а также анализ достижимой точности неоднократно рассматривались в отечественной и зарубежной технической литературе. Например, в [66] рассмотрен случай трехмерной локации точки с помощью двух и трех измерительных систем, оптические оси которых направлены вдоль осей ортогональной системы координат  $(x, y, z)$  и пересекаются в ее начале (рис. 5.32).

Используя, например, две СТЗ с системами отсчета координат внутри каждой (рис. 5.32), можно определить координаты точки A путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} x_A &= \alpha_{x1}(-d_1 + \alpha_{x3}d_3)/(1 + \alpha_{x3}\alpha_{x1}), \dots\dots \text{СТЗ 1} \\ y_A &= \alpha_{y3}(d_3 + \alpha_{y1}d_1)/(1 + \alpha_{y3}\alpha_{y1}), \dots\dots \text{СТЗ 3} \\ z_A &= -\alpha_{z3}(d_3 + \alpha_{z1}d_1)/(1 + \alpha_{z3}\alpha_{z1}), \dots\dots \text{СТЗ 3} \\ z_A &= -\alpha_{z1}(-d_1 + \alpha_{z3}d_3)/(1 + \alpha_{z3}\alpha_{z1}), \dots\dots \text{СТЗ 1}, \end{aligned}$$

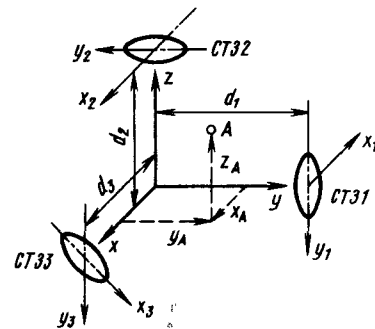


Рис. 5.32. Схема локации точки с помощью трех СТЗ

Рис. 5.33. Оптическая система с аксионом

где  $\alpha_{ij}$  — направление на точку A, измеряемое вдоль оси i в j-й СТЗ;  $d_j$  — расстояние до начала координат от передней узловой точки объектива j-й СТЗ.

Если измерение координат точки ведется в одной плоскости, в той, которой принадлежат оптические оси СТЗ, то минимум погрешности обеспечивается при угле порядка  $54,5^\circ$  между направлением на точку и прямой, соединяющей узловые точки объективов СТЗ.

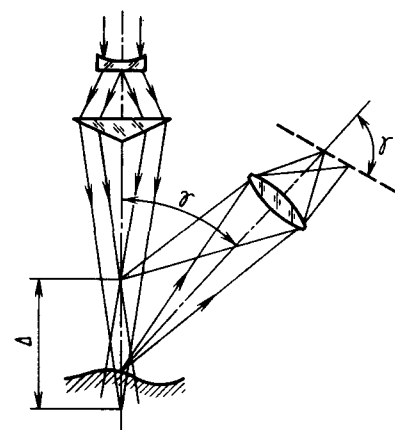
Во многих СТЗ важно обеспечить высокую точность измерений или высокое пространственное разрешение в большом диапазоне расстояний до наблюдаемого или контролируемого объекта. Иными словами, необходимо обеспечить большую глубину резкости (см. п. 3.3) при хорошей разрешающей способности СТЗ.

В обычных оптических системах при требованиях к разрешению, оцениваемому кружками рассеяния с диаметрами порядка десятков микрон, глубина резкости не превышает нескольких миллиметров, что часто бывает недостаточным. Изменение размеров этих кружков сказывается на точности измерений.

Для увеличения глубины изображаемого пространства при сохранении почти постоянного диаметра кружка рассеяния в плоскости анализа приемной системы авторами [55] было предложено использовать в осветительной системе комбинацию из отрицательного и положительного аксионов. Упрощенная схема такой СТЗ показана на рис. 5.33.

Пучок лучей, создаваемый коллиматором, последовательно проходит отрицательный и положительный аксионы и фокусируется в области расположения объекта. Отраженная часть потока собирается объективом приемной системы, который строит изображение освещенного участка поверхности объекта в плоскости анализатора, например многоэлементного или позиционно-чувствительного приемника излучения, показанного на рис. 5.33 штриховой линией. В зависимости от расстояния до поверхности объекта это изображение строится на разных участках приемника, т. е. сигнал на выходе приемника несет информацию о дальности до объекта. Для надлежащего сопряжения передающей и приемной оптических систем должно соблюдаться соотношение  $\operatorname{tg} \gamma' = \operatorname{tg} \gamma/V$ , где V — увеличение объектива.

Как показывают несложные расчеты, при требованиях к разрешающей способности СТЗ, оцениваемой значением 13 мкм, при



углах  $\gamma = 30^\circ$  и разрешении приемника порядка  $1/5000$  его размера можно обеспечить глубину резкости до  $\Delta \approx 100$  мм.

Такая схема с увеличенной глубиной резкости оказывается удобной и в случае использования сканирования в передающей (осветительной) и приемной ветвях СТЗ, применяемого, например, при перемещении объекта относительно СТЗ и устранения перспективных искажений.

## 5.7. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Для определения ориентации объекта относительно некоторой оси используют различные способы: интегральный, контурный, метод характерных точек и т. п.

С технической точки зрения наиболее простым является метод ориентации по характерным точкам. Принцип определения ориентации объекта в захватном устройстве промышленного робота по характерным точкам с помощью фотодиодных — светодиодных пар иллюстрирует рис. 5.34. Датчик состоит из набора светодиодов 1 и фотоприемников 2, размещенных на противоположных рабочих поверхностях захватного устройства и действующих по перекрытию светового потока. По значению светового потока и расположению фотоприемников, закрытых объектом 3, выдается информация о местонахождении объекта.

Если объект имеет неправильную форму, то одновременное определение его местоположения и ориентации обеспечивается применением датчика изображения, содержащего несколько фотоприемников, расположенных в соответствии с конфигурацией объекта (рис. 5.35). Выходные сигналы с фотоприемников используются для формирования двоичного кода. Для определения местоположения объекта в поле зрения СТЗ можно применять многоэлементный датчик изображения. Регистрация не только наличия или отсутствия видеосигнала, но и его значения дает дополнительную информацию, используемую в аналоговых устройствах ориентации.

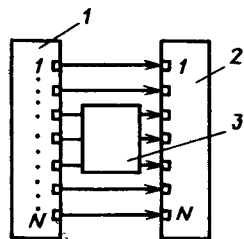


Рис. 5.34. Схема датчика

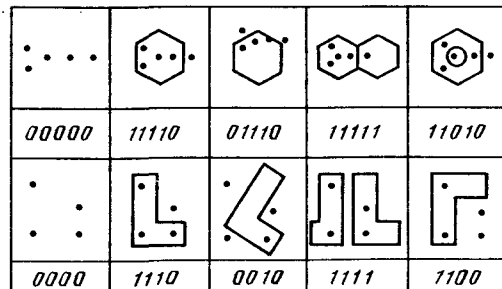
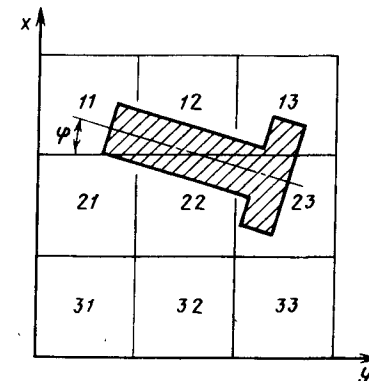


Рис. 5.35. Схема расположения фотоприемников

Рис. 5.36. Определение положения произвольно ориентированного объекта



Рассмотрим в качестве примера случай, когда в поле рабочей зоны промышленного робота расположен только один объект, ориентированный произвольным образом (рис. 5.36); его изображение регистрируется матрицей аналоговых приемников излучения.

Для выполнения операции, например, захватывания объекта, рабочий орган должен быть смещен в плоскости  $x, y$  рабочего поля и развернут на угол  $\varphi$ . Предполагается, что операция смещения рабочего органа в плоскости, перпендикулярной к плоскости рабочего поля, является детерминированной и изображение объекта имеет заведомо несимметричный вид и форму, близкую к прямоугольной.

При решении данной задачи необходимо выбрать рациональное число элементов фотоприемной матрицы. Четырехэлементная матрица (квадрантный фотоприемник) позволяет найти нужные смещения в плоскости  $x, y$  с большой погрешностью вследствие несимметричной формы изображения объекта. Матрица с большим числом элементов ( $5 \times 5$  или  $10 \times 10$ ) дает большой объем избыточной информации, приводящей к усложнению электронной схемы обработки фотоэлектрических сигналов. Для построения разностной схемы управления с двумя степенями свободы требуется минимум  $2^2$  чувствительных элемента, с тремя степенями подвижности (смещение в направлении  $x, y$  и поворот по  $\varphi$ ) требуется минимум  $2^3$  чувствительных элемента. Сигналы, снимаемые с матрицы и необходимые для построения разностной схемы управления, соответственно равны:

$$U_x = \sum_{j=1}^3 k_{1j} U_{1j} - \sum_{j=1}^3 k_{3j} U_{3j};$$

$$U_y = \sum_{i=1}^3 k_{i1} U_{i1} - \sum_{i=1}^3 k_{i3} U_{i3}; \quad U_\varphi = \sum_{i,j=1}^3 \beta_{ij} U_{ij},$$

где  $k_{ij}, \beta_{ij}$  — коэффициенты пропорциональности, определяющие взаимосвязь между фотоэлектрическими сигналами  $U_{ij}$  и сигналами  $U_x, U_y, U_\varphi$ , поступающими на исполнительные устройства смещения рабочего органа по осям  $x, y$  соответственно и поворота в азимутальной плоскости на угол  $\varphi$ .

Описанные выше способы определения ориентации объектов реализуются аппаратно. Определение ориентации объектов слож-

ной формы с достаточно высокой точностью достигается обработкой изображений на ЭВМ (интегральные способы).

При определении угла ориентации методом сравнения с эталоном на этапе обучения в память ЭВМ вводится матрица  $H_{nn}^0$ , описывающая изображение эталона. Полученное изображение объекта центрируется, а затем осуществляется его поворот на угол  $\Delta\varphi$ . При каждом повороте получаемая матрица изображения  $H_{nn}^\varphi$  сравнивается с  $H_{nn}^0$  (предполагается, что изображения объекта и эталона имеют один и тот же масштаб).

Достоинством интегральных методов является простота реализации блока обработки и высокая точность вычисления параметров положения объекта. Однако при этом необходимо вводить все изображение в ЭВМ, что приводит к значительным затратам времени на обработку изображения. Для устранения указанного недостатка применяют контурные методы и методы характерных точек.

Наибольшее распространение из контурных получил метод полярных диаграмм, заключающийся в определении координаты центра формы, выделении контура объекта (см. гл. 2) и формировании полярной диаграммы изображения по правилу

$$r_j = [(x_j - x_n)^2 + (y_j - y_n)^2]^{1/2}, \quad j = 1, 2, \dots, n^*,$$

где  $x_j, y_j$  — координаты  $j$ -й точки контура;  $x_n, y_n$  — координаты центра объекта;  $n^*$  — число точек выделенного контура.

Угол ориентации объекта может быть найден по среднему углу наклона контура:

$$\varphi = \sum_{j=1}^{m_j} \varphi_j / m_j,$$

где  $m_j$  — число элементарных отрезков, для каждого из которых угол наклона к выбранной оси  $\varphi_j \in [j\Delta\gamma, (j+1)\Delta\gamma]$ .

Угол  $\gamma \in (0, \pi)$ , разбивается на участки с шагом  $\Delta\gamma$ :

$$\varphi = \{\gamma_j : \max(m_j/m) \forall j = 1, 2, \dots, \pi/\Delta\gamma\}.$$

При определении угла ориентации объекта методом *характерных точек контура* (точки, в которых контур изменяет кривизну, или точки пересечения контура с некоторой линейной либо круговой разверткой) необходимо, чтобы фотоприемник размещался над центром формы объекта и вращался вокруг вертикальной оси. Угол ориентации

$$\Phi = \{\varphi : \min |f_i| \forall \varphi \in (0, \pi)\},$$

где  $f_i$  — код фотоэлементов в  $i$ -м положении.

К числу наиболее распространенных способов определения угловой ориентации какой-либо характерной оси объекта относится способ *поиска минимального значения момента инерции*

$$\lg 2\varphi = \left[ \sum_n (x_n - x_n) (y_n - y_n) \right] / \left[ \sum_n (x_n - x_n)^2 - \sum_n (y_n - y_n)^2 \right].$$

Анализ формулы показывает, что в случае равенства знаменателя нулю угол  $\varphi$  оказывается неопределенным. Поэтому для устранения неопределенности центрально-несимметричных объектов для расчета угла  $\varphi$  предложена следующая формула:

$$\lg \varphi = \left[ \sum_n (y_n - y_n) - V_{\min} \right] / \left[ \sum_n (x_n - x_n) (y_n - y_n) \right],$$

где  $x_n = m_x/A$ ;  $y_n = m_y/A$  — координаты центра объекта;  $m_x, m_y$  — моменты первого порядка;  $A$  — площадь;  $V_{\min}$  — момент второго порядка:

$$V_{\min} = 0,5(a_{11} + a_{22}) - 0,5[(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}^2]^{1/2};$$

$$a_{11} = \sum_n (x_n - x_n)^2 / A^2;$$

$$a_{12} = \sum_n (x_n - x_n) (y_n - y_n) / A^2;$$

$$a_{22} = \sum_n (y_n - y_n)^2 / A^2.$$

В случае применения МЭПИ с матричной структурой угол ориентации находят следующим образом. Выбирается число точек развертки, при котором наиболее точно аппроксимируется кривая круговой развертки. Каждая точка имеет координаты  $x$  и  $y$ , представляющие собой коды строк и столбцов МЭПИ. Текущее приращение  $\Delta\varphi_n$  объекта определяется в результате преобразования

$$D \rightarrow H \rightarrow d(n) \rightarrow C(n) \rightarrow \Delta\varphi(n) C(n),$$

где  $D$  — функция, описывающая изображение объекта;  $H$  — оператор выборки элементов изображения, зависящий от способа считывания выходного сигнала с матрицы фотоприемников;  $d(n)$  — функция квантования выбранного элемента, равная 1, если элемент принадлежит изображению объекта, и 0 — в противном случае;  $C(n)$  — оператор сдвига,

$$C(n) = \begin{cases} 1/2 & \text{при } d(n-1) = 0; \\ 1/4 & \text{при } d(n-1) = 1. \end{cases}$$

Расчетный угол ориентации объекта  $\varphi$  вычисляется суммированием приращений:

$$\varphi = \sum_{n_1=1}^{n_1=m_1-1} C(n_1) \Delta\varphi(n_1) + \sum_{n_2=1}^{n_2=m_2-1} C(n_2) \Delta\varphi(n_2) - \frac{\pi}{2},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — номера точек на первой и второй дугах дискретной круговой развертки;  $m_1$  и  $m_2$  — число точек на первой и второй дугах развертки.

Коррекция значения угла ориентации объекта осуществляется по формуле

$$\varphi_0 = \varphi - f_0 \operatorname{sgn} \varphi (\pi/2),$$

где  $\varphi_0$  — истинный угол ориентации объекта;  $f_0$  — функция положения объекта;  $f_0 \in (0, 1)$ .

Определение координат и ориентации объекта с использованием аппарата обобщенных ортогональных преобразований сигнала является перспективным и позволяет не только формировать многообразные системы базисных ортогональных функций (Фурье, Уолша, Хаара), но и однозначно выбирать методы и способы решения задач ориентации объекта.

Для этой цели используются специально сформированные спектральные характеристики — знаковые спектры  $Q$ :

$$Q_{kl} = \operatorname{sgn} \left[ \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N f(x, y) h_k(x) h_l(y) \right],$$

где  $f(x, y)$  — исходный пространственный сигнал (изображение);  $h_k(x)$  и  $h_l(y)$  — базисные функции порядков  $k$  и  $l$  соответственно;  $N \times N$  — размер матрицы изображения.

При изменении ориентации объекта, когда имеется некоторая новая функция

$$g_1(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0)$$

или

$$g_2(x_1, y_1) = f_2(x, y),$$

где  $x_1 = x \cos \varphi + y \sin \varphi$ ;  $y_1 = x \sin \varphi - y \cos \varphi$ ;  $\varphi$  — угол поворота объекта, можно снова определить  $Q$ .

Определив  $Q_{kl}$  как функцию параметров  $\varphi$ ,  $x_0$ ,  $y_0$  и сопоставив ее с исходной, получим разность (невязку)  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = Q_{kl} - Q_{kl}(\varphi, x_0, y_0) = \varepsilon_{kl}(\varphi, x_0, y_0),$$

которая является критерием близости сравнения спектральных характеристик.

### 5.8. КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Корреляционно-экстремальной системой (КЭС) технического зрения называется система обработки информации, в которой осуществляется вычисление взаимно корреляционной функции (ВКФ) двух изображений — эталонного (ЭИ) и текущего (ТИ) — реального — и поиск главного экстремума этой функции.

КЭС по виду и объему рабочей информации, воспроизводимой датчиками, подразделяют на системы, в которых информация снимается в одной текущей точке (КЭС I), с отрезка линии

(КЭС II), с участка площади (кадра) (КЭС III). По объему начальной информации КЭС делят на системы «без памяти» и системы «с памятью». В первой информация возникает как результат сопоставления сигналов, один из которых задержан во времени. Оптимальная временная задержка определяется по экстремуму ВКФ. Для работы КЭС «с памятью» необходима априорная информация об анализируемом изображении.

В зависимости от количества необходимой информации КЭС «с памятью» можно разделить на системы с полной, неполной и минимальной информацией. КЭС с полной информацией характеризуются высокой точностью записи в блоке памяти исходных (эталонных) данных. КЭС с минимальной априорной информацией хранят в блоке памяти минимальное количество информации, которое обусловлено более мягкими требованиями к точности, быстродействию и методам сжатия информации. КЭС с неполной априорной информацией занимают промежуточное положение между указанными системами.

По способу хранения и обработки априорной и рабочей информации КЭС подразделяют на аналоговые, цифровые и аналого-цифровые.

По методу определения отклонения по экстремуму различают поисковые и беспоисковые (дифференциальные) аналоговые КЭС.

Первые КЭС II, применяемые в качестве СТЗ роботов, были предназначены для решения задачи обнаружения предметов и определения расстояния до них. В состав КЭС «Mark M-2», «Mark M-3» входят две передающие телевизионные камеры, коррелятор, оптическая система и блок обработки данных. Эти системы различаются лишь методом поиска и удержания ВКФ; при этом в «Mark M-2» требуемая информация определяется на основе анализа максимума ВКФ, а в «Mark M-3» — на основе поиска нуля производной ВКФ [18].

Основным недостатком таких систем является низкая помехоустойчивость, невозможность определения местоположения и ориентации предмета. От указанных недостатков свободны КЭС III, принцип работы которых основан на анализе ВКФ текущего и эталонного изображений. На рис. 5.37 приведена функциональная схема КЭС III, в которой информация снимается с участка площади «кадра» и используется беспоисковый алгоритм определения отклонения от максимума ВКФ. В КЭС III последовательно расположены плоскость 1 — ТИ, плоскость 3 — ЭИ, интегрирующая линза 4 и корреляционная плоскость (КП) 5. В рассматриваемой КЭС используются системы координат  $x_0y_0$ ,  $x_1y_1$ ,  $\xi\eta$ , связанные с плоскостями ТИ, ЭИ и плоскостью регистрации ВКФ. ТИ соответствует рабочей зоне ПР и проецируется на плоскость 1. Эталонное изображение и корреляционная плоскость разделены на  $n$  областей (на рис. 5.37 показано четыре области). Каждая область ЭИ содержит изображение детали 2, развернутой на угол  $\Delta\varphi_i$ ,

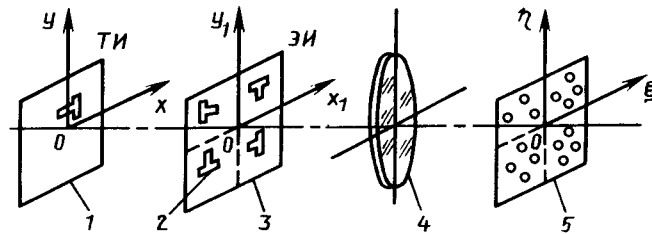


Рис. 5.37. Функциональная схема корреляционно-экстремальной системы технического зрения КЭС III

каждая область ВКФ — четырех фотозлемента. Угол относительного разворота сравниваемых изображений (угол ориентации детали) определяется нахождением  $j$ -й области плоскости ВКФ, соответствующей наибольшему значению ВКФ.

По данной схеме построена КЭС (рис. 5.38, а), которая состоит из робота 1, конвейера 2, передающей телевизионной камеры 3, блока преобразователя 4, приемной электронно-лучевой трубки 5, являющейся частью оптического коррелятора 6, логической схемы 10 и преобразователя 11. Чувствительным элементом является передающая телевизионная трубка, жестко связанная с рукой робота и воспринимающая рабочее изображение. Электрический сигнал с передающей телевизионной камеры 3 поступает в преобразователь 4, где происходит выделение контура. Преобразованный сигнал подается на приемную электронно-лучевую трубку 5, которая воспроизводит контурное изображение. В оптическом корреляторе расположена эталонная маска 7 изображения деталей, развернутых на различные углы с дискретностью  $2\pi/n$  при рассогласованиях, равных нулю (рис. 5.38, б). Изображение ВКФ через оптическую систему 8 проецируется на корреляционную плоскость 9 (рис. 5.38, в), где образуется  $n$

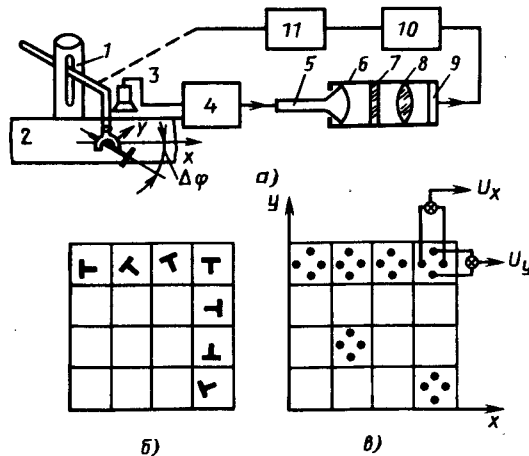
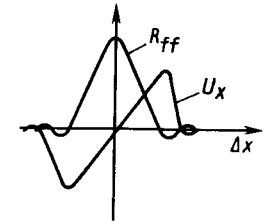


Рис. 5.38. Коррелятор для управления роботом:  
а — функциональная схема;  
б — эталонная маска; в — корреляционная плоскость

Рис. 5.39. Статистические характеристики КЭС



корреляционных функций, информация о которых считывается с фотодиодной матрицы и далее подается на вход логической схемы 10. На выходе схемы возникают сигналы  $U_x$ ,  $U_y$ , пропорциональные смещениям  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и углу поворота детали  $\Delta\phi$ .

В преобразователе 11 полученные сигналы преобразуются в управляющие воздействия робота (угол поворота захватного устройства, длины руки робота, угол поворота колонки соответственно).

При наличии смещения ТИ относительно ЭИ рука робота перемещается вместе с передающей телевизионной трубкой 3, одновременно изменяются значения  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ . После отработки смещений  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  рука робота будет находиться над деталью, и захватное устройство робота повернется на угол  $\Delta\phi$ , ориентируясь вдоль детали. При максимуме ВКФ параметры разориентации  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta\phi$  будут минимальны.

На рис. 5.38, в показаны четыре области в плоскости ВКФ, в каждой из которых расположены четыре фотодиода — два в канале  $x$  и два в канале  $y$ . Для определения углового рассогласования  $\Delta\phi$  ТИ и ЭИ сигналы с фотоприемников в каждой области суммируются, затем с помощью логической схемы определяется область, для которой значение суммарного сигнала максимально. В следующем цикле для определения координат  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  все фотоприемники, кроме фотоприемников выбранной области, отключаются, а для этой области выделяются разностные сигналы  $U_x$ ,  $U_y$  с соответствующих пар фотоприемников. Статистические характеристики оптического коррелятора для схемы на рис. 5.38 имеют вид:

$$U_x(\Delta x, \Delta y) = R_{ff}(\Delta x - l, \Delta y) - R_{ff}(\Delta x + l, \Delta y) = dR_{ff}/d\Delta x;$$

$$U_y(\Delta x, \Delta y) = R_{ff}(\Delta x, \Delta y - l) - R_{ff}(\Delta x, \Delta y + l) = dR_{ff}/d\Delta y,$$

где  $R_{ff}(\Delta x, \Delta y)$  — ВКФ, пропорциональная освещенности в соответствующих точках;  $l$  — расстояние между фотодиодами.

Из анализа статической характеристики (рис. 5.39) следует, что существует зона, в которой знак сигнала  $U_x$  совпадает со знаком отклонения  $\Delta x$ , т. е. содержит информацию об отклонениях ТИ и ЭИ, и существует зона линейности, необходимая для управления.

Рассмотренная КЭС использовалась для определения ориентации и местоположения деталей типа коленчатого вала, шатуна, зубчатого колеса. Погрешность определения координат составляет 2 ... 6 %, минимальная погрешность коррелятора равна 1 % при расположении фотодиодов в корреляционной плоскости на расстоянии  $l = 2$  мм [18] друг от друга. Недостаток описанной КЭС заключается в ограничении точностных характеристик при работе с крупногабаритными деталями [18].



Рассмотрим основные расчетные формулы, необходимые для проектирования КЭС описанного типа. Размер изображения, формируемого на экране приемной электронно-лучевой трубки,

$$l_{\text{к}} = l_{\text{д}} f' I_{\text{э}} / (zA),$$

где  $l_{\text{д}}$  — размер детали;  $f'$  — фокусное расстояние объектива телекамеры;  $I_{\text{э}}$  — размер экрана;  $z$  — расстояние между детально и передним фокусом объектива передающей телекамеры;  $A$  — размер фотокатода передающей телекамеры.

Смещения изображения детали на экране индикатора ТИ определяются как

$$\Delta x_{\text{к}} = \frac{f' I_{\text{э}}}{zA} \Delta x; \quad \Delta y_{\text{к}} = \frac{f' I_{\text{э}}}{zA} \Delta y,$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — смещения детали на сцене.

Координаты главного максимума ВКФ

$$\xi = \frac{f' I_{\text{э}} f'_{\text{к}}}{z A t_{\text{оо}}} \Delta x; \quad \eta = \frac{f' I_{\text{э}} f'_{\text{к}}}{z A t_{\text{оо}}} \Delta y,$$

где  $f'_{\text{к}}$  — фокусное расстояние оптической системы коррелятора;  $t_{\text{оо}}$  — расстояние по оптической оси между плоскостью экрана с ТИ и плоскостью ЭИ.

При расчете параметров КЭС технического зрения необходимо учитывать возможные погрешности определения координат, возникающие вследствие неточности изготовления коррелятора. Допустимые значения систематических  $\delta_{\Sigma}^{\xi}$ ,  $\delta_{\Sigma}^{\eta}$  и случайных  $\sigma_{\Sigma}^{\xi}$ ,  $\sigma_{\Sigma}^{\eta}$  составляющих погрешности определения координат главного максимума ВКФ в плоскости регистрации находят следующим образом:

$$\delta_{\Sigma}^{\xi} = \frac{\xi_{\text{max}} \delta_{\text{д}}}{100\%}; \quad \delta_{\Sigma}^{\eta} = \frac{\eta_{\text{max}} \delta_{\text{д}}}{100\%}; \quad \sigma_{\Sigma}^{\xi} = \frac{\varepsilon_{\text{max}} \sigma_{\text{д}}}{100\%}; \quad \sigma_{\Sigma}^{\eta} = \frac{\eta_{\text{max}} \sigma_{\text{д}}}{100\%},$$

где  $\delta_{\text{д}}$ ,  $\sigma_{\text{д}}$  — допустимая систематическая и случайная погрешности определения координат, %;  $\varepsilon_{\text{max}}$ ,  $\eta_{\text{max}}$  — максимально допустимые смещения по соответствующим осям корреляционной плоскости  $\varepsilon_0 = \eta$ .

Величины  $\varepsilon_{\text{max}}$ ,  $\eta_{\text{max}}$  находят из условий

$$\varepsilon_{\text{max}} \leq R_{\text{а}} - \delta_{\Sigma}^{\xi}; \quad \eta_{\text{max}} \leq R_{\text{а}} - \delta_{\Sigma}^{\eta},$$

где  $R_{\text{а}}$  — радиус (или половина стороны) фоточувствительной поверхности анализатора ВКФ.

Быстродействие КЭС, характеризуемое временем  $t$ , необходимым для воспроизведения изображения на экране индикатора ТИ, совмещения ТИ и ЭИ по углу их относительного разворота и оценки линейных смещений координат наибольшего значения

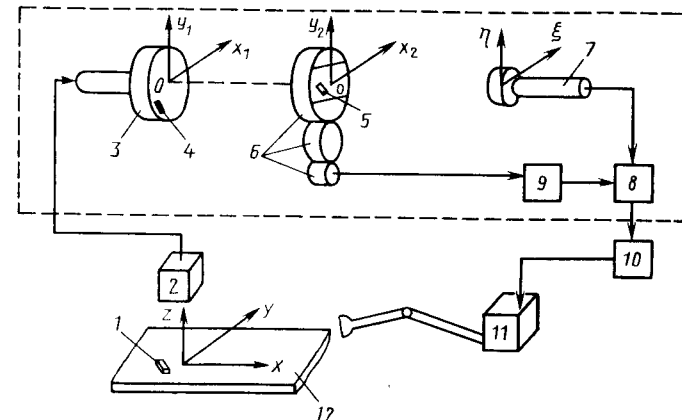


Рис. 5.40. Структурная схема КЭС технического зрения робота

ВКФ, можно оценить исходя из допустимой дискретности отсчета  $\Delta r_{xy}^{\text{д}}$ ,  $\Delta r_{\alpha}^{\text{д}}$  линейных и угловых координат:

$$\Delta r_{xy}^{\text{д}} = \frac{v_{\text{к}}}{t + t'}; \quad \Delta r_{\alpha}^{\text{д}} = \omega_{\text{д}} t,$$

где  $v_{\text{к}}$  — линейная скорость движения детали на конвейере;  $t'$  — длительность цикла работы робота;  $\omega_{\text{д}}$  — угловая скорость движения детали.

Таким образом,

$$t = (v_{\text{к}} - \Delta r_{xy}^{\text{д}} t') / \Delta r_{xy}^{\text{д}} \quad \text{или} \quad t = \Delta r_{\alpha}^{\text{д}} / \omega_{\text{д}}.$$

Выбирается меньшее из двух значений  $t$ .

Величину  $\Delta r_{xy}^{\text{д}}$  найдем по формуле

$$\Delta r_{xy}^{\text{д}} = (\Delta x_{\text{ср}}^2 + \Delta y_{\text{ср}}^2)^{1/2},$$

где  $\Delta x_{\text{ср}}$ ,  $\Delta y_{\text{ср}}$  — смещение детали по соответствующим осям за время срабатывания робота, оцувствленного КЭС.

Очевидно, что чем меньше допустимые значения  $\Delta x_{\text{ср}}$ ,  $\Delta y_{\text{ср}}$ , тем выше должно быть быстродействие КЭС технического зрения робота. Максимальное быстродействие КЭС ограничено допустимой скоростью перемещения изображения  $v_{\text{дти}}^{\text{доп}}$  по полю фотокатода телекамеры или  $v_{\text{ти}}^{\text{доп}}$  по экрану ТИ, превышение которых ведет к появлению эффекта «смазывания» изображения.

Для повышения точности работы КЭС используются схемы с подвижной маской (рис. 5.40). Полный цикл работы КЭС, схема которой приведена на рис. 5.40, включает следующие операции: запись ТИ детали 1 на экране запоминающей электронно-лучевой трубки 3; совмещение сравниваемых изображений 4 и 5 по углу их разворота (определение угловой ориентации детали); измерение координат пространственного положения детали; масштабиро-

вание и выдача на робот управляющих воздействий, характеризующих положение детали на конвейере; стирание ТИ. Текущее изображение 4 объекта 1 формируется телевизионной камерой 2. В качестве эталонного изображения 5 служит негативное изображение детали или ее чертежа в требуемом положении. Совмещение ЭИ и ТИ осуществляется вращением ЭИ с помощью электропривода 6. ВКФ эталонного и текущего изображений формируется на фотокатоде диссектора 7, сканирование поля которого выполняется по строчно-кадровой траектории. При достижении максимального значения ВКФ вращение ЭИ останавливается. Угловая координата измеряется блоком оценки угла 9. Координаты главного максимума ВКФ, определяющие положение объекта на сцене (в плоскости конвейера 12), вычисляются в блоке угловых и линейных координат 8. Блок согласования 10 осуществляет преобразование выходных сигналов с блока 9 в управляющие воздействия для привода робота 11.

Погрешность определения угловой ориентации детали в такой КЭС составила 2...3°, линейных координат положения — 0,3...1,8 мм при допустимом перемещении детали на 4...7 см; длительность цикла определения координат составляет 0,3...0,6 с\*.

Для совмещения изображений по углу их относительного разворота в описанной выше системе используется вращение ЭИ относительно ТИ. При этом в качестве датчика угла положения ЭИ служат перфорированные вращающиеся диски, содержащие  $n_d$  отверстий по окружности. В этом случае быстродействие КЭС с постоянным направлением вращения ЭИ

$$t = \sum_{i=1}^n t_i = T_\theta n_{об} = (2\pi/\omega_\theta) n_{об},$$

где  $t_i$  — длительность  $i$ -й операции цикла, выполняемой последовательно;  $T_\theta$  — период вращения ЭИ;  $n_{об}$  — число оборотов ЭИ, необходимых для выполнения всех операций цикла;  $\omega_\theta$  — угловая скорость ЭИ.

При выборе угловой скорости ЭИ следует учитывать, что имеется оптимальное сочетание значений величин  $\omega_\theta$  и  $T_\theta$ , определяемое условием: угол  $\alpha_\theta$  поворота ЭИ за время  $T_\theta$  кадровой развертки должен быть меньше допустимого угла  $\alpha_{нд}$  поворота ЭИ или равен ему. При этом  $\alpha_{нд}$  выбирают из соотношения

$$\alpha_{нд} = \omega_\theta T_\theta = 2\pi n_\theta T_\theta = 2\pi n_\theta (T_\theta/n_\theta),$$

где  $n_\theta$  — число оборотов ЭИ в единицу времени;  $n_\theta$  — число кадров, считываемых за один оборот ЭИ.

Систематическая погрешность оценки угловой координаты

$$\delta_\alpha = 2\pi/(n_d k_p),$$

где  $n_d$  — число расположенных по окружности отверстий в перфорированном вращающемся диске;  $k_p$  — отношение угловых скоростей диска и ЭИ.

Известны КЭС аналого-цифрового типа, в которых с помощью блока цифровой обработки видеосигнала ТИ фиксируется на экране запоминающей электронно-лучевой трубки в виде контурного или точечного изображения.

Коммутатор отклоняющей системы переключает поочередно строчную и кадровую катушки отклоняющей системы, что обеспечивает разворот раstra на угол  $\pi/2$ . Дополнительное вращение раstra достигается аппаратными средствами, поэтому аналого-цифровые КЭС имеют высокие точностные и скоростные характеристики, что обеспечивается организацией непрерывного вращения ЭИ, преобразованием ТИ в бинарное изображение контурного или точечного типа, параллельной обработкой информации, специальной обработкой ВКФ (фильтрация и нелинейное усиление), съемом линейных координат с одного блока [18].

Для выбора конструктивных параметров КЭС технического зрения рекомендуется следующая методика\*.

1. Определение допустимых смещений  $\Delta x_{\max}$ ,  $\Delta y_{\max}$  детали в рабочей зоне при заданных размере  $l_d$  и расстоянии  $z$  между деталью и датчиком ТИ.

2. Расчет размера  $U_\theta$  раstra индикатора ТИ и размера  $A$  фотокатода датчика ТИ при выбранных типах электронно-лучевых и полупроводниковых приборов, устанавливаемых соответственно в индикаторе ТИ и датчике ТИ.

3. Вычисление параметров  $f'_k$ ,  $t_{oc}$  коррелятора при  $\Delta \xi \rightarrow \max$ ,  $\Delta \eta \rightarrow \max$ , что соответствует максимальной разрешающей способности КЭС технического зрения.

4. Определение согласно требуемым значениям погрешностей  $\delta_2^x$ ,  $\delta_2^y$ ,  $\sigma_2^x$ ,  $\sigma_2^y$ .

5. Задание погрешности установки элементов коррелятора.

6. Вычисление по формулам требуемого быстродействия системы.

7. Задание погрешности установки датчика ТИ.

8. Определение допустимых точностных характеристик, обеспечивающих минимизацию затрат, обусловленных изготовлением и эксплуатацией КЭС [18].

\* Предложена В. И. Сырямкиным.

\* Описываемая КЭС разработана М. П. Ангеловым и В. И. Сырямкиным.

## ГЛАВА 6

### ОСНОВЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

#### 6.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ (СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ) РАСЧЕТЫ

Целью энергетических (светотехнических) расчетов является определение таких параметров СТЗ робота, при которых обеспечиваются необходимые для ее работы значения потоков излучения, освещенностей, контрастов на входе оптической системы или соответствующие им сигналы на выходе всей СТЗ. Следует помнить, что наряду с полезными информационными сигналами в СТЗ имеют место помехи и шумы, например, на вход СТЗ приходят потоки не только от наблюдаемых объектов, но и от посторонних излучателей, окружающего фона и т. п. Поэтому при проведении энергетического расчета необходимо учитывать взаимодействие полезных и вредных сигналов.

Обобщенная методика энергетического расчета состоит из следующих основных этапов:

- 1) определение значений полезного сигнала и помех (шумов) на выходе видеосенсора (в ряде случаев целесообразно приведение сигнала, шумов и помех ко входу СТЗ);
- 2) составление алгоритма работы системы, т. е. составление основного энергетического уравнения или неравенства, связывающего полезный сигнал, сигнал помехи (шум) и параметр, характеризующий качество работы конкретной СТЗ, например необходимое отношение сигнал — шум или контраст между полезным сигналом, фоном и помехой;
- 3) решение полученного уравнения относительно интересующего разработчика параметра;
- 4) расчет или выбор других параметров СТЗ и проведение поверочного расчета, т. е. проверка выполнения сформулированного по п. 2 алгоритма.

На первом этапе можно воспользоваться формулами для расчета потоков  $\Phi$  и освещенностей  $E$  на входе оптической системы СТЗ, в плоскости изображений, создаваемых объективом, а также на чувствительном слое приемника излучения.

Удобно подразделять излучатели на точечные, видимая площадь которых занимает малую часть углового поля приемной системы, площадные, занимающие часть углового поля, но не перекрывающие его, и протяженные — перекрывающие все угловое поле. Фотометрической характеристикой точечных излучате-

лей является сила излучения (света)  $I$ , а площадных и протяженных — яркость поверхности  $L$ .

Потоки  $\Phi$ , приходящие от удаленных излучателей на входной зрачок приемной системы, и соответствующие им освещенности  $E$  на этом зрачке соответственно равны:

для точечного излучателя

$$\Phi_{вх} = \tau_c I A_{вх} / l^2; \quad E_{вх} = \tau_c I / l^2; \quad (6.1)$$

для площадного излучателя (для оптической системы с небольшим угловым полем)

$$\Phi_{вх} = \tau_c L A_{вх} A_{вх} / l^2; \quad E_{вх} = \tau_c L A_{вх} / l^2, \quad (6.2)$$

для протяженного излучателя и той же системы

$$\Phi_{вх} = \tau_c L q A_{вх} / f'^2; \quad E_{вх} = \tau_c L q / f'^2 \quad (6.3)$$

или для зрачка круглой формы диаметром  $D$

$$\Phi_{вх} = (\pi/4) \tau_c L q (D/f')^2.$$

В этих формулах  $\tau_c$  — коэффициент пропускания среды на пути от излучателя до входного зрачка;  $A_{вх}$  — площадь входного зрачка;  $l$  — расстояние между излучателем и входным зрачком;  $A_{вх}$  — видимая из центра зрачка площадь излучателя;  $q$  — площадь полевой диафрагмы, ограничивающей видимую площадь излучателя и располагаемой обычно в фокальной плоскости объектива с фокусным расстоянием  $f'$  или вблизи от нее (часто такой диафрагмой является чувствительная площадка приемника излучения).

В тех случаях, когда входной зрачок круглый, а излучатель находится на небольшом расстоянии от зрачка, сравнимом с его размерами, для расчета потока  $\Phi_{вх}$  пользуются формулами вида

$$\Phi_{вх} = \tau_c \pi L A_{вх} \sin^2 \sigma_A \cos \gamma, \quad (6.4)$$

где  $\sigma_A$  — апертурный угол в пространстве предметов, т. е. угол между оптической осью и лучом, выходящим из осевой точки предмета и идущим на край апертурной диафрагмы (входного зрачка);  $\gamma$  — угол между направлением из центра зрачка в какую-либо точку предмета и оптической осью.

Последняя формула пригодна для расчетов в пределах  $2\gamma \leq 120^\circ$  с погрешностью не более 10 %.

Формулы (6.1)–(6.4) сохраняют свою общность и в случае активного метода работы СТЗ робота, т. е. при подсветке наблюдаемого объекта осветительной системой. В таких случаях можно либо воспользоваться непосредственно формулами (6.1)–(6.4), либо представить облучаемый (подсвечиваемый) объект как вторичный излучатель с яркостью  $L_\alpha$  по произвольному направлению  $\alpha$  (обычно угол  $\alpha$  отсчитывается от нормали к поверхности

объекта, отражающей или рассеивающей с коэффициентом яркости  $\rho_\alpha$  падающее на нее излучение);

$$L_\alpha = \rho_\alpha E,$$

где  $E$  — облученность (освещенность) на поверхности объекта, создаваемая внешним источником или осветительной системой.

Так, для диффузного ламбертовского (равнояркого) отражателя

$$L = \rho E / \pi. \quad (6.5)$$

Например, если осветительная система имеет излучатель с яркостью  $L_\pi$ , выходной зрачок площадью  $A_{\text{вых}}$ , коэффициент пропускания  $\tau_{c1}$  и может быть представлена с помощью формулы Манжена — Чиколева в виде эквивалентного точечного излучателя с осевой силой излучения

$$I_0 = \tau_{c1} L_\pi A_{\text{вых}}, \quad (6.6)$$

то освещенность объекта, расположенного на расстоянии  $l_1$  от выходного зрачка осветительной системы,

$$E = \tau_{c1} I_0 / l_1^2, \quad (6.7)$$

где  $\tau_{c1}$  — пропускание среды на пути  $l_1$ .

Представляя теперь объект вторичным ламбертовским излучателем и используя (6.1) — (6.7), получим, что поток, приходящий от объекта на входной зрачок приемной системы, расположенной от него на расстоянии  $l_2$  в среде с пропусканием  $\tau_{c2}$ ,

$$\Phi_{\text{вх}} \approx \tau_{c1} \tau_{c2} \tau_{c1} L_\pi A_{\text{вых}} \rho A_{\text{вх}} A_2 / (\pi l_1^2 l_2^2),$$

где  $A_2$  — видимая из входного зрачка приемной системы площадь объекта.

Для перехода к выходу оптической системы, в частности к плоскости чувствительного слоя приемника, значение  $\Phi_{\text{вх}}$  нужно умножить на коэффициент пропускания оптической системы  $\tau_0$ . Этот коэффициент определяется потерями на отражение, происходящими на  $N$  границах раздела оптических сред и оцениваемыми коэффициентами  $\rho_k$ , потерями на поглощение, происходящими в  $p$  оптических средах с коэффициентом поглощения  $\alpha_0$  на единицу длины пути в среде  $l$ , потерями на  $N_3$  зеркальных поверхностях, имеющих коэффициенты отражения  $\rho_3$ , а также потерями вследствие диафрагмирования и виньетирования пучков (если таковые имеют место в системе), определяемыми коэффициентами  $K_d$  [10, 52]. В общем случае

$$\tau_0 = \prod_{k=1}^{k=N} (1 - \rho_k) \prod_{m=1}^{m=p} (1 - \alpha_{0m})^{l_m} \prod_{n=1}^{n=N_3} \rho_{3n} K_d. \quad (6.8)$$

Для изображений конечных размеров поток, собираемый в плоскости изображений, может быть определен как

$$\Phi' \approx \tau_0 \pi (n'/n)^2 L \Delta A' \sin^2 \sigma'_A \cos \gamma', \quad (6.9)$$

где  $n'$  и  $n$  — показатели преломления оптических сред в пространстве изображений и предметов (для системы в воздухе  $n = n'$ );  $\Delta A'$  — площадь изображения;  $\sigma'_A$  и  $\gamma'$  — углы в пространстве изображений, соответствующие  $\sigma_A$  и  $\gamma$  в пространстве предметов.

Освещенность в плоскости изображений для площадных излучателей (объектов)

$$E' = \tau_0 \tau_0 \pi L \sin^2 \sigma_A \cos^4 \gamma' / V^2,$$

где  $V$  — линейное увеличение системы, а для системы с круглым выходным зрачком площадью  $A_{\text{зр}}$

$$E' = \tau_0 \tau_0 L \sin^2 \sigma'_A \cos^4 \gamma' (n'/n)^2 A_{\text{зр}}^2 / l'^2,$$

где  $l'$  — расстояние от выходного зрачка до плоскости изображений.

Для протяженных излучателей

$$E' = \tau_0 \tau_0 \pi L (n'/n)^2 \sin^2 \sigma'_A \cos^4 \gamma' V.$$

Для протяженных излучателей, находящихся в бесконечности ( $V = 0$ ), освещенность в плоскости полевой диафрагмы объектива с круглым выходным зрачком, находящимся в воздухе ( $n = n'$ ),

$$E' = (\pi/4) \tau_0 \tau_0 L (D/f')^2 \cos^4 \gamma'.$$

Во всех приведенных выше формулах не учитывался спектральный (избирательный) характер излучения источника и пропускания среды и оптической системы, т. е. тот факт, что  $L = L(\lambda)$ ,  $\tau_c = \tau_c(\lambda)$  и  $\tau_0 = \tau_0(\lambda)$ . Зная вид этих функций и спектральный диапазон работы системы  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ , можно соответственно переписать любое из приведенных выражений. Например, вместо (6.4) в общем случае

$$\Phi_{\text{вх } \lambda_1 \dots \lambda_2} \approx \pi A_\pi \sin^2 \sigma_A \cos \gamma \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) L(\lambda) d\lambda. \quad (6.10)$$

Приведенные формулы могут быть использованы для расчета как полезного сигнала, т. е. сигнала от наблюдаемого или контролируемого объекта, так и сигнала от помех и фона, т. е. на их основе можно составить основные энергетические уравнения СТЗ. При этом следует учитывать характер излучения источников сигнала и помех: собственное или отраженное, ламбертовское и т. п. Например, для достаточно распространенного случая, когда поток от объекта на входе СТЗ является суммой собственного теплового и отраженного или рассеянного ламбертовского излучений, яркость объекта можно представить как

$$L_{\lambda_1 \dots \lambda_2} = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) M(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) E(\lambda) d\lambda \right],$$

где  $\varepsilon(\lambda)$  — спектральная излучательная способность объекта;  $M(\lambda)$  — спектральная плотность собственного излучения объекта;

$\rho(\lambda)$  — спектральный коэффициент яркости (коэффициент отражения) объекта;  $E(\lambda)$  — спектральная плотность освещенности, создаваемой на объекте посторонним источником отраженного или рассеянного излучения;  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  — спектральный диапазон работы СТЗ.

Для приведения сигналов к выходу СТЗ или к выходу ее видеосенсора необходимо знать параметры и характеристики приемника излучения и следующего за ним электронного тракта [чувствительность приемника по напряжению  $S_U$  или току  $S_I$ , его спектральную чувствительность  $S(\lambda)$ , обнаружительную способность приемника  $D^*(\lambda)$ , коэффициент передачи (усиления) электронного тракта  $K_0$ , полосу пропускания электронного тракта  $\Delta f$  и др.].

Кроме того, при использовании в СТЗ модуляции потока излучения следует учитывать характер изменения сигнала и потери его мощности, происходящие при модуляции и последующем детектировании сигнала [52].

Выбор параметра, характеризующего качество работы видеосенсора СТЗ, зависит от конкретного типа системы и условий ее работы. Здесь могут быть использованы достаточно общие критерии, принятые в теории оптимальных методов приема (вероятность обнаружения, отношение правдоподобия, средний риск и др. [52]). На практике часто вполне приемлемым параметром является отношение сигнал—шум  $\mu$  на выходе видеосенсора или в какой-либо точке структурной схемы СТЗ. Ниже будет показано, как  $\mu$  связано с такими параметрами СТЗ, как ее пороговая энергетическая чувствительность, температурная разрешающая способность и др.

При расчете отношения сигнал—шум удобно рассматривать три случая: 1) преобладают внутренние шумы, обычно шумы приемника излучения; 2) преобладают внешние шумы, определяемые «пестрым» излучающим фоном; 3) необходимо учитывать и внутренние, и внешние шумы.

Для этих трех случаев значения  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  на выходе электронного тракта видеосенсора соответственно равны:

$$\mu_1 = k_2 k_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda / \sqrt{A \Delta f}; \quad (6.11)$$

$$\mu_2 = \frac{k_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \tau_o(\lambda) S_{U_{f_T}}(\lambda) d\lambda}{A_{вх} \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{L}_\Phi(\lambda) \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) S_{U_{f_T}}(\lambda) d\lambda}; \quad (6.12)$$

$$\mu_3 = \frac{k_2 K_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \tau_o(\lambda) S_{U_{f_T}}(\lambda) d\lambda}{\sqrt{u_{ш\text{ ввх}}'^2 + u_{ш\text{ ввх}}^2}}, \quad (6.13)$$

причем  $u'_{ш\text{ ввх}} = K_0 u_{ш.м}$  — шум приемника излучения, приведенный к выходу видеосенсора;

$$u''_{ш\text{ ввх}} = A_{вх} \Delta \Omega K_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{L}_\Phi(\lambda) \tau_c(\lambda) S_{U_{f_T}}(\lambda) d\lambda$$
 — среднее квадратическое значение случайного сигнала (шума), создаваемого «пестрым»

излучающим фоном.

В этих формулах  $k_2$  — коэффициент, учитывающий потери энергии сигнала в электронном тракте видеосенсора, например, использование лишь отдельных гармоник сигнала, переход от амплитудных значений к эффективным;  $k_f = u_{ш.т}/u_{ш.м} \leq 1$  — коэффициент, учитывающий изменения уровня шума приемника  $u_{ш.м}$  на его выходе в реальных условиях его работы (на рабочей частоте модуляции) относительно уровня шума  $u_{ш.т}$  в условиях паспортизации (тарифовки) приемника, т. е. на частоте модуляции  $f_T$ ;  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  — рабочий спектральный диапазон СТЗ;  $\Phi_c(\lambda)$  — спектральная плотность потока излучения, приходящего на входной зрачок, которая может быть вычислена по формулам вида (6.1)—(6.4) с учетом спектрального характера величин  $I$ ,  $L$ ,  $\varphi_c$ , например, по формуле вида (6.10);  $\tau_o(\lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания всей оптической системы;  $D^*(\lambda)$  — спектральная обнаружительная способность приемника излучения;  $A$  — площадь чувствительного слоя приемника излучения;  $A_{вх}$  — площадь входного зрачка системы;  $\Delta \Omega$  — телесное угловое поле зрения системы;  $\bar{L}_\Phi(\lambda)$  — среднее квадратическое значение спектральной плотности яркости «пестрого» фона;  $\tau_c(\lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания среды на пути от излучателя до оптической системы СТЗ;  $K_0$  — коэффициент преобразования сигнала электронным трактом видеосенсора (коэффициент усиления);  $S_{U_{f_T}}$  — спектральная характеристика вольтовой чувствительности приемника излучения, измеряемая при частоте модуляции потока  $f_T$ .

Уравнения вида (6.11)—(6.13) часто могут использоваться в качестве основных энергетических уравнений (неравенств) СТЗ при условии, что  $\mu_1 \geq \mu_n$ ,  $\mu_2 \geq \mu_n$  или  $\mu_3 \geq \mu_n$ , где  $\mu_n$  — пороговое, т. е. минимально необходимое для надежной работы СТЗ отношение сигнал—шум, определяемое или задаваемое, как отмечалось выше, например, из условий работы конкретной системы по какому-либо статистически обоснованному критерию [52].

В зависимости от назначения и условий работы СТЗ входящие в (6.11)—(6.13) величины  $\Phi_c(\lambda)$  и  $\bar{L}_\Phi(\lambda)$  могут быть представлены в виде развернутых выражений типа (6.1)—(6.3), (6.5) и производных от них. Например, если в угловое поле объектива СТЗ, ограничиваемое площадью  $A$  чувствительного слоя приемника, при сканировании рабочей зоны поочередно попадают изображения фона с яркостью  $\bar{L}_\Phi(\lambda)$  и совокупности площадного объекта с яркостью  $L_o(\lambda)$  и фоновой площадной помехи с яр-

костью  $\bar{L}_\Phi(\lambda)$ , то амплитуда изменений сигнала на входе приемника в соответствии с (6.2) будет

$$\Delta\Phi_c(\lambda) = \frac{A_{\text{вх}}A_{\text{п}}}{f^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) [L_c(\lambda) - \bar{L}_\Phi(\lambda)] d\lambda.$$

Подставляя это выражение в (6.11), получаем

$$\mu_1 = \frac{k_2 k_f A_{\text{вх}} A_{\text{п}}}{f^2 \sqrt{A} \Delta f} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L_c(\lambda) - \bar{L}_\Phi(\lambda)] \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda.$$

Для аналогичного случая, когда на приемник поочередно попадают изображения двух протяженных излучателей с яркостями  $L_{c1}(\lambda)$  и  $L_{c2}(\lambda)$ , на основании (6.3) и (6.11) находим

$$\mu_1 = \frac{k_2 k_f q A_{\text{вх}}}{f^2 \sqrt{A} \Delta f} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) [L_{c1}(\lambda) - L_{c2}(\lambda)] D^*(\lambda) d\lambda. \quad (6.14)$$

Часто энергетический расчет является основой для выбора конструктивных параметров СТЗ, которые входят в приведенные выше выражения. Более подробно это будет рассмотрено в п. 6.2 и 6.3.

При энергетических расчетах также достаточно часто задаются целью определить важнейшие параметры СТЗ, такие, как *пороговая энергетическая чувствительность*  $E_{\text{п}}$  — минимальное значение освещенности на входном зрачке, при котором обеспечивается заданное отношение сигнал — шум на выходе; *средняя квадратическая погрешность слежения*  $\sigma_\alpha$ , обусловленная внутренними шумами СТЗ; *температурная разрешающая способность*  $\Delta T_{\text{п}}$  СТЗ — минимальная разность температур двух излучателей, раздельно наблюдаемых СТЗ; *предельно разрешаемая СТЗ разность излучательных способностей*  $\Delta \epsilon_{\text{п}}$  или *коэффициентов отражения*  $\Delta \rho_{\text{п}}$  и ряд других. Общая методика получения формул для расчета этих величин сводится к составлению уравнений вида (6.11)–(6.14), характеризующих работу конкретной СТЗ с учетом  $\mu_{\text{п}}$ , и решению их относительно искомой величины [52].

Так, если пороговую энергетическую чувствительность представить как

$$E_{\text{п}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) d\lambda / (\mu_{\text{п}} A_{\text{вх}}),$$

то, считая, например, что  $\mu_{\text{п}} = \mu_1$ , легко получить выражение

$$E_{\text{п}} = \frac{\sqrt{A} \Delta f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) d\lambda}{A_{\text{вх}} k_2 k_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}$$

или для узкой спектральной полосы пропускания  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ , в которой величины  $\Phi_c(\lambda)$ ,  $\tau_o(\lambda)$ ,  $D^*(\lambda)$  можно принять постоянными, например при использовании в качестве излучателя лазера,

$$E_{\text{пл}} = \frac{\sqrt{A} \Delta f}{A_{\text{вх}} k_2 k_f \tau_o \lambda D^*}.$$

Если видеосенсор может быть представлен в виде линейной следящей системы, охваченной цепью обратной связи с коэффициентом передачи  $K_3$ , то флуктуационная средняя квадратическая погрешность слежения [52]

$$\sigma_\alpha = \alpha_{\text{п}} / (\mu K_3), \quad (6.15)$$

где  $\alpha_{\text{п}}$  — линейная зона статической характеристики следящей системы, может быть представлено в развернутом виде путем подстановки в (6.15) значения отношения сигнал — шум  $\mu$ , определенного по формулам типа (6.11)–(6.13). Например,

$$\sigma_\alpha = \frac{\alpha_{\text{п}} \sqrt{A} \Delta f}{K_3 k_2 k_f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_c(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}.$$

Для протяженных излучателей разница в излучательных способностях которых составляет  $\Delta \epsilon$ , при преобладании собственного теплового излучения температурная разрешающая способность будет

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{\pi f'^2 \sqrt{A} \Delta f T^2}{k_2 k_f q A_{\text{вх}} \Delta \epsilon c_2} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) \frac{M(\lambda)}{\lambda} D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1},$$

где  $T$  — температура объектов;  $c_2 = 1,4388 \times 10^{-2}$  м·К — одна из постоянных закона Планка;  $M(\lambda)$  — функция Планка для температуры  $T$  [52]; обозначения остальных величин были даны выше.

Величина  $\Delta \epsilon_{\text{п}}$  для этого же случая при  $\mu_{\text{п}} = 1$

$$\Delta \epsilon_{\text{п}} = \frac{\pi f'^2 \sqrt{A} \Delta f}{k_2 k_f q A_{\text{вх}}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) M(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-6}.$$

Для протяженных объектов, отражающих подсвечивающее их излучение с коэффициентами отражения  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , представляя яркости их как  $L_{c1}(\lambda) = \rho_1 E(\lambda)/\pi$  и  $L_{c2}(\lambda) = \rho_2 E(\lambda)/\pi$ , легко получить  $\Delta \rho_{\text{п}} = \rho_1 - \rho_2$ :

$$\Delta \rho_{\text{п}} = \frac{\pi f'^2 \sqrt{A} \Delta f}{k_2 k_f q A_{\text{вх}}} \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) E(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \right]^{-1}.$$

## 6.2. МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЫБОРА И РАСЧЕТА НЕКОТОРЫХ ВАЖНЕЙШИХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Обобщенная методика энергетического (светотехнического) расчета позволяет определить необходимые значения основных параметров приемника излучения, а также источника, если СТЗ робота работает активным методом. Поскольку в энергетические уравнения вида (6.11)—(6.15) и другие одновременно входит несколько параметров и характеристик, описывающих свойства источника и приемника излучения, например  $I(\lambda)$  или  $M(\lambda)$ ,  $D^*(\lambda)$ ,  $A$ , решение задачи по их расчету является порой неоднозначным.

Если по каким-либо соображениям выбраны приемник излучения и оптическая система, а также известны условия работы СТЗ робота, то из формул, приведенных в пп. 3.3 и 6.1, легко определить требования к важнейшим энергетическим (светотехническим) параметрам источника излучения. Например, яркость источника в схеме с конденсором (см. рис. 3.7) определится как

$$L_{\Sigma} \geq E_0 a'^2 / (\tau_c \tau_R A_R).$$

Аналогично яркость или сила излучения источника могут быть найдены из формул (6.11)—(6.15) и им подобных. Такие расчеты являются сугубо ориентировочными, так как не учитывают спектральный характер  $L$  или  $I$ . Поэтому после выбора источника целесообразно произвести поверочный энергетический расчет с использованием зависимостей  $M(\lambda)$ ,  $L(\lambda)$ ,  $I(\lambda)$ , характеризующих излучатель.

Поскольку в большинстве справочных материалов эти зависимости приводятся в виде графиков, построенных в относительных единицах, и даются лишь интегральные их значения  $M = M_{\Sigma}$ ,  $L = L_{\Sigma}$ ,  $I = I_{\Sigma}$ , относящиеся ко всему видимому ( $\lambda = 0,4 \dots 0,76$  мкм), ко всему оптическому ( $\lambda = 0,5 \dots 10^3$  мкм) или другому достаточно широкому спектральному диапазону, часто необходимо найти абсолютные значения монохроматических величин  $M(\lambda)$ ,  $L(\lambda)$ ,  $I(\lambda)$  или  $I(\lambda)$ . Методика такого пересчета изложена, например, в [52]. Абсолютные значения  $M^{abc}(\lambda)$ ,  $L^{abc}(\lambda)$ ,  $I^{abc}(\lambda)$  для произвольной длины волны  $\lambda_i$  могут быть найдены по формулам:

$$M^{abc}(\lambda_i) = M(\lambda_i) M_{\Sigma} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) d\lambda;$$

$$L^{abc}(\lambda_i) = L(\lambda_i) L_{\Sigma} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda;$$

$$I^{abc}(\lambda_i) = I(\lambda_i) I_{\Sigma} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda,$$

Таблица 6.1

Коэффициенты для пересчета параметров ламп некоторых типов

| Тип                                      | a    | b    | c    | d    | e    | f    | g    |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Вакуумированные $T_{\text{дв}} = 2450$ К | 3,85 | 7,00 | 13,5 | 23,3 | 1,82 | 3,51 | 2,22 |
| Газополные $T_{\text{дв}} = 2800$ К      | 4,03 | 6,90 | 14,8 | 28,1 | 1,71 | 3,67 | 2,40 |
| Тип                                      | h    | i    | l    | m    | n    | q    | s    |
| Вакуумированные $T_{\text{дв}} = 2450$ К | 6,05 | 8,36 | 0,55 | 1,93 | 3,33 | 0,58 | 1,58 |
| Газополные $T_{\text{дв}} = 2800$ К      | 6,98 | 7,74 | 0,38 | 2,14 | 4,08 | 0,53 | 1,53 |

где  $M(\lambda_i)$ ,  $L(\lambda_i)$ ,  $I(\lambda_i)$  — значения монохроматических плотности излучения, яркости и силы излучения в относительных единицах для длины волны  $\lambda_i$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — границы спектрального диапазона, для которого определены  $M_{\Sigma}$ ,  $L_{\Sigma}$ ,  $I_{\Sigma}$ .

Другой вид пересчета параметров источника излучения, который часто используют на практике, это пересчет ряда параметров ламп накаливания при изменении напряжения  $U$  или силы тока  $I$  питания. Взаимосвязь этих параметров со световыми параметрами ламп определяется зависимостями:

$$\frac{L_x}{L_0} = \left( \frac{\Phi_{v0}}{\Phi_{vx}} \right)^a = \left( \frac{H_0}{H_x} \right)^b = \left( \frac{U_0}{U_x} \right)^c = \left( \frac{I_0}{I_x} \right)^d;$$

$$\frac{\Phi_x}{\Phi_{v0}} = \left( \frac{H_x}{H_0} \right)^e = \left( \frac{U_x}{U_0} \right)^f = \left( \frac{P_x}{P_0} \right)^g = \left( \frac{I_x}{I_0} \right)^h = \left( \frac{R_x}{R_0} \right)^i;$$

$$\frac{H_0}{H_x} = \left( \frac{\Phi_{v0}}{\Phi_{vx}} \right)^l = \left( \frac{U_0}{U_x} \right)^m = \left( \frac{I_0}{I_x} \right)^n;$$

$$\frac{I_x}{I_0} = \left( \frac{U_x}{U_0} \right)^q, \quad \frac{P_x}{P_0} = \left( \frac{U_x}{U_0} \right)^s,$$

где индекс «0» соответствует значению параметра при номинальном (паспортном) режиме, индекс «x» — при выбранном режиме;  $L$  — срок службы лампы;  $\Phi_v$  — световой поток, лм;  $H$  — световая отдача, лм/Вт;  $R$  — сопротивление нити лампы, Ом;  $P$  — мощность лампы, Вт; значения показателей степеней в этих формулах приведены в табл. 6.1.

Приведенные зависимости часто используют для управления параметрами ламп накаливания. Например, уменьшение напряжения питания на 10 % от номинального увеличивает срок службы лампы более чем в 4 раза.



Формулы для пересчета параметров приемников излучения

| Паспортный параметр  | Единица                                       | Формулы пересчета   | Единица                                |
|--|---|---|--|
| Чувствительность к потоку излучения $S_e^p$  | В·Вт <sup>-1</sup>                            | $S_e^p = S_e^n \varphi^p / \varphi^n$   | В·Вт <sup>-1</sup>                     |
|  |   | $S_U^p = S_U^n / (683 \varphi_r^n)$   | В·лм <sup>-1</sup>                     |
|  |   | $S_U^p = S_e^n \varphi^p / (683 \varphi_r^n \varphi^n)$   | В·лм <sup>-1</sup>                     |
| Чувствительность к световому потоку $S_U^p$  | В·лм <sup>-1</sup>                            | $S_e^p = S_U^p 683 \varphi_r^n \varphi^n / \varphi^p$   | В·Вт <sup>-1</sup>                     |
|  |   | $S_e^n = 683 S_U^p \varphi_r^n$   | В·Вт <sup>-1</sup>                     |
|  |   | $S_U^p = S_U^n \varphi_r^n \varphi^p / (\varphi^n \varphi_r^p)$   | В·лм <sup>-1</sup>                     |
| Интегральная чувствительность $S_{e\Sigma}$<br>(монохроматическая чувствительность $S_{\lambda_i}^{отн}$ ) | В·Вт <sup>-1</sup><br>(относительные единицы) | Монохроматическая чувствительность<br>$S_{\lambda_i}^{абс} = S_{\lambda_i}^{отн} S_{e\Sigma} / \varphi^n$               | В·Вт <sup>-1</sup>                     |
| То же для $S_{U\Sigma}$  | В·лм <sup>-1</sup>                            | $S_{\lambda_i}^{абс} = 683 S_{\lambda_i}^{отн} S_{U\Sigma} \varphi_r^n / \varphi^p$                                     | В·лм <sup>-1</sup>                     |
| Удельная обнаружительная способность $D^{*п}$  | Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup>        | $D^{*р} = D^{*п} \varphi^p / \varphi^n$   | Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup> |
| Монохроматическая чувствительность $S_{\lambda_i}^{отн}$   | Относительные единицы                         | Монохроматическая удельная обнаружительная способность<br>$D_{\lambda_i}^{*п} = D^{*п} S_{\lambda_i}^{отн} / \varphi^p$ | Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup> |
|  |   | $D_{\lambda_i}^{*р} = D^{*р} S_{\lambda_i}^{отн} / \varphi^p$   | Вт <sup>-1</sup> ·см·Гц <sup>1/2</sup> |

Примечание. Индекс «п» означает, что параметры являются паспортными, т. е. определяются для условий паспортизации приемника, а индекс «р» — в рабочих условиях.

При изменении температуры нити накала заметно меняется и спектральная плотность излучения  $M(\lambda)$ , т. е. и энергетическая светимость, яркость и световая отдача лампы, что следует учитывать при энергетических расчетах СТЗ.

Энергетический расчет позволяет определить требования к ряду важнейших параметров и характеристик приемника излучения. Действительно, в уравнения вида (6.11)—(6.15) и им подобные входят обнаружительная способность приемника  $D^*$  и площадь  $A$  его чувствительного слоя. Кроме того, ширина полосы частот  $\Delta f$  сигнала на выходе приемника зависит от метода сканирования и числа  $N$  площадок чувствительного слоя многоэлементного приемника. Поэтому, выражая  $\Delta f$  в виде функции  $N$  и подставляя это выражение в основное энергетическое уравнение, например вида (6.15), можно решить его относительно  $N$ , т. е. определить исходные требования к геометрии многоэлементного приемника. Например, при параллельной схеме строчного сканирования ширина полосы частот  $\Delta f$  сигнала определяется как [52]

$$\Delta f = n_1 f_c / (k_{\Delta f} \eta_c N),$$

где  $n_1$  — число элементов разложения сканируемого поля вдоль направления сканирования;  $f_c$  — частота сканирования;  $k_{\Delta f}$  — коэффициент, связывающий ширину полосы пропускания частот с временем просмотра одного элемента разложения, которое должно превышать постоянную времени приемника и электронного тракта;  $\eta_c$  — КПД сканирования.

Очевидно, что так же можно сопоставить требования к СТЗ по разрешению и полосе частот  $\Delta f$  с требованиями к постоянной времени приемника  $\tau_{п.в}$ , поскольку обычно  $\Delta f \geq 1/(k_{\Delta f} \tau_{п.в})$ .

Очень важными для оценки приемника излучения являются его эксплуатационные и технико-экономические параметры, такие, например, как стабильность характеристик во времени и в сложных эксплуатационных условиях, надежность, малые масса и габаритные размеры, возможность охлаждения, стоимость и др. К сожалению, достаточно четких и универсальных критериев выбора приемника по этим параметрам в настоящее время не существует.

Часто первым этапом выбора приемника является определение спектрального диапазона его работы. Во многих случаях этот диапазон  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  выбирают из априорно известных условий работы СТЗ, например, из условия распределения оптических спектров полезного сигнала и помех, сопровождающих работу СТЗ. Однако в этом заданном диапазоне могут работать несколько приемников, имеющих в распоряжении разработчика. В таком случае необходимо найти значения интегралов в формулах вида (6.11)—(6.13), которые зависят от степени согласования спектральной характеристики приемника  $D^*(\lambda)$  или  $S(\lambda)$  со спектром полезного сигнала  $M(\lambda)$ , спектральным пропусканием среды  $\tau_c(\lambda)$

и оптической системы  $\varphi_o(\lambda)$  (обычно для небольших интервалов  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  пропускание  $\varphi_o(\lambda)$  принимается постоянным).

Достаточно просто качество согласования спектральных характеристик приемника и других звеньев СТЗ можно оценить с помощью коэффициентов использования приемника (коэффициентов спектрального соответствия, коэффициентов корреляции)

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) \tau_c(\lambda) \varphi_o(\lambda) S(\lambda) d\lambda \bigg/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) \tau_c(\lambda) \varphi_o(\lambda) d\lambda, \quad (6.16)$$

где  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  — спектральный диапазон;  $M(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической светимости источника;  $\tau_o(\lambda)$  — пропускание среды, в которой работает СТЗ;  $\tau_o(\lambda)$  — пропускание оптической системы СТЗ;  $S(\lambda)$  — спектральная характеристика чувствительности приемника.

Если для ряда приемников рассчитать значения  $\Phi$ , характеризующие прием излучения полезного сигнала ( $\Phi_c$ ) и помех, например фоновых ( $\Phi_\Phi$ ), то, очевидно, лучшим с точки зрения спектрального соответствия будет приемник с большим отношением  $\Phi_c/\Phi_\Phi$ .

Диапазон  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  может быть найден на основе расчета ряда значений  $\Phi$  (или  $\Phi_c/\Phi_\Phi$ ) для различных  $\lambda_1 \dots \lambda_2$ ,  $M(\lambda)$  и т. д. путем выбора наиболее приемлемого из них.

Одновременно с выбором спектрального диапазона работы приемника часто целесообразно определить эффективные, т. е. приведенные к конкретным условиям его работы значения вольтовой или токовой чувствительности приемника  $S$ , его обнаружительной способности  $D^*$ , порога чувствительности и других параметров, что осуществляется путем пересчета паспортных параметров приемника ( $S$ ,  $D^*$  или  $\Phi_n$ ) к реальным условиям его эксплуатации с помощью коэффициентов использования. Методика его подробно описана в [52].

В табл. 6.2 приведены формулы для наиболее часто встречающихся вариантов пересчета параметров приемника, необходимость в котором возникает при изменении спектра излучения источника относительно условий паспортизации приемника, при определении абсолютных значений параметра по отношению к монохроматическому излучению, при переходе к использованию приемника в спектральном диапазоне, отличном от того, для которого он паспортизован, например при переходе от видимого диапазона к инфракрасному.

Коэффициенты использования для условий паспортизации и рабочих условий определяются как

$$\Phi^n = \frac{\int_{\Delta\lambda_n} M^n(\lambda) \tau_o^n(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_p} M^n(\lambda) \tau_o^n(\lambda) d\lambda};$$

$$\Phi^p = \frac{\int_{\Delta\lambda_p} M^p(\lambda) \tau_o^p(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda_p} M^p(\lambda) \tau_o^p(\lambda) d\lambda},$$

причем  $\Delta\lambda_n$  — спектральный диапазон работы приемника в условиях паспортизации, а  $\Delta\lambda_p$  — в условиях эксплуатации (в рабочих условиях).

Коэффициент использования глаза

$$\Phi_v = \frac{\int_{\Delta\lambda} M(\lambda) \tau_o(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} M(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda},$$

где  $V(\lambda)$  — относительная видность глаза. Остальные обозначения в этих формулах те же, что в (6.16).

Анализ оптимальности согласования спектральных характеристик приемника, излучателя, среды на первом этапе часто ведут без учета возможностей фильтрации, т. е. без оптимизации спектральной характеристики  $\tau_\Phi(\lambda)$  оптического фильтра, входящего в состав оптической системы.

Если при составлении энергетического уравнения влияние внешних излучающих помех и фонов учтено, то на этапе анализа помехозащищенности СТЗ при использовании средств спектральной фильтрации можно откорректировать выбор  $S(\lambda)$  и  $\tau_\Phi(\lambda)$ .

Одним из этапов выбора приемника может являться оценка необходимости применять системы охлаждения его чувствительного слоя и выбор этой системы. Это определяется тем, что многие приемники, чувствительные в инфракрасной области спектра, работают при условии охлаждения их чувствительного слоя до 77 К. В настоящее время системы охлаждения приемников излучения обладают ограниченным ресурсом автономной работы, сложны, дороги и практически не используются в робототехнике.

Важным является выбор геометрии приемника — одноплощадочного или многоплощадочного, определение необходимых размеров и конфигурации его чувствительного слоя. Выбор типа приемника зависит от принципа работы всей СТЗ, например от выбранной схемы сканирования. Несмотря на преимущества и перспективность для решения многих задач многоэлементных приемников и передающих телевизионных трубок, их высокая стоимость, разброс параметров отдельных площадок, трудность охлаждения, сложность электронных цепей включения и коммутации сигналов, идущих от различных площадок приемника, и ряд других факторов часто накладывают серьезные ограничения на использование этих приемников в СТЗ роботов.

Размер  $l$  чувствительной площадки одноплощадочного приемника, располагаемого в фокальной плоскости объектива приемной системы, определяют по заданному значению мгновенного поля  $2\omega$  объектива и его фокусному расстоянию  $f'$ :  $l = 2f' \tan \omega$ , поскольку в этом случае чувствительная площадка приемника обычно служит полевой диафрагмой.

Как указывалось в п. 3.3, для устранения влияния неоднородности чувствительности приемника по площадке и уменьшения ее размера часто используют конденсоры или эквивалентные им оптические элементы. Расчет геометрических параметров таких схем, включая и размер площадки приемника, подробно описан в [52].

При использовании многоэлементного приемника простейшим требованием, предъявляемым к размеру одного элемента его чувствительного слоя, часто является превышение этого размера  $l$  над размером кружка рассеяния, создаваемого объективом. Без принятия специальных мер по обработке сигналов, снимае-

мых с элементов приемника, размер площадки определяет разрешение видеосенсора в плоскости изображений.

Требования к постоянной времени  $\tau_{п.и}$  приемника приходится согласовывать с требованиями по быстродействию, определяемыми, например, из расчета сканирующей системы. Как указывалось выше, ширина спектра сигнала, а следовательно, и полоса пропускания  $\Delta f$  электронного тракта, входящая в основное энергетическое уравнение, обратно пропорциональна времени наблюдения приемником одного элемента разложения. Очевидно, для работы видеосенсора СТЗ необходимо, чтобы  $\tau_{п.и} \leq 1/(k_{\Delta f} \Delta f)$ .

Приведенные выше соображения, рекомендации и формулы служат чаще всего для предварительной оценки источников и приемников излучения, предназначенных для работы в составе СТЗ робота. Полученные на их основе значения отдельных параметров являются исходными данными для сопоставления находящихся в распоряжении разработчика СТЗ излучателей и приемников. Пользуясь ими, можно также сформулировать ряд достаточно принципиальных требований к вновь разрабатываемым элементам СТЗ.

При окончательном выборе типов источника и приемника излучения приходится учитывать практически всю совокупность параметров, описывающих их свойства, а также их конструктивные, технико-экономические, эксплуатационные и другие характеристики, о которых вкратце говорилось выше в гл. 3 и 4.

Следует также отметить, что в ряде случаев предварительный выбор источника (и особенно приемника излучения) определяет принцип построения и программное обеспечение СТЗ робота. При этом расчеты по приведенным выше формулам помогают найти условия, при которых источник и приемник обеспечивают надлежащее функционирование СТЗ.

### 6.3. ВЫБОР И РАСЧЕТ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ

**Порядок расчета оптической системы.** Первым этапом проектирования оптической системы обычно является выбор и обоснование принципиальной схемы, при котором определяются исходные данные для последующих расчетов. При этом учитываются условия работы системы, выбирается метод работы — пассивный или активный, оценивается возможность использования тех или иных источников и приемников излучения, определяется уровень сигнала, поступающего на приемник, намечаются средства борьбы с помехами, рассчитываются важнейшие габаритные параметры оптической системы, например минимальная необходимая площадь входного зрачка и угловое поле, оценивается возможность и необходимость использования сканирования поля обзора, определяются в первом приближении требования к другим узлам,

прежде всего к излучателю, приемнику излучения и электрическому тракту. Очень многие параметры оптической системы и требования в ней можно определить на основе энергетического расчета, методика которого описана в п. 6.1.

На втором этапе проводится габаритный расчет оптической системы, при котором предполагается, что система идеальная, т. е. такова, что каждая точка в пространстве предметов изображается точкой и масштаб изображения постоянен в пределах всего поля. Отдельные компоненты принимаются бесконечно тонкими, дифракционные и другие физические явления не учитываются. В результате этого расчета определяются основные габаритные параметры всех оптических элементов (световые диаметры, фокусные расстояния, угловые поля, размеры диафрагм и зрачков) и их расположение. По значениям этих параметров проводится подбор отдельных элементов или осуществляется следующий этап расчета — абберационный.

При абберационном расчете определяются конструктивные параметры элементов (радиусы, толщины и др.), материалы, из которых они изготавливаются, проводится их взаимное согласование, главным образом, из необходимости получить изображение требуемого качества. Методики габаритного и абберационного расчетов изложены в многочисленной литературе, например в [5, 6, 10 и др.].

**Определение основных габаритных параметров приемной оптической системы.** Во многих случаях основные габаритные параметры оптической системы СТЗ могут быть определены из энергетического расчета. Действительно, в выражения вида (6.1), (6.2) и др. входит в явном виде площадь  $A_{вх}$  входного зрачка приемной оптической системы. В случае приема излучения от протяженного источника в аналогичные выражения в столь же явном виде входят фокусное расстояние  $f'$  объектива и площадь  $q$  полевого диафрагмы.

Если, как это часто бывает на практике, угловое поле  $2\omega$  приемной системы определяется площадью  $A$  чувствительного слоя приемника, расположенного в фокальной плоскости объектива, т. е.  $q = A$ , то при круглой форме этого слоя

$$\operatorname{tg} 2\omega \approx 2\sqrt{A/\pi}/f'. \quad (6.17)$$

Несложный анализ формул, приведенных в п. 6.2, показывает, что с точки зрения энергетических соотношений величины диаметра входного зрачка  $D$ , фокусного расстояния  $f'$  и углового поля  $2\omega$  объектива приемной системы находятся в тесной связи и должны выбираться практически одновременно.

Если в СТЗ трудно обеспечить необходимые энергетические (светотехнические) соотношения между полезными сигналами и помехами, то в первую очередь следует рассчитывать минимально допустимые значения  $D$  ( $A_{вх}$ ) или  $D/f'$ .

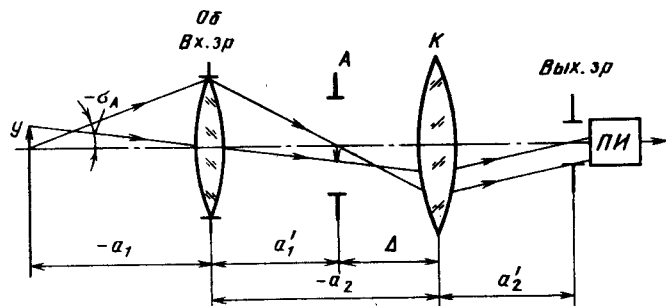


Рис. 6.1. Оптическая схема приемной системы с конденсором

При расчете величины  $D/f'$  (для протяженных излучателей) важно сразу же оценить возможное разрешение проектируемой системы, определяемое дифракцией и aberrациями, зависящими от  $D/f'$  [10]. Так, для круглого входного зрачка радиус дифракционного кружка в фокальной плоскости определяется как  $\rho_d = 1,22\lambda/(D/f')$ , т. е. зависит от относительного отверстия объектива. Вследствие aberrаций этот радиус увеличивается, и иногда принимают, что  $\rho_{аб} = k_a \rho_d$ , причем коэффициент  $k_a$  выбирают равным 3 ... 5.

Отсюда ясно, что при рассчитанном и выбранном  $D$  величина фокусного расстояния  $f'$  объектива может выбираться в соответствии с допуском на разрешение системы, т. е. с  $\rho_{аб}$ . Этот допуск часто определяется требованиями к угловому разрешению  $\Delta\omega$  СТЗ в пространстве предметов. При заданном линейном разрешении  $\Delta y$  анализатора изображений или приемника излучения, например при равенстве  $\Delta y$  размеру одного чувствительного элемента многоэлементного приемника, располагаемого в фокальной плоскости, величина  $f' = \Delta y/\Delta\omega$ , где  $\Delta\omega$  взят в радианной мере.

При заданной площади  $A$  чувствительного слоя приемника, определяющей в соответствии с (6.17) угловое поле  $2\omega$  системы, величина  $f'$  может быть определена из этой формулы.

Наконец, фокусное расстояние объектива может быть найдено из условий получения требуемого увеличения  $V$  при заданных продольных габаритах  $L$  всей системы (см. рис. 3.10). Действительно, так как при  $s \approx 2f'V \approx f'(2f' - L)$ , то  $f' \approx VL/(2V - 1)$ .

Если  $D$  и  $f'$  выбирались отдельно, то после такого выбора необходимо провести хотя бы предварительную оценку aberrаций в системе.

Одной из наиболее рациональных схем приемной оптической системы СТЗ роботов является схема, представленная в упрощенном виде на рис. 6.1. В ней изображение объекта строится объективом Об в плоскости анализатора А, оправа которого служит полевой диафрагмой. За анализатором установлен конденсор (коллектив) К, строящий изображение входного зрачка (Вх. зр)

в плоскости чувствительного слоя приемника излучения ПИ или в непосредственной близости от нее.

Порядок габаритного расчета такой системы может быть следующим:

1) путем энергетического расчета определяют минимально необходимое значение диаметра входного зрачка объектива;

2) с учетом указанных выше соображений выбирают фокусное расстояние объектива; например, если заданы расстояние  $a_1$  и линейное увеличение объектива  $V_1$ , то

$$a'_1 = V_1 a_1 \quad \text{и} \quad f' = a_1 a'_1 / (a_1 - a'_1);$$

3) определяют диаметр полевой диафрагмы по заданному полю  $2\omega$

$$D_a = 2a'_1 \tan \omega;$$

4) зная размер чувствительного слоя фотоприемника, равный диаметру выходного зрачка  $D_{\text{вых}}$ , вычисляют необходимое увеличение  $V_2$  конденсора:

$$V_2 = D_{\text{вых}}/D;$$

5) выбирая из конструктивных соображений значение  $\Delta$ , находят

$$a_2 = -(a'_1 + \Delta); \quad a'_2 = V_2 a_2$$

и фокусное расстояние конденсора

$$f'_2 = a_2 a'_2 / (a_2 - a'_2).$$

В [52] подробно рассмотрена аналогичная схема для объекта в бесконечности ( $a_1 \rightarrow \infty$ ) и приведены формулы для расчета параметров конденсора.

Иногда при выборе параметров объектива энергетические соотношения не являются определяющими, например, если освещенность в плоскости наблюдаемых или контролируемых объектов достаточно велика. В таких случаях габаритный расчет объектива можно вести в следующей последовательности:

1) определить или выбрать увеличение объектива  $V$  и его апертурный угол в пространстве предметов  $\sigma_A$ ;

2) найти расстояние  $a$  от передней главной плоскости объектива до предмета

$$a \approx L/(V - 1),$$

где  $L$  — расстояние между предметом и плоскостью его изображения (конструктивный параметр СТЗ);

3) рассчитать фокусное расстояние объектива

$$f' = -VL/(1 - V)^2,$$

при этом расстояние  $a'$  от объектива (от его задней главной плоскости) до изображения  $a' = Va$ ;

4) если входной зрачок совпадает с объективом, то его диаметр

$$D = -2a \operatorname{tg} \sigma_A;$$

5) определить значение относительного отверстия  $D/f'$ ; найти дифракционное разрешение, т.е. размер кружка при  $2\rho = 2,44\lambda f'/D$ .

Затем выбирают тип или схему объектива, после чего можно проводить его абберационный расчет.

**Габаритный расчет передающих (осветительных) систем.** Для простейшей осветительной системы, представленной на рис. 3.8, диаметр конденсора может быть найден из (3.3):

$$D_K = 2a' \sqrt{E_0/(\pi \tau_c \tau_K L_K)}.$$

Если в передающей системе изображение источника излучения строится в плоскости входного зрачка объектива (рис. 3.9), то линейное увеличение конденсора  $V_K = D/l_K < 0$ , где  $D$  — диаметр входного зрачка объектива;  $l_K$  — размер излучающего элемента источника.

Исходя из требования создать на расстоянии  $l'$  от передающей системы освещенность  $E \geq E_n$ , где  $E_n$  — пороговая чувствительность приемной системы, приведенная к освещаемой плоскости, из (6.6) и (6.7) определим минимальную необходимую площадь выходного зрачка объектива

$$A_{\text{вых}} \geq E_n l'^2 / (\tau_c \tau_K L_K). \quad (6.18)$$

Отсюда легко найти диаметр зрачка объектива, а его фокусное расстояние  $f'$  при заданном увеличении объектива  $V_{об}$  можно найти по приближенной формуле

$$f' \approx l' / (1 - V_{об}), \quad (6.19)$$

где  $V_{об} = y'/y$ .

Объединяя (6.18) и (6.19), несложно получить формулу для расчета относительного отверстия объектива  $D/f'$ .

Если на освещаемой плоскости необходимо создать изображение какой-либо марки (диапозитива), располагаемой между конденсором и объективом (см. рис. 3.9), то отрезок  $a$ , определяющий положение марки относительно объектива, находят из соотношения  $a = -f' (1 - V_{об})$ . Величину  $\Delta$  выбирают из конструктивных соображений. Расстояние  $a_K \approx (\Delta - a - f')/V_K$ , а фокусное расстояние конденсора  $f'_K = (\Delta - a - f')/(1 - V_K)$ .

Размер сечения  $y'$  световой трубки в угловом поле объектива со стороны освещаемой плоскости определяется выражением  $\operatorname{tg} \omega' = -y'/l'$ .

Апертурный угол источника  $\sigma_A$  можно рассчитать, пользуясь формулой

$$\sin \sigma_A \approx V_K \sin \sigma'_A = V_K y / \sqrt{y'^2 + l'^2}.$$

Значение  $\sin \sigma'_A$  находят по соотношениям для освещенности в плоскости  $y'$  (см., например, [52]).

После определения величин  $\sigma_A$  и  $\sigma'_A$  можно выбрать типовую конструкцию конденсора, пользуясь рекомендациями, приведенными в 3.3 и в [10], а затем приступить к абберационному расчету всей осветительной системы.

**Предварительные оценки аббераций простейших оптических систем.** Теория аббераций и их расчет, а также оценка качества оптического изображения подробно изложены во многих специальных монографиях и учебниках. Приведем лишь некоторые соотношения из этих разделов современной прикладной оптики.

Рассмотрим простейшую оптическую систему в виде одиночной линзы с радиусами первой и второй сферических поверхностей  $r_1$  и  $r_2$  и, соответственно, кривизнами этих поверхностей  $c_1 = 1/r_1$ ,  $c_2 = 1/r_2$ . Если наблюдаемый объект находится на большом расстоянии  $a \gg f'$  от линзы (в практической бесконечности), то угловой размер  $\beta_{сф\infty}$  (в миллирадианах) кружка рассеяния из-за действия сферической абберации определяется для тонкой линзы как

$$\beta_{сф\infty} = \frac{1}{32(n-1)2K^2} [n^2 - (2n+1)K + (n+2)K^2/n],$$

где  $K = f'/D$  — диафрагменное число;  $D$  — диаметр входного зрачка (оправы) линзы;  $n$  — показатель преломления материала линзы.

Если соблюсти условие

$$c_1/(c_1 - c_2) = n(2n+1)/[2(n+2)],$$

то угловая величина  $\beta_{сф\infty}$  становится минимальной

$$\beta_{сф\infty \min} = n(4n-1)/[128(n-1)^2(n+2)K^2].$$

При этом кривизна первой поверхности

$$c_1 = n(2n+1)/[2(n+2)(n-1)],$$

а второй

$$c_2 = [n(2n-1) - 4](1/f')/[2(n+2)(n-1)].$$

Формулы для расчета основных аббераций одиночной линзы приведены в табл. 6.3.

Продольная сферическая абберация, определяемая расстоянием между плоскостью изображения (для параксиальной области) и плоскостью, где кружок рассеяния вследствие сферической абберации минимален, определяется следующими соотношениями:

$$\Delta_{сф} = 3\beta_{сф} f'^2/D \text{ — для предмета в бесконечности;}$$

$$\Delta_{сф} = 3\beta_{сф} [D(1/f' - 1/a)^2] \text{ — для предмета, находящегося}$$

на расстоянии  $-a$  от линзы.

Формулы для оценки aberrаций одиночной линзы

| Аберрация                                       | Объект в бесконечности                                      |  | Объект на конечном расстоянии $a$   |  |
|---|---|--|---|--|
|   | в общем случае  | при условии минимума сферической aberrации | в общем случае  | при условии минимума сферической aberrации   |
| Сферическая aberrация (поперечная) $\beta_{cf}$ | $\frac{[n^2 - (2n+1)K + (n+2)K^2/n]}{32(n-1)^2 K^3}$        | $\frac{n(4n-1)}{128(n-1)^2(n+2)K^3}$       | $\frac{D^3 n'}{32f'(n-1)^2} \left\{ \left[ \frac{n^2}{-(2n+1)K} + \frac{n+2}{n} K^2 \right] \left( \frac{1}{f'} \right)^2 + \frac{1}{(3n^2-2n+1)} - \frac{4(n^2-1)K/n}{(a/f') + (3n+2)(n-1)^2/na^2} \right\}$ | $\frac{D^3 n}{128(n-1)^2(n+2)} \times \left[ \frac{n^2}{(4n-1)n^2/f'^2} - 4(n^2-2n+1) \left( \frac{1}{f'} - \frac{1}{a} \right) \right]$ |
| Кома $\beta_{km}$                               | $\frac{\omega}{8n(n-1)K^2} \times \frac{1}{[(n-1)K - n^2]}$ | $\frac{\omega}{16(n+2)K^2}$                | $\frac{\omega D^2}{8f'n(n-1)} \left\{ \frac{1}{f'} + \frac{1}{(2n+1)(n-1)} \frac{1}{a} \right\}$  | $\frac{\omega D^2}{16f'(n+2)} \left( \frac{1}{f'} - \frac{2}{a} \right)$   |
| Астигматизм $\beta_{аст}$                       | $\frac{\omega^2}{2K}$                                       |  | То же, что и для объекта в бесконечности  |  |
| Хроматизм увеличения $\beta_{хр.ув}$            | $\frac{1}{2nK}$   |  |   |  |

Принятые обозначения:  $\omega$  — половина углового поля;  $n = (n_{пер} - 1)/(n_{кор} - n_{дл})$  — величина, обратная дисперсии, причем  $n_{пер}$ ,  $n_{кор}$  и  $n_{дл}$  — показатели преломления для средней длины волны, коротковолновой и длинноволновой границ используемого участка спектра.

Угловой размер в радианах изображения точки на оси, создаваемого сферическим зеркалом и возникающего вследствие сферической aberrации, можно рассчитать по формуле

$$\beta_{cf} \approx 15,6 \cdot 10^{-3} / K^3,$$

которую применяют при  $K = f'/D \geq 1$ .

Для комы сферического или параболического зеркала

$$\beta_{km} = \omega / 16K^2,$$

где  $\omega$  — угол между оптической осью и направлением на точечный объект, изображение которого представляет собой кружок рассеяния.

При усложнении оптических систем расчет aberrаций усложняется и ведется по различным методикам, описанным, например, в [6]. Важно отметить, что определенная зависимость отдельных aberrаций от таких габаритных параметров, как  $D/f'$  и  $2\omega$ , сохраняется и для этих систем. Например, в светосильных системах с большим относительным отверстием необходимо учитывать в первую очередь сферическую aberrацию, пропорциональную  $(D/f')^3$ , в широкоугольных — дисторсию, пропорциональную  $(2\omega)^3$ , и т. д.

**Расчет и выбор параметров оптических и оптико-механических компенсаторов.** Часто в качестве компенсаторов используют плоскопараллельные пластины, устанавливаемые после объектива. Линейное смещение  $\delta$  в направлении, перпендикулярном к оптической оси системы, определяется как

$$\delta = d [\sin i - \sin 2i / (2 \sqrt{n^2 - \sin^2 i})],$$

где  $d$  — толщина пластины;  $i$  — угол падения луча на пластину;  $n$  — показатель преломления материала пластины.

При повороте пластины на угол  $\alpha$  угол падения  $i$  рассчитывают по формуле

$$\operatorname{tg} i = \operatorname{tg} i_0 \cos \alpha,$$

где  $i_0$  — постоянный (первоначальный) угол наклона пластины к оптической оси.

При малых  $i$  и  $i_0$

$$\delta = \frac{n-1}{n} d \frac{i_0 \cos \alpha}{\rho}.$$

Здесь  $\rho$  — коэффициент перевода угловых единиц в радианы ( $\rho = 3438' = 206265''$ ). Величина  $\delta$ , если ее привести к фокусному расстоянию объектива  $f'$ , определяет угол рассогласования  $\beta$  на входе системы, компенсируемый путем поворота пластины на угол  $\alpha$ :

$$\beta \approx \delta \rho / f'.$$

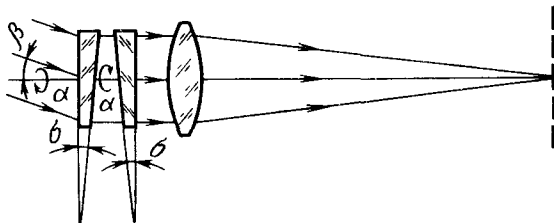


Рис. 6.2. Схема клинового компенсатора

Пользуясь этими формулами, можно рассчитать или выбрать параметры компенсатора по заданным величинам  $\beta$  и  $\alpha$  (или их отношению — масштабу преобразования) и  $f'$ . В [52] для ряда распространенных компенсаторов приведены формулы зависимостей  $\beta = f(\alpha)$ , которые в большинстве своем нелинейны. Там же даны значения методических погрешностей, возникающих при замене  $\beta = f(\alpha)$  линейными зависимостями в заданных диапазонах угловых величин  $\alpha$ .

Вместо плоскопараллельных пластин иногда в качестве компенсаторов используют призмы, разворачиваемые в пластины. Эти призмы часто характеризуют коэффициентом  $K_{пр} = d/D$ , где  $d$  — длина хода лучей в призме (толщина эквивалентной плоскопараллельной пластины);  $D$  — световой диаметр призмы или диаметр пучка лучей, входящих в призму. Длина хода лучей  $d$  зависит от показателя преломления  $n$ . Большими значениями  $K_{пр}$  характеризуются пентапризма, призма Пехана и ряд других [5, 10]. Следует учитывать, что с увеличением  $K_{пр}$  уменьшается угловое поле объектива, за которым установлена призма.

Если пластина (или призма) имеет малую толщину  $d$  и работает в параллельных лучах, то она практически не влияет на аберрации. Но если пластина работает в сходящихся пучках, то вносимые ею аберрации часто бывают значительными и их следует учитывать путем сложения с аберрациями объектива, в ходе лучей которого она помещена. Так, астигматизм, вносимый пластиной, определяется величиной

$$\Delta = \left( \frac{\cos^3 i}{\cos^3 i'} - \frac{\cos i}{\cos i'} \right) \frac{d}{n},$$

а дисторсия

$$\delta y' = d \operatorname{tg} i \left( 1 - d \frac{n-1}{n} - \frac{\operatorname{tg} i'}{\operatorname{tg} i} \right).$$

Другими распространенными типами компенсаторов являются оптический клин или совокупность клиньев, помещаемые перед объективом и поворачиваемые вокруг оптической оси (рис. 6.2). При повороте двух одинаковых клиньев с преломляющими углами  $\sigma$  при вершине на углы  $\alpha$  в разные стороны угол отклонения лучей, создаваемый компенсатором,  $\beta = 2\sigma(n-1)\cos\alpha$ , где  $n$  — показатель преломления материала, из которого изготовлены

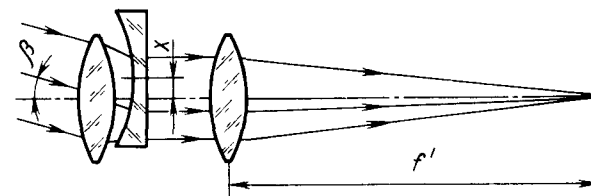


Рис. 6.3. Схема афокального линзового компенсатора

клинья. Диапазон компенсации такого устройства  $\beta = \pm 2\sigma(n-1)$ , однако на практике используют ограниченный диапазон углов поворота  $\alpha$ , стремясь линеаризовать статическую характеристику компенсатора  $\beta = f(\alpha)$ .

Как пример расчета параметров клинового компенсатора можно рассмотреть случай его использования в дальномере базового типа. Если заданы база дальномера  $B$  и минимальная дальность действия дальномера  $L_0$  и выбран диапазон углов поворота клиньев  $\alpha_0 \dots \alpha_\infty$ , который обычно лежит в пределах  $\pm 60^\circ$ , то преломляющий угол одиночного клина

$$\sigma = B/[2L_0(n-1)(\cos\alpha_0 - \cos\alpha_\infty)].$$

Достаточно большой масштаб преобразования достигается с помощью афокального компенсатора, состоящего из двух длиннофокусных линз, имеющих равные по абсолютной величине, но противоположные по знаку фокусные расстояния  $f'_1 = -f'_2$  (рис. 6.3). Такой компенсатор устанавливается перед объективом с фокусным расстоянием  $f'$  и работает в параллельных пучках. При поперечном смещении одной из линз на отрезок  $x$  пучок лучей отклоняется на угол  $\beta = \operatorname{arctg}(x/f')$ . При  $x \ll f'$  эту зависимость часто определяют как  $\beta = x/f'$ . Если, как в предыдущем примере, компенсатор работает в составе базового дальномера, то фокусное расстояние его линз можно рассчитать по формуле

$$f'_1 = -f'_2 = (x_{\max}/B)L_0,$$

где  $x_{\max}$  — максимально допустимое по конструктивным соображениям смещение линзы, соответствующее минимальному расстоянию  $L_0$ .

#### 6.4. ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Структуру СТЗ роботов определяют на основе требований *технического задания (ТЗ)* на ее разработку. В силу неполной заданности всех технических характеристик СТЗ [17, 21, 45], в той или иной мере присущей ТЗ, имеет место поливариантность выбора ее структуры. Конечные затраты на реализацию сравнимых по техническим показателям вариантов СТЗ могут различаться весьма существенно — в несколько раз. В этой связи необходимо проводить тщательный анализ альтернативных вариантов построения структуры СТЗ с целью выбора оптимального.



Сравнение функциональных возможностей видеосенсоров различного типа

| Выполняемая функция   | Фото-<br>реле | Фото-<br>метры и<br>спектро-<br>анализа-<br>торы | МЭПИ и<br>функцио-<br>нальные<br>устрой-<br>ства на<br>их основе | Телеви-<br>зионные<br>системы | Высоко-<br>точные<br>интерфе-<br>рометры |
|---|---------------|--|--|-------------------------------|--|
| Регистрация наличия объек-<br>та в поле зрения («да»—<br>«нет») | +             | —  | +  | +                             | —  |
| Регистрация смещения объ-<br>екта:                              |               |  |  |                               |  |
| грубая  | +             | +  | +  | +                             | —  |
| точная  | —             | +-   | +-   | +-                            | +  |
| Измерение размеров объекта                                      | —             | +-   | +-   | +                             | +  |
| Измерение расстояния до<br>объекта                              | —             | —  | +  | +                             | +  |
| Контроль оптических свойств<br>объекта:                         |               |  |  |                               |  |
| грубый  | +-            | +  | +-   | +-                            | —  |
| точный  | —             | +  | —+   | —+                            | —  |
| цвет  | —             | +  | —  | +-                            | —  |
| текстура  | —             | —  | —  | +                             | —  |
| Контроль формы  | —             | —  | +-   | +                             | —  |
| Классификация формы   | —             | —  | +-   | +                             | —  |
| Анализ полутоновых или<br>цветных изображений                   | —             | —  | —  | +                             | —  |

Перечислим ключевые этапы выбора структуры СТЗ робота.

1. Анализ поставленной задачи с целью выбора: типа видеосенсора (одиночный, многоэлементный, телевизионный и т. п.) и характера видеосигнала (аналоговый или цифровой); схемы дискретизации изображения; типа осветительной системы (пассивная или активная, когда СТЗ управляет освещенностью поля зрения); оптико-механических узлов (объективов, бленд и т. п.), способа фокусировки (фиксированная или автоматическая настройка); в случае необходимости — способа измерения дальности; схемы размещения видеосенсора (неподвижная, подвижная, на роботе или вне его систем, типа «глаз—рука» и т. п.).

2. Определение объема видеoinформации, поступающей на вход узла ее обработки.

3. Определение требований к узлам обработки видеoinформации (производительность, быстродействие и т. п.) с целью выбора способа их реализации (аппаратный, на основе микропроцессора, микроЭВМ или смешанный).

После сравнения альтернативных вариантов структуры СТЗ и предварительного выбора базового варианта переходят к энергетическим (светотехническим) расчетам, к выбору и расчету параметров и характеристик источников и приемников излучения, оптических и оптико-механических узлов, основных характеристик вычислительных средств обработки видеoinформации.

Анализ и расчленение задачи, поставленной перед СТЗ, на ряд утилитарных простейших подзадач позволяют осуществить *выбор типа видеосенсора* (табл. 6.4). Функциональные возможности видеосенсора должны обеспечивать решение всех выделенных на этапах анализа и расчленения подзадач. В противном случае СТЗ робота необходимо оснащать несколькими видеосенсорами различного типа, что нежелательно. Например, если помимо контроля формы объекта, выполняемого с помощью телевизионного видеосенсора, нужно провести высокоточные измерения одного из размеров объекта, то без специализированного видеосенсора (например интерферометра) не обойтись.

Таким образом, при выборе видеосенсора СТЗ робота необходимо анализировать требования к качеству выполнения различных функциональных задач. Выявление какого-либо несоответствия в требованиях и его устранение путем корректировки ТЗ позволяют избежать неоправданного усложнения структуры СТЗ. В свою очередь, ошибки, связанные с неучтенными существенными различиями в требованиях к качеству выполнения различных функций, могут привести к ошибкам на этапе проектирования.

Задача выбора типа видеосенсора непосредственно связана с *выбором схемы дискретизации изображения*. Результирующее представление видеoinформации существенно отличается от анализируемого изображения. Вместе с тем это представление должно содержать следующую информацию: логическую (есть объект-признак или нет); топологическую (расположение, форма тек-

стура, взаимное расположение объектов); количественную (например, координаты характерных точек, измеренные с необходимой точностью). Схема дискретизации должна обеспечивать выполнение перечисленных выше требований.

В общем случае для каждого анализируемого изображения существует оптимальная схема дискретизации (схема расположения элементов видеодатчиков с определенными апертурами). *Нерегулярные схемы дискретизации*, например для реализации функций контроля, выбирают исходя из эвристических принципов.

Одна из возможных методик выбора нерегулярной схемы дискретизации описана ниже.

1. Задается число  $m$  классифицируемых (различаемых) ситуаций.

2. Исходя из эвристических соображений выбирают  $n$  элементарных видеосенсоров, например пороговых элементов — фотореле, каждому из которых соответствует один элемент дискретизации. Отметим, что  $n$  пороговых элементов способны классифицировать  $2^n$  ситуации.

3. Составляется матрица из  $n$  строк и  $m$  столбцов. Для каждой из  $m$  ситуаций заполняются строки матрицы 0 или 1 в зависимости от предполагаемого видеосигнала, снимаемого с  $n$  элементов

Сравнение функциональных возможностей осветительных систем

| Осветительная система   | Регистрация     |                  | Измерение        |                       | Контроль                   |                    | Исключение влияния     |                |
|---|-----------------|------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|----------------|
|   | наличия объекта | смещения объекта | размеров объекта | расстояния до объекта | формы объекта (ориентация) | оптических свойств | изменения освещенности | световых помех |
| <i>Пассивная</i>  |                 |                  |                  |                       |                            |                    |                        |                |
| Одиночный источник излучения, размещенный: вне поля зрения      | *               | *                | *                | *                     | *                          | +-                 | -                      | -              |
| в поле зрения   | +               | +-               | -                | -                     | +-                         | -                  | -                      | -              |
| Совокупность источников излучения, размещенных: вне поля зрения | *               | *                | *                | *                     | *                          | +-                 | -                      | -              |
| в поле зрения   | +               | +-               | +                | +-                    | +                          | -                  | -                      | -              |
| Структурированного освещения: «световая полоса»                 | +               | +                | +                | +-                    | -                          | -                  | -                      | -              |
| «система световых полюсов»                                      | +               | +                | +                | +-                    | +                          | -                  | -                      | -              |
| «шахматное поле»  | +               | +                | +                | +-                    | +                          | -                  | -                      | -              |
| «кольцевые зоны»  | +               | +                | +-               | +-                    | +-                         | -                  | -                      | -              |
| Когерентная   | -               | +                | -                | +                     | -                          | +-                 | +-                     | +-             |
| Модулированная (импульсная)                                     | *               | *                | *                | +                     | *                          | *                  | +-                     | +-             |
| Фотометрическая   | -               | -                | -                | -                     | -                          | +                  | +-                     | +-             |
| <i>Активная</i>   |                 |                  |                  |                       |                            |                    |                        |                |
| С регулировкой освещенности                                     | *               | *                | *                | *                     | *                          | *                  | +                      | +-             |
| Со сканированием поля зрения                                    | +               | +                | +                | +-                    | +                          | +-                 | -                      | -              |

\* Выполняемая функция определяется типом видеосенсора.

Согласно критерию Железнова, шаг расположения элементов дискретизации должен быть равен интервалу корреляции

$$h = \left( \iint_{-\infty}^{+\infty} R(\xi, \eta) d\xi d\eta \right) / R(0, 0).$$

Описанные выше методики дают, как правило, несколько заниженные значения  $h$  (завышенные значения числа элементов дискретизации).

При выборе числа элементов дискретизации необходимо учитывать ограничения, присущие тому или иному выбираемому типу

видеодатчика, если они являются пороговыми. Для аналоговых элементов дискретизации строки матрицы содержат величины, соответствующие регистрируемым потокам излучения, например значения фототоков.

4. Выделяются совпадающие строки матрицы (непосредственно совпадающие для пороговых схем и совпадающие в пределах заданной средней квадратической погрешности измерения аналоговых величин — фототоков для аналоговых схем).

5. Одну из каждой совпадающих строк матрицы можно вычеркнуть, что соответствует удалению избыточного элемента видеодатчика. Совпадение  $j$ -го и  $k$ -го столбцов матрицы показывает, что  $j$ -я и  $k$ -я ситуации неразличимы; необходимо вводить дополнительный элемент видеодатчика для классификации этих ситуаций.

Данный алгоритм легко реализовать на ЭВМ.

Для регулярных схем дискретизации изображения при заданных размерах кадра варьируемыми параметрами являются: шаг дискретизации (с технологической точки зрения исходным варьируемым параметром является не шаг дискретизации, а общее число элементов дискретизации, расположенных в виде регулярной решетки с фиксированным шагом); разрядность аналого-цифрового преобразования (число градаций серого).

Одним из возможных подходов к выбору оптимального числа элементов дискретизации или шага расположения элементов при заданном формате кадра для представления топологической информации является спектральный анализ изображения в пространственно-частотной области. Двумерное распределение освещенности  $E(x, y, t)$  в плоскости расположения чувствительных элементов видеодатчика при определенных условиях можно охарактеризовать спектром пространственных частот  $F(\omega_x, \omega_y)$ , являющимся преобразованием Фурье его корреляционной функции

$$R(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) E(x - \xi, y - \eta) dx dy.$$

Согласно теореме Котельникова, распределение  $E(x, y)$  со спектром пространственных частот, ограниченных частотой  $\omega_{\max}$ , может быть восстановлено по  $n \times m$  отсчетам

$$F\left(\frac{i}{2\omega_x}, \frac{j}{2\omega_y}\right), i = -n/2, \dots, +n/2; j = -m/2, \dots, +m/2.$$

Величина  $h = 1/(2\omega_{\max})$  определяет шаг расположения элементов дискретизации. Погрешность восстановления может быть оценена по формуле

$$\delta = \left[ \iint_{-\infty}^{+\omega_{\max}} + \iint_{+\omega_{\max}}^{+\infty} \right] / \iint_{-\infty}^{+\infty}.$$

видеосенсора. Иногда заданные требования не удается удовлетворить с помощью одного видеосенсора. В этих случаях используют подвижные видеосенсоры или несколько неподвижных видеосенсоров.

*Выбор типа осветительной системы* непосредственно связан с выбором способа реализации выполняемых СТЗ функций (табл. 6.5). Тщательный анализ показывает, что в ряде случаев ценой некоторого усложнения осветительной системы, например при использовании источников структурированного освещения, удается существенно упростить оптико-электронный тракт СТЗ.

*Выбор схемы размещения видеосенсоров* осуществляется с учетом следующих рекомендаций:

для упрощения процедуры обработки видеосигналов, устранения перспективных искажений изображений фокальную плоскость видеосенсора следует располагать параллельно одной из основных плоскостей или осей системы координат робота;

необходимо минимизировать изменение размеров объектов в поле зрения СТЗ при их перемещении;

желательно, чтобы наблюдаемые объекты контрастно выделялись на фоне, не перекрывались и не касались друг друга. В случае перекрытия необходимо стремиться к его минимизации. Размещение видеосенсора не должно препятствовать выполнению рабочих операций, техническому обслуживанию робота;

входной зрачок оптической системы видеодатчика желательно размещать вне зоны воздействия красителей, брызг, смазочных или расплавленных веществ, стружки и т. п.;

в необходимых случаях формируется несколько полей зрения или используется несколько точек зрения с различным ракурсом при соответствующем увеличении числа видеосенсоров.

Поле зрения СТЗ может полностью или частично перекрывать рабочую область ПР и технологического оборудования, составлять ее часть или находиться вне ее.

## 6.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В электронном тракте СТЗ робота видеoinформация может быть представлена в аналоговой или цифровой форме. *Объем аналоговой видеoinформации* определяют такие параметры видеосигналов, как диапазон изменения видеосигнала  $U_{\min} - U_{\max}$ , в котором измерения выполняются с заданной средней квадратической (стандартной) погрешностью  $\sigma_U$ , полоса частот  $\Delta f$ , а также число аналоговых каналов передачи видеoinформации.

*Объем оцифрованной входной видеoinформации* зависит от числа элементов дискретизации изображения — пикселей, а также от числа градаций интенсивности излучения (разрядности преобразования аналогового видеосигнала в цифровой). Число пикселей и разрядность аналого-цифрового преобразования определяют

исходя из метрологических требований к СТЗ, которые включают диапазоны изменения значений измеряемых величин или наборы анализируемых ситуаций, а также допустимые средние квадратические погрешности измерения величин или вероятности ошибок обнаружения или классификации.

Одна из важнейших проблем оптимизации структуры СТЗ — исключение избыточности видеoinформации. Для решения этой задачи можно идти несколькими путями, например, использовать следующий алгоритм выбора шага  $h$  расположения элементов дискретизации при заданном формате кадра.

Задают несколько типовых ситуаций (изображений) и некоторый исходный шаг  $h_0$ . Вычитая поэлементно кадры для выбранных ситуаций, определяют, различимы ли они. Если неразличимы или различимы на уровне возможного шума, то уменьшают значение  $h$ , например вдвое, и повторяют процедуру. Мерой различимости в данном случае является суммарная разность отсчетов

$$\delta = \sum_{i,j=1}^{N,M} |q_{ij}^1 - q_{ij}^2|,$$

где  $q_{ij}^1$  и  $q_{ij}^2$  — отсчеты для различных ситуаций.

Для представления количественной (измерительной) информации число элементов дискретизации можно оптимизировать по результатам модельных испытаний с использованием предполагаемого алгоритма обработки изображения. Пусть требуется определить геометрические размеры объектов какого-то класса. Для ряда возможных размещений (ситуаций) объекта в поле зрения СТЗ находят относительное среднее квадратическое отклонение  $\sigma$  искоемых размеров по заданному алгоритму для минимального числа  $N$  элементов дискретизации. Если значение  $\sigma$  превышает допустимое, то увеличивают число  $N$  и повторяют описанную выше процедуру.

Рассмотрим в качестве примера методику выбора числа элементов дискретизации для СТЗ роботов, классифицирующих изображения объектов по факторам формы  $f$  и  $V$  [38]. Факторы формы, например, для круга можно найти через периметр  $L$  и площадь  $S$ :  $f = L^2/(4\pi S)$ , причем  $0 \leq f \leq 1$ , и отношение радиусов  $V = R_{\min}/R_{\max}$  ( $0 \leq V \leq 1$ ) (рис. 6.4).

При дискретизации изображения площадь  $S$  вычисляют путем определения числа попадающих на объект элементов, периметр — посредством подсчета числа контурных элементов  $L$  или определения геометрической длины границы объекта  $L'$ . Для нахождения геометрической длины подсчитывают число диагональных переходов между ближайшими граничными элементами изображения, размер которых принимается равным произведению  $\sqrt{2}$  на шаг растровой структуры.

Найденные указанным способом  $S$ ,  $L$  и  $L'$  отличаются от истинных значений  $S$  и  $L$ . Для показанного на рис. 6.4 объекта число

граничных элементов  $L = 36d$ , число расстояний (от  $d$  до  $\sqrt{2}d$ )  $L' = 42,4d$ , число внешних отрезков  $L_a = 56d$ , число элементов, принадлежащих площади  $S = 143d^2$ ,  $R_{\max} = 7d$ ,  $R_{\min} = 6d$ .

Для тестовых изображений, содержащих по 100 кругов и квадратов с восемью различными размерами площади  $S$ , были исследованы эмпирические плотности вероятности фактора формы  $f$  и отношения радиусов  $V$ , а также относительные частоты безошибочной классификации  $W$  для разделения на квадраты и круги [4].

На рис. 6.5 даны зависимости относительных частот  $p$  признака  $f$  для круга и квадрата в форме гистограмм. При достаточно большом числе пикселей уменьшается перекрытие распределений признаков для кругов и квадратов (площадь  $S$  указана в единицах  $d^2$ , где  $d$  — шаг дискретизации). Разделение этих фигур в определенных условиях оказывается возможным уже по этому одному признаку. При использовании периметра  $L$  надежная классификация возможна при  $W > 90\%$  до  $S = 110,25d^2$ . Для объектов с числом элементов изображения более 100 погрешность контурных признаков  $f$  и  $V$  не превышает 3...5%.

Таким образом, задавая допустимое значение погрешности классификации, можно определить требуемое число пикселей (формат кадра) цифрового представления изображения.

Объем видеoinформации, обрабатываемой в вычислительной системе СТЗ роботов, выполняющих метрологические функции, можно рассчитывать по заданным значениям допустимых погрешностей измерения линейных размеров  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и их предельным значениям  $x_{\max}$  и  $y_{\max}$ . Для заполнения в памяти ЭВМ дискретного цифрового изображения, получаемого в процессе дискретизации и квантования, требуется объем  $Q = NMq$ , где

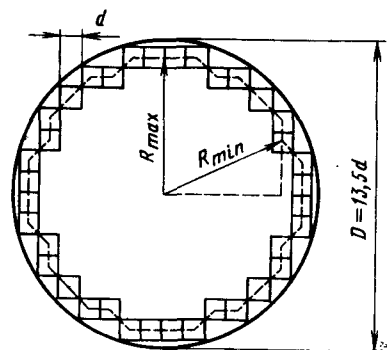
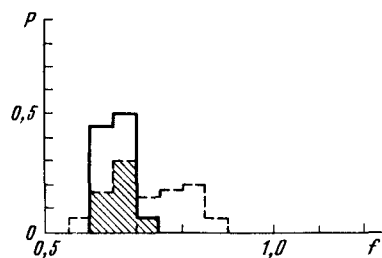
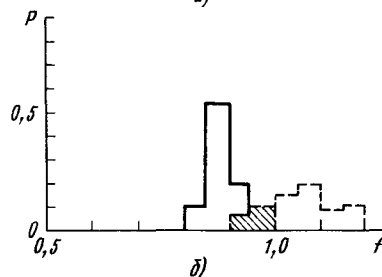


Рис. 6.4. К определению фактора формы



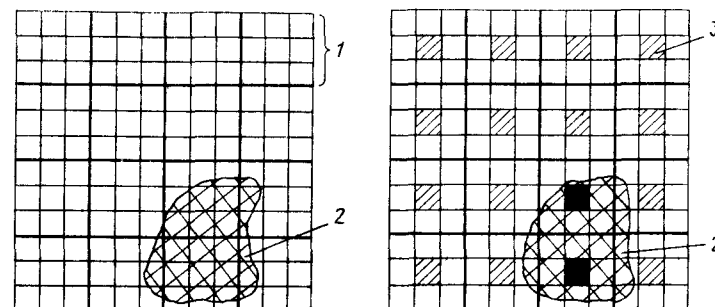
а)



б)

Рис. 6.5. Зависимости относительных частот  $p$  признаков формы  $f$ :

а — при  $S = 12,25d^2$ ,  $W = 75\%$ ; б — при  $S = 56,25d^2$ ,  $W = 92\%$ ; — — — — — квадрат; — — — — — круг;



а)

б)

Рис. 6.6. Обработка кадров с большим числом пикселей

$N = x_{\max}/\Delta x$ ;  $M = y_{\max}/\Delta y$  — число точек отсчетов (пикселей);  $q$  — число двоичных разрядов, отводимых на один отсчет. Современные параметры технических средств дискретизации и квантования таковы, что получаемый объем первичного цифрового представления изображений весьма велик. Действительно, если  $\Delta x = \Delta y = 0,2$  мм и  $r = 8$  бит (в системе ввода используется 8-разрядный АЦП), то для изображения размером  $200 \times 200$  мм<sup>2</sup> значение  $Q$  достигает  $8 \cdot 10^6$  бит. В этой связи создание СТЗ роботов, выполняющих метрологические функции, — чрезвычайно трудная задача.

Ограниченные аппаратные и вычислительные ресурсы микроЭВМ, используемых в СТЗ, не позволяют вести обработку кадров с большим числом пикселей. Существуют два основных способа устранения этого недостатка: разбиение кадра на жесткие фрагменты 1 и их последовательная обработка (рис. 6.6, а); выделение любой совокупности элементов кадра в виде односвязной (прямая, кривая и т. п.) или многосвязной («шахматное поле», случайное распределение точек и т. п.) области — гибкого электронного окна 3 (рис. 6.6, б). Выигрыш, даваемый гибким электронным окном, можно пояснить следующим примером.

Для поиска объекта 2 в поле зрения СТЗ необходимо ввести в микроЭВМ и обработать  $m$  фрагментов или  $M = m$  элементов, составляющих гибкое окно («шахматное поле») (рис. 6.6, б).

Объем видеoinформации и требования к темпу ее обработки являются определяющими факторами для выбора типа и структуры вычислительной системы электронного тракта СТЗ, основными параметрами которой являются емкость памяти, быстродействие (производительность) и разрядность машинного слова.

## 6.6. РАСЧЕТ ЕМКОСТИ ПАМЯТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

В состав памяти, как правило, входят ОЗУ, ПЗУ и ППЗУ (РПЗУ). Исходными данными для оценки информационной емкости ОЗУ, измеряемой числом слов, являются: объем входной видеoin-

формации —  $Q$  слов; объем выходной информации —  $P$  слов; число одновременно хранимых на каждом  $i$ -м этапе обработки видеoinформации промежуточных величин  $q_{ik}$  для каждого  $k$ -го алгоритма; число уровней прерывания  $m$ .

В силу технических особенностей электронного тракта СТЗ роботов (дискретизаторов и квантователей) можно считать, что первичное цифровое изображение является *массивом целых чисел*.

Выполнение некоторых преобразований изображений, представленных в цифровой форме, связано с реализацией арифметических операций над его элементами. Известно, что целые числа не образуют группу по умножению, т. е. во множестве целых чисел деление выполнимо не во всех случаях. Следовательно, существуют преобразования, которые требуют представления элементов изображения в форме *вещественных чисел* или в машинном представлении *чисел с плавающей* или *фиксированной запятой*.

Таким образом, целое или вещественное число, представленное в формате целого числа или числа с плавающей запятой в машинном слое (полуслове, двойном слове), является тем адресуемым элементом данных, который может обрабатываться в ЭВМ.

Возможно другое (нечисловое) представление видеoinформации в виде *плотноупакованной битовой структуры*. Нечисловое представление организуется, например, путем разбиения бинарного изображения на фрагменты, число пикселей в которых равно разрядности машинного слова [28, 40].

Нечисловое представление в ряде случаев дает выигрыш в емкости памяти, однако требует дополнительных затрат аппаратных или вычислительных ресурсов для его организации.

Существующие способы числового представления видеoinформации в ЭВМ можно условно разделить на две группы [40, 43].

*Группу 1* составляют безадресные или адресные способы непосредственного ввода видеoinформации. При безадресном способе изображение вводится в виде массива  $N \times M$  чисел (целых, с плавающей или фиксированной запятой), для хранения которых требуется  $N \times M$  слов памяти микроЭВМ. Общее требуемое число двоичных разрядов для хранения одного кадра при безадресном способе  $Q = qN \times M$  разрядов, где  $q$  — разрядность одного слова.

При адресном способе ввода видеoinформации в память микроЭВМ вводится как яркость пикселей, так и их координаты в растворе кадра. Для хранения информации о  $K$  пикселях требуется минимум  $2K$  слов для хранения их координат (адресов). Общее число двоичных разрядов для хранения видеoinформации при адресном способе

$$Q = qK + 2K \log_2 K.$$

*Группу 2* составляют способы ввода не исходной видеoinформации, а результатов ее предварительной обработки. Типичным примером такого способа является организация ввода координат

пикселей, представляющих контурную линию анализируемого изображения.

Для оценки емкости памяти с учетом затрат вычислительных ресурсов на обработку видеoinформации полагаем, что в СТЗ используется по крайней мере один алгоритм обработки видеoinформации, в процессе которого  $Q$  исходных величин преобразуются: а) в  $Q$  других величин (фильтрация); б) с участием  $Q_1$  других величин (сравнение с эталоном и т. п.).

Расчет емкости памяти вычислительной системы электронного тракта СТЗ можно произвести, например, по следующей методике [27].

1. Задают объемы входной видеoinформации  $Q$  и выходной информации  $P$  (в машинных словах).

2. Выбирают число алгоритмов обработки видеoinформации  $K$  и матрицу  $q_{ik}$ , содержащую числа одновременно хранимых величин на  $i$ -м этапе (шаге) для каждого  $k$ -го алгоритма.

3. Задают число уровней прерывания.

4. Определяют объем  $Q_1$  констант, представляющих собой дополнительные данные, например изображение эталона.

5. Рассчитывают емкость памяти  $N_1$  (слов) для хранения входных  $Q$ , преобразованных  $P$ , дополнительных  $Q_1$  данных:  $N_1 = Q + Q_1 + P$ .

6. Определяют емкость памяти  $N_2$  для хранения промежуточных величин при работе по  $K$  алгоритмам по следующим формулам:

при одновременном использовании промежуточных данных  $q_{ik}$

$$N_2 = \sum_{k=1}^K (\max_i \{q_{ik}\}) + mR;$$

при последовательном выполнении  $K$  алгоритмов или выполнении одного ( $k = 1$ ) алгоритма:

$$N_2 = \max_{i, k} \{q_{ik}\} + mR,$$

где  $m$  — число уровней прерывания;  $R$  — число рабочих регистров, используемых для хранения данных в процессе прерывания.

7. Находят результирующую емкость ОЗУ без учета средств программного обеспечения (ПО)

$$N_{\text{ОЗУ}}^0 = \varphi \left( \eta Q + P + Q_1 + \sum_{k=1}^K (\max_i \{q_{ik}\} + mR) \right),$$

где  $\varphi = 1 \dots 1,4$  — поправочный множитель, учитывающий средства программной защиты от помех;  $\eta = 1 \dots 2$ .

8. Рассчитывают емкость памяти для размещения средств ПО

$$N_{\text{по}} = \sum_{k=1}^K N_{\text{р. п. к}} + N_{\text{ос}} + N_{\text{п}} + N_{\text{т}} + N_{\text{с. п}} + N_{\text{к}},$$

где  $N_{\text{р. п. к}}$  — объем  $k$ -й рабочей программы;  $N_{\text{ос}}$  — объем, занимаемый операционной системой (диспетчером);  $N_{\text{п}}$  — объем программы обеспечения прерываний;  $N_{\text{т}}$  — объем тестовых программ;  $N_{\text{с. п}}$  — объем стандартных подпрограмм, например, подпрограмм работы с числами с плавающей запятой;  $N_{\text{к}}$  — объем констант.

Хранение ПО в ОЗУ повышает гибкость СТЗ, облегчает смену рабочих программ и одновременно резко снижает устойчивость к различного рода сбоям. В этой связи для хранения основной части ПО или всего его объема используют ПЗУ, ППЗУ или РПЗУ, сохраняющие информацию при отключении питания (сбоях).

Алгоритмы обработки видеoinформации в СТЗ необходимо строить таким образом, чтобы восстановление рабочего состояния СТЗ в момент времени  $t_i$  после сбоя начиналось с опроса видеодатчиков и набора потерянной видеoinформации. Однако часть потерянной информации является невозстанавливаемой (видеоинформация, относящаяся к моментам времени  $t_{i-1}, t_{i-2}, \dots$ ). Если требования к быстродействию СТЗ позволяют использовать энергонезависимые ЗУ, то невозстанавливаемую информацию следует хранить в ППЗУ или РПЗУ емкостью  $N_{\text{ппзу}} = \max_i \{N_{\text{н. в. i}}\} + N_{\text{н. в. о.}}$ . Здесь  $N_{\text{н. в. о.}}$  и  $N_{\text{н. в. i}}$  — объемы общих и частных (для  $i$ -го алгоритма) невозстанавливаемых величин.

#### 6.7. РАСЧЕТ ТРЕБУЕМОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Требования к быстродействию электронного тракта СТЗ вытекают из требований к *производительности робота*, а также его *метрологических и динамических характеристик*. В общем случае инерционность системы СТЗ — система управления роботом — привод может быть описана постоянной времени

$$T_{\Sigma} = T_{\text{сур}} + T_{\text{стз}} + T_{\text{пр}},$$

где  $T_{\text{сур}}$  — постоянная времени, определяющая быстродействие системы управления роботом (СУР);  $T_{\text{стз}}$  — время цикла ввода и обработки видеoinформации;  $T_{\text{пр}}$  — постоянная времени, характеризующая быстродействие привода робота.

Расчет быстродействия вычислительной системы СТЗ робота проводят, например, в такой последовательности:

- 1) исходя из метрологических или динамических характеристик робота или по заданной его производительности находят  $T_{\Sigma}$ ;
- 2) по заданным значениям  $T_{\text{сур}}$  и  $T_{\text{пр}}$  определяют

$$T_{\text{стз}} = T_{\Sigma} - T_{\text{пр}} - T_{\text{сур}};$$

3) по известным методикам, описанным в [28], рассчитывают быстродействие вычислительной системы при требуемых объемах памяти, вводимой видеoinформации и выводимых в СУР данных.

При выборе вычислительной системы необходимо разделить затраты времени на ввод и на обработку видеoinформации. Например, если кадр с форматом  $N \times N$  разбит на  $m$  фрагментов, то суммарные затраты времени  $T_{\text{стз}}$  на его ввод и обработку составят (без учета временного перекрытия фаз ввода и обработки)

$$T_{\text{стз}} = m\tau_{\text{к}} + m\tau_{\text{обр}}(N/\sqrt{m}),$$

где  $\tau_{\text{к}}$  — период повторения кадров;  $\tau_{\text{обр}}$  — затраты времени на обработку одного фрагмента, являющегося функцией числа элементов  $N/\sqrt{m}$  в фрагменте. Затратами времени на ввод  $N^2$  элементов в ОЗУ в режиме прямого доступа к памяти (ПДП) пренебрегаем.

С ростом формата кадра и разрядности квантования, а также при использовании более сложных алгоритмов обработки изображения целесообразно переходить от разбиения кадра на жесткие фрагменты к формированию гибкого электронного окна. Затраты времени на ввод и обработку  $M$  элементов, составляющих окно,

$$T_{\text{стз}} = M\tau_{\text{к}} + \tau_{\text{обр}}(M).$$

Ввод информации в этом случае может осуществляться программным путем с записью координат каждого элемента.

Определение быстродействия — темпа передачи сигналов (информационных слов) в вычислительную систему СТЗ — осуществляется в соответствии с временем выборки элементов видеодатчика (скоростью сканирования) и способом ввода.

При *программном вводе* темп ввода определяется временем цикла программы опроса буферного регистра интерфейса ввода и изменения состояния счетчика элементов датчика видеоизображения. Максимальный темп зависит от используемой программной среды, времени выполнения команд одного цикла, а также времени готовности интерфейса и выборки кадра. Максимально возможный темп определяется временем выборки кадра (частотой повторения кадров видеодатчика), а также максимально допустимым временем преобразования АЦП [50].

В случае *аппаратного ввода* целесообразно использовать режим ПДП. Темп ввода для ПДП задается циклом обращения к памяти. Результаты оценки требуемого быстродействия АЦП для реализации ПДП приведены в табл. 6.6. Для снижения требований к быстродействию АЦП возможна параллельная работа нескольких АЦП. Для  $n$  параллельно работающих АЦП минимальное время преобразования увеличивается в  $n$  раз, однако при этом возрастают аппаратные затраты (более чем в  $n$  раз).

По завершении описанной выше процедуры расчета быстродействия СТЗ выбирают тип вычислительной системы из имею-

Таблица 6.6

## Требования к быстродействию АЦП

| Формат кадра (фрагмента), пиксели | Емкость ОЗУ, К слов * | Скорость передачи видеoinформации, М слов/с | Время АЦП преобразования (режим ПДП), мкс |      |       |  |
|-----------------------------------|-----------------------|---|---|------|-------|--|
|                                   |                       | при времени обработки кадра, мс             |   |      |       |  |
|                                   |                       | 20  | 1   | 20   | 1     |  |
| 16×16                             | 0,250                 | 0,0125                                      | 0,250                                     | 80,0 | 4,0   |  |
| 32×32                             | 1                     | 0,05  | 1,0                                       | 20,0 | 1,0   |  |
| 64×64                             | 4                     | 0,2   | 4,0                                       | 5,0  | 0,25  |  |
| 128×128                           | 16                    | 0,8   | 16,0                                      | 1,25 | 0,061 |  |
| 256×256                           | 64                    | 3,2   | 64,0                                      | 0,31 | 0,015 |  |
| 512×512                           | 256                   | 12,8  | 256,0                                     | 0,08 | 0,004 |  |
| 1024×1024                         | 1012                  | 51,2  | 1024,0                                    | 0,02 | 0,001 |  |

\* Для безадресного способа ввода видеoinформации.

щихся или формулируют требования ТЗ на разработку специализированной вычислительной системы.

Ограничения на постоянную времени  $T_{\Sigma}$ , определяющую инерционность системы СТЗ — система управления роботом — привод, оказывающие решающее влияние на выбор вычислительной системы по критерию быстродействия, находят, например, исходя из заданной погрешности управления манипуляциями робота или из требований к устойчивости системы управления в целом (включая СТЗ).

**Погрешность управления** манипуляциями робота по сигналу, вырабатываемому СТЗ, выполняющей измерение какого-либо параметра  $x$ , можно разделить на две составляющие: статическую  $\Delta x_{ст}$  и динамическую  $\Delta x_{д}$ . Величина  $\Delta x_{ст}$  определяется погрешностями тракта регистрации и обработки видеосигнала. Величина  $\Delta x_{д}$  обусловлена конечными затратами времени на обработку видеoinформации о динамических процессах. Для статических процессов  $\Delta x_{д} = 0$ . Динамическая погрешность  $\Delta x_{д}$  связана с характерной частотой  $\omega$  изменений во времени управляемого процесса (манипулирования, обработки и т. п.) и постоянной времени  $T_{\Sigma}$  [27, 35, 58, 54].

Пусть СУР, содержащая в общем случае экстраполятор  $m$ -го порядка, воспроизводит сигнал управления

$$x[(n+1)T_{\Sigma}] = x(nT_{\Sigma}) + \frac{\nabla x(nT_{\Sigma})}{1!} + \dots + \frac{\nabla^m x(nT_{\Sigma})}{m!},$$

где  $n$  — номер текущего временного цикла. Здесь экстраполятор вырабатывает сигнал управления для  $n+1$  цикла с учетом значения параметра  $x$  в  $n$ -м цикле. Полагая, что с ростом порядка  $m$  конечные разности  $\Delta_m x$  убывают, получим следующее соотношение между постоянной  $T_{\Sigma}$  и допустимой динамической погрешностью:

$$|\Delta x_{д}|_{доп} \geq |\nabla^{m+1} x(nT_{\Sigma}) / (m+1)!|.$$

Для динамических процессов

$$\nabla^{m+1} x(nT_{\Sigma}) \approx A \omega^{m+1} T_{\Sigma}^{m+1},$$

$$\text{поэтому } T_{\Sigma} \leq \frac{1}{\omega} [|\Delta x_{д}|_{доп} (m+1)! / A]^{1/(m+1)},$$

где  $A$  — амплитуда воспроизводимого сигнала.

**Требования к устойчивости** процессов управления с помощью СТЗ и исключения автоколебательных процессов налагают ограничения на выбор результирующего времени реакции  $T_{\Sigma}$  системы СТЗ — система управления роботом — привод на изменение управляемого параметра:

$$T_{\Sigma} \leq 2M / [\omega_c (M+1)],$$

где  $M$  — показатель колебательности;  $\omega_c$  — частота среза системы.

**Требования к совместимости** затрат времени на решение функциональных задач СТЗ с требованиями к временным характеристикам технологических циклов являются решающими при определении необходимых затрат аппаратных и вычислительных ресурсов.

На практике встречаются две основные ситуации:

СТЗ обеспечивает необходимое быстродействие и не нарушает временные характеристики технологических циклов робототехнических систем;

достижение необходимого быстродействия СТЗ экономически нецелесообразно, поэтому скорость выполнения технологических циклов роботами и оборудованием принудительно ограничивается для согласования с быстродействием СТЗ.

Возможна промежуточная ситуация, когда на одних этапах технологического цикла производительность определяется быстродействием СТЗ, а на других — быстродействием ПР и технологического оборудования.

## 6.8. ВЫБОР СТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Выбор оптимальной структуры вычислительных средств СТЗ осуществляют на основе технико-экономического анализа, руководствуясь следующими критериями:

соответствие технических возможностей вычислительных средств решаемым задачам;

необходимый уровень гибкости вычислительных средств с учетом перспективы развития данной СТЗ за предполагаемое время ее «жизни» при минимальных затратах на аппаратуру и программирование;

максимальное время наработки на отказ при минимальных аппаратных и программных затратах;



экономическая целесообразность изготовления специализированных вычислительных средств с учетом доступности комплекта-ции СТЗ универсальными вычислительными средствами; совместимость вычислительных средств СТЗ с вычислительными средствами, используемыми на тех же и на более высоких уровнях иерархии робототехники (ГПС).

В связи с постоянным расширением технических возможностей, увеличением доступности и числа поступающих на рынок серийных универсальных микропроцессорных средств и микроЭВМ имеет место тенденция к постепенному вытеснению специализированных вычислительных средств универсальными и к оптимальному сочетанию минимального объема специализированных вычислительных средств с универсальными. С учетом создания специализированных БИС для обработки изображений последняя тенденция представляется наиболее перспективной.

На практике при выборе оптимальной структуры вычислительных средств СТЗ обычно руководствуются следующими рекомендациями.

1. В зависимости от типа простейших задач (с определением альтернативы «да—нет» — наличие объекта, ориентация объекта, форма объекта; метрологических — измерение расстояния до объекта, размеров объекта и т. п.) для детерминированных условий (без анализа поля изображения/сцены) СТЗ оснащают аппаратными средствами с временем решения задач 1 мкс ... 10 мс при объеме видеoinформации 1 ... 100 пиксел (см. гл. 3, табл. 3.8) или универсальной микроЭВМ с временем решения задач 1 мс ... 1 с при том же объеме видеoinформации.

2. Для решения задач поиска объекта, его классификации, определения метрологических характеристик (формы, размеров, площади и т. п.) с использованием операций анализа детерминированного поля изображений/сцены (для фиксированного числа известных объектов с ограниченными степенями подвижности их ориентации, например, при различной ориентации в одной плоскости; для фиксированных расстояний до объектов; для фиксированных условий освещения поля изображения и т. п.) при объеме обрабатываемой видеoinформации порядка 1024 ... 16 384 пиксел применяют специализированные видеопроцессоры (время решения задач порядка 100 мкс ... 100 мс) или универсальные микроЭВМ (время решения задач порядка 100 мс ... 10 с).

3. Для решения задач поиска, классификации и т. п. в условиях недетерминированных изображений/сцен (трехмерные сцены, ориентированные в пространстве объекты, различные условия освещенности сцен и т. п.) при объеме видеoinформации более 1024 пиксел используют мощные специализированные видеопроцессоры, обеспечивающие время решения задач порядка 10 мс ... 10 с, или мощные универсальные микроЭВМ с временем решения задач порядка 1 с ... 1 мин и более.

## ГЛАВА 7

### ТИПИЧНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

#### 7.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ РОБОТИЗАЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

В научно-технической литературе, в трудах различных конференций, в экспозиции промышленных выставок, в отчетах фирм и предприятий резко возросла доля материалов, содержащих информацию об успешных применениях роботов с техническим зрением как в промышленности, так и в непромышленной сфере. Обзоры некоторых применений промышленных роботов, снабженных СТЗ разного типа, можно найти, например, в [9, 30, 47, 49, 61]. Средства визуального оцувствления роботов и методы их использования в различных прикладных областях развиваются очень быстрыми темпами. Системы, еще вчера казавшиеся уникальными по своим техническим характеристикам и демонстрировавшие лишь в научных лабораториях и на выставках, сегодня уже можно видеть в реальных производственных условиях. Неуклонно снижается стоимость промышленных СТЗ, растут их функциональные возможности, технологичность и надежность, по мере приобретения практического опыта расширяется круг адекватного и эффективного применения технического зрения для роботизации различных операций.

Поскольку уровень передовых достижений в этой области повышается чрезвычайно резко, цель данной главы состоит не в том, чтобы дать сколько-нибудь исчерпывающий обзор весьма разнообразных и многочисленных случаев использования технического зрения в робототехнике, а в том, чтобы проиллюстрировать применение основных из рассмотренных выше принципов структурно-функциональной организации и аппаратно-программных средств СТЗ в конкретных робототехнических задачах.

В настоящем параграфе будет рассмотрен ряд примеров зрительного оцувствления роботов, применяемых на вспомогательных операциях в промышленном производстве. *Вспомогательные* операции, такие, как обслуживание обрабатывающих станков, конвейеров и другого оборудования, транспортно-складские работы, подготовка производства, а также контроль качества деталей и изделий, подверглись массовой роботизации значительно раньше, чем *основные* технологические процессы (сборка, сварка, окраска, абразивная зачистка и т. п.). На сегодняшний день зрительное оцувствление вспомогательных роботов применяется значительно

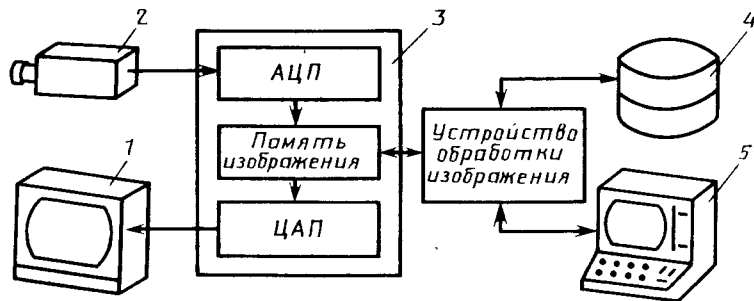


Рис. 7.1. Структурная схема системы «Autoview»:

1 — видеомонитор; 2 — телевизионная камера; 3 — модуль запоминания кадра; 4 — дисковая память; 5 — пульт управления

шире, чем зрительное очувствление технологических роботов, а используемые при этом СТЗ отличаются большим разнообразием.

Одной из достаточно давно разработанных и с успехом применяемых в робототехнике является СТЗ «Autoview» фирмы «Бритиш Роботик Системс» (*British Robotic Systems*, Великобритания). Ядром (рис. 7.1) системы является устройство обработки изображений на базе процессора LSI 11-13, способное в реальном времени анализировать изображения размером  $256 \times 256$ . В памяти можно хранить одновременно три матрицы с 16 градациями яркости, либо получать 256 градаций яркости, попарно объединяя матрицы. Программная часть системы содержит около 200 командных операторов, разнообразие и гибкость которых обеспечивают быстрое приспособление к потребностям пользователя. При решении конкретных робототехнических задач непосредственно используется лишь часть (5 ... 20) этих операторов.

Рассматриваемая СТЗ применяется, в частности, для роботизации вспомогательных технологических операций в составе ГПС с восемью участками механической обработки. Она автоматически идентифицирует детали, расположенные на поддоне в случайном порядке, после чего робот соответствующим образом ориентирует очередную деталь с погрешностью не более  $\pm 0,5^\circ$  и подает ее в токарный станок с ЧПУ. Весь цикл занимает менее 30 с, причем основная доля этого времени уходит на манипуляции с деталью. Процесс обучения СТЗ идентификации даже похожих друг на друга деталей также не превышает 30 с, что очень важно для ГПС, работающих с мелкими сериями изделий.

Показательно, что зрительное очувствление роботов способствовало началу роботизации таких отраслей промышленности, где традиционные средства роботехники применять гораздо сложнее, чем в машиностроении. Например, в [81] описана роботизированная подача выкроек ткани в швейную машину. Заготовки для пошива одежды отличаются широким разнообразием форм, частой сменяемостью типов, большими допусками, трудностью

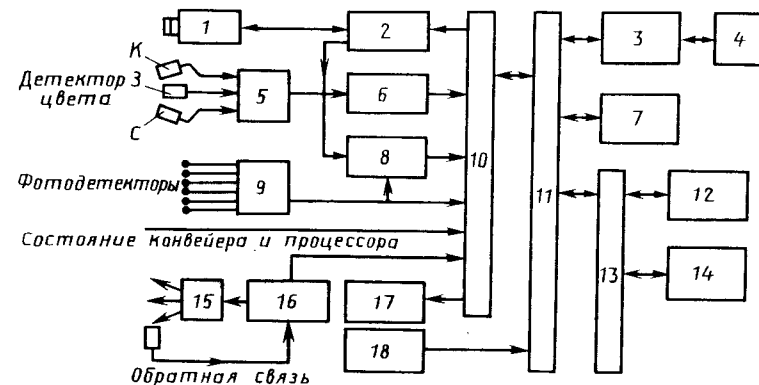


Рис. 7.2. Структурная схема СТЗ фирмы «Оптикал рекогнишн системс»:

1 — сканирующая камера; 2 — процессор предобработки видеонформации; 3 — ЭВМ SBC 80/10; 4 — дисплейный терминал оператора; 5 — предусилители; 6 — блок измерения отношения трех сигналов; 7 — память с аварийным аккумулятором; 8 — блок определения приоритета прерываний; 9 — блок кондиционирования сигналов; 10 — параллельный интерфейс; 11 — многоканальная шина; 12 — кассетный накопитель на магнитной ленте; 13 — последовательный интерфейс; 14 — печатающее устройство; 15 — источник освещения; 16 — регулятор освещения с источником питания; 17 — реле приводов; 18 — источник питания; K, Z, C — детекторы цвета (красного, зеленого, синего)

ориентации и фиксации. Проблема соблюдения всех требований технологии при протягивании кромок материала через шивающий узел была решена за счет использования робота PUMA-560 с контурным управлением, движения которого формируются по информации от СТЗ «Autovision-3» фирмы «Отوماتикс» (*Automatix*, США) с твердотельным видеосенсором. Система позволяет определить тип, геометрические параметры и ориентацию конкретной выкройки.

Быстродействующая СТЗ фирмы «Оптикал рекогнишн системс» (*Optical Recognition Systems*, США) предназначена для работы с цветными изображениями (рис. 7.2). В одном из применений ее использовали для сортировки проходящих по конвейеру пачек сигарет по графическому изображению. Производительность составляла 330 пачек в минуту, надежность распознавания  $\sim 98\%$ .

Описанная выше СТЗ «Autoview» обеспечивала на предприятиях фармацевтического производства считывание и распознавание шестизначных буквенно-цифровых кодов за 1 ... 2 с, причем шрифты могли меняться от изделия к изделию. Во всех случаях срок окупаемости СТЗ «Autoview» не превышал одного года.

Адаптивные роботы с СТЗ находят применение на участках подготовки ГПС, где они служат для кассетирования или комплектовки деталей, поступающих неупорядоченным образом в таре или по конвейеру. Выполнив операции исходного упорядочения деталей (например, устанавливая их в строго определенные места с нужной ориентацией в кассеты), адаптивный робот создает условия для дальнейшей работы жесткопрограммируемых роботов и автоматов.

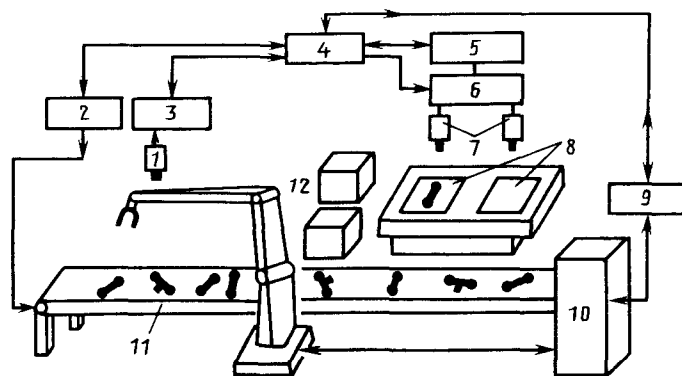


Рис. 7.3. Работа робота с техническим зрением на конвейере при упорядоченной укладке деталей в тару:

1 — телекамера общего обзора (для грубой локализации деталей); 2 — устройство управления конвейером; 3 — блок управления захватным устройством робота; 4 — устройство управления рабочей ячейкой («супервизор»); 5 — блок распознавания и локализации деталей; 6 — переключатель телекамер; 7 — телекамеры системы распознавания и точной локализации деталей; 8 — позиции распознавания; 9 — блок формирования задания роботу; 10 — устройство управления роботом; 11 — участок захватывания; 12 — тара

Выше уже упоминался робот, способный брать лежащие внавал детали из тары в соответствии с информацией от СТЗ, которая находит места захватывания [15]. Аналогичные функции выполняет одна из трех СТЗ в роботизированной ячейке упорядоченной укладки в тару деталей разного типа, произвольным образом расположенных на ленте конвейера. Функционирование этой системы, разработанной в Научно-исследовательском центре металлообрабатывающей промышленности Бельгии, иллюстрируется рис. 7.3. Видеосенсор, расположенный над конвейером, поставляет роботу информацию только для захватывания еще не распознанных деталей. Захватив деталь, робот кладет ее на одну из двух позиций распознавания и локализации, в то время как на другой такой же позиции СТЗ идентифицирует предыдущую деталь и точно определяет ее координаты и ориентацию с целью укладки роботом в тару. Работа СТЗ на позиции распознавания протекает параллельно с работой СТЗ на позиции захватывания с конвейера. Из-за множества промежуточных манипуляций производительность такой системы не слишком велика, хотя гибкость, точность и надежность высокие.

В настоящее время известен целый ряд СТЗ, способных в реальном времени поставлять роботу всю информацию, необходимую для упорядочения расположения деталей. Так, система «Vidomet II» фирмы «Пенн видео» (Penn Video, США), обладая твердотельным видеосенсором с разрешающей способностью  $320 \times 240$  пиксел при 64 градациях яркости, обеспечивает при работе с конвейером производительность до 900 деталей в минуту; СТЗ фирмы «Мадушита» (Matsushita, Япония) локализует детали за 0,2 ... 0,8 с при разрешении  $256 \times 240$  пиксел.

Сравнительно простая, но достаточно эффективная отечественная СТЗ адаптивного робота [47] обеспечивает ориентированный перенос штампованных заготовок с конвейера. За счет рациональной организации движения деталей по конвейеру число возможных вариантов ориентации заготовки, упирающейся в захватное устройство, получается небольшим. С учетом этого факта удалось отказаться от телекамеры и ограничиться группой дискретных фотодатчиков, двоичные сигналы которых образуют код, однозначно определяющий типоразмер и ориентацию заготовки, разумеется, при условии, что оператор заранее правильно установит все фотодатчики в соответствующее положение.

Более гибкая система, предназначенная для работы с неориентированными деталями и заготовками широкой номенклатуры, разработана в Институте проблем управления. Система ТЕЗА (технического зрения и адаптации) реализована на базе микроЭВМ «Электроника 60» и допускает использование любого датчика видеосигнала, работающего в телевизионном стандарте. Важно, что ее применение в составе робототехнического комплекса не требует каких-либо аппаратных переделок серийных устройств программного управления роботами, если они включают микроЭВМ «Электроника 60» или совместимые с ней вычислительные средства. Благодаря разработанной методике сопряжения и обмену информацией между процессорами устройства управления и системы ТЕЗА последнюю можно рассматривать как «приставку», подключение которой к существующему промышленному роботу наделяет его адаптивными возможностями. Схема адаптивного робототехнического комплекса, организованного путем сопряжения системы ТЕЗА и серийного устройства управления УКМ-772, которым снабжается универсальный промышленный робот ТУР-10К, показана на рис. 7.4. Работа комплекса строится так,

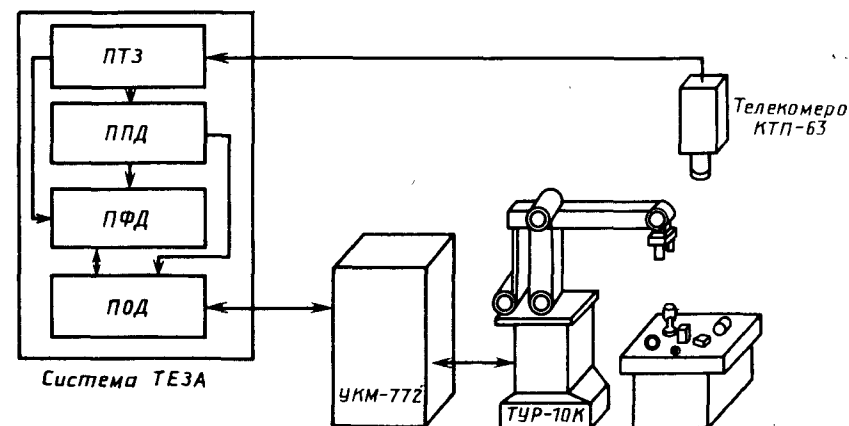


Рис. 7.4. Структура адаптивного робототехнического комплекса Института проблем управления:

ПТЗ — подсистема технического зрения; ППД — подсистема планирования действий; ПФД — подсистема формирования движений; ПОД — подсистема обмена данными

что система ТЕЗА не только выдает результаты зрительного анализа рабочей сцены, но и формирует движения робота, обеспечивающие захватывание неориентированной детали и ее вывод в некоторое стандартное состояние. Далее можно максимально использовать те жесткие программы, которые были занесены в память УКМ-772 при обучении робота в номинальных условиях, одновременно обрабатывая видеoinформацию для следующей детали. Таким образом распараллеливаются операции между процессорами системы ТЕЗА и устройства УКМ-772 при попеременной работе ТУР-10К в адаптивном режиме и в режиме воспроизведения жестких программ.

Система ТЕЗА содержит подсистему технического зрения, реализованную аппаратно-программными средствами, в которую входят следующие модули.

*Модуль ввода изображения.* Допускается подключение до восьми стандартных телекамер, дающих полный видеосигнал (переключение камер программное). Временное разрешение 125 нс эквивалентно 400 отсчетам по строке; максимальная скорость ввода изображения 250 кбайт/с. Аппаратная часть обеспечивает максимальный размер вводимого изображения  $400 \times 600 \times 4$  бит; пользовательские программы ориентированы на работу в реальном времени с изображениями до  $256 \times 256 \times 1$  бит. Предусмотрена возможность ввода фрагментов изображения с программным заданием смещения и размеров окна, шага отсчетов видеосигнала по горизонтали и вертикали, разрядности представления яркости. Обеспечен автоматический выбор порога бинаризации по гистограмме уровней яркости согласно усовершенствованному методу, описанному в п. 2.2.

*Модули предварительной обработки.* Эти модули осуществляют маскирование фрагментов, грубую локализацию объектов на матрице изображения малой размерности, целенаправленное наведение на объект с повышенной разрешающей способностью, фильтрацию бинарного изображения с помощью методов клеточной логики, выделение контурных точек на изображении (20 мкс на точку), прослеживание контуров и представление их в виде последовательности координат, отсева малоинформативных контурных точек (см. п. 2.3).

*Модули описания и анализа изображения.* По контурным точкам рассчитывается набор формальных классифицирующих признаков  $\{J_m\}$ , достоинства которых были описаны в п. 2.4 (эта операция при чисто программной реализации занимает 300 ... 600 мс). На этапе обучения СТЗ отбираются наиболее информативные из этих признаков — на практике для классификации типичных машиностроительных деталей достаточно 2 ... 3 признаков. На этапе классификации вектор признаков сопоставляется с эталонными по методу ближайшего соседа менее чем за 10 мс. На определение координат центра формы силуэта объекта уходит 3 ... 6 мс, на нахождение ориентации и стороны объекта (путем

расчета коэффициентов Фурье в полярных координатах) — 100 ... 300 мс.

*Сервисные модули.* Они координируют работу всей СТЗ, поддерживают диалог с оператором, визуализацию результатов на дисплее при отладке, управляющие, диагностические и вспомогательные функции.

Кроме СТЗ, в состав системы ТЕЗА входят следующие подсистемы:

планирования действий, выбирающая целенаправленную последовательность манипуляции робота (например, при кассетировании принимается решение о том, нужно ли вообще укладывать распознанную деталь в кассету, а если нужно, то в какую именно и в какую из ее ячеек, а также требуется ли и каким образом предварительно перевернуть деталь);

формирования движений робота, генерирующая массивы посылок в устройство управления, которые задают режим работы (адаптивный или воспроизведения жестких программ), соответственно сообщая либо очередные значения шарнирных углов манипулятора (они рассчитываются путем решения обратной кинематической задачи с учетом привязки систем координат телекамеры и робота), либо номера подпрограмм заранее обученных действий робота с деталью из стандартного состояния, обеспечиваемого адаптивным режимом (они были определены подсистемой планирования);

обмена данными с устройством управления промышленного робота, обеспечивающая асинхронную передачу массивов посылок по прерываниям, поступающим по мере отработки сформированных движений роботом, через параллельный интерфейс ввода-вывода И2 «Электроники 60».

Работа экспериментального адаптивного комплекса была проверена на операциях кассетирования деталей, расположенных в беспорядке на рабочем поле, над которым была установлена телекамера системы ТЕЗА. Робот ТУР-10К достаточно надежно упорядочивал промышленные детали широкой номенклатуры. Полное время ввода изображения, распознавания и локализации объектов, планирования и формирования движений робота в типичной ситуации составляло 0,8 ... 1,3 с. Разрешающая способность системы для рабочего поля диаметром 600 мм равнялась 2 ... 3 мм. Важно, что этап обучения системы ТЕЗА работе с деталью конкретного набора предельно упрощен для пользователя, от которого требуется только «показать» деталь телекамере, присвоить ей наименование (номер), задать высоту захватывания и жесткую программу действий с деталью из стандартного положения.

Кроме решения задач зрительного оцувствления роботов, в целях адаптивного выполнения манипуляторных операций СТЗ находят широкое применение в роботизированных установках контроля качества продукции [9, 30, 47, 49]. Рассмотрим несколько

примеров выполнения операций контроля путем сочетания возможностей СТЗ и промышленных роботов.

Известен [47] ряд контрольно-измерительных роботов, у которых в качестве рабочего органа на манипуляторе закрепляются различные датчики, в частности оптические, что обеспечивает возможность измерения параметров изделий или контроля их свойств в различных точках по заданной программе. По мере снижения массы и габаритных размеров видеосенсоров и развития методов визуального сервоуправления роль подобных роботов будет повышаться. Однако в настоящее время в промышленных системах визуального контроля видеосенсоры, как правило, устанавливаются неподвижно над рабочим полем, а роботы служат для перемещения осматриваемых объектов и сортировки их в соответствии с результатами инспекции.

Так, в роботизированной ячейке контроля качества пайки печатных плат фирмы «Ханиуэлл» (*Honeywell*, США) робот *PUMA-560* последовательно перемещает плату размером  $275 \times 140$  мм перед объективом твердотельной телекамеры «*Panasonic BS-170*» так, чтобы в ее поле зрения ( $30 \times 20$  мм) по очереди попадали прямоугольные зоны осмотра, получаемые при разбиении платы на 11 строк и 8 столбцов. При этом разрешающая способность СТЗ позволяет выявлять особенности осматриваемой сцены размеров 0,1 мм. Команды о моментах времени, значениях и направлении перемещений платы подаются устройству управления робота от процессора обработки изображений СТЗ «*Auto-vision-2*».

После просмотра всей платы данные о возможных дефектах пайки передаются в центральный микропроцессор «*Apple II*» через последовательный канал *RS-232*. Пока робот и процессор обработки изображений заняты контролем следующей платы, центральный микропроцессор помогает оператору быстро найти точки пайки, вызывающие подозрение и требующие непосредственной проверки, а также ведет учет производственной статистики. Осматриваемые участки могут содержать до 40 точек пайки. Чтобы СТЗ лучше отличала их от проводников и фона, покрытых темно-зеленым лаком, применяют желто-оранжевое освещение и оранжево-красный светофильтр перед телекамерой. Это существенно облегчает переход от одной светлой точки пайки к другой, измерение характеристик изображения каждого узла и сравнение их с эталонными значениями и допусками.

Для обработки изображений автоматически выбирается один из 45 алгоритмов распознавания объектов по таким признакам, как площадь, периметр, размеры ограничивающего прямоугольника, моменты и т. п. При визуальном контроле мест пайки используются следующие характеристики:

наличие отверстия в узле пайки — всегда дефект;

размер узла, измеряемый по сторонам ограничивающего прямоугольника — если размер пропаянного узла больше допустимого,

возможна нежелательная перемычка припоем между местами пайки, слишком маленький размер свидетельствует о пропущенной точке пайки или случайной капле припоя;

пераунд (характеристика формы, равная нормализованному отношению площади объекта к квадрату его периметра; так, для идеального круга пераунд равен единице, а для объектов менее правильной формы он меньше единицы) — если этот показатель слишком мал, то делается вывод о наличии перемычки или непропаянного узла.

При обработке данных из категории дефектных узлов исключаются те места пайки, которые, хотя и не проходят по двум последним характеристикам, но должны нормально присутствовать на небракованной печатной плате: двойные и тройные соединения, узлы с отводами для тестов и т. п. Информация о таких точках заранее вводится в массив, описывающий эталонную плату, с указаниями координат и характеристик нормально пропаянного узла.

Описанная система обнаруживает свыше 99,8 % всех дефектов, причем доля «ложных тревог» не превышает 1 % всех мест пайки. Срок окупаемости робота с СТЗ составляет 2 ... 3 года за счет сокращения труда человека на контроле и повышения надежности продукции.

Фирма «Октек» (*Octek*, США) разработала роботизированную систему контроля и сортировки клавиш дисплеев и пультов. Каждая клавиша перед загрузкой в магазин сборочного автомата осматривается СТЗ. Результаты инспекции, а также информация о типе клавиши и ее положении передаются роботу, который либо загружает клавишу в соответствующий магазин, либо бросает в бункер для брака. В состав СТЗ входят: твердотельная камера с объективом с фокусным расстоянием 50 мм, имеющая разрешение  $320 \times 240$  пиксел; видеопроцессор *TASK 20/20* на базе процессора *LSI 11/23*; система освещения с волоконными световодами, дающая узкие световые лучи с двух сторон рабочего стола; телемонитор. Кроме того, ячейка контроля включает робот с системой управления, вибропитатель и пульт оператора. Связь СТЗ с управляющим устройством робота осуществляется либо через последовательный интерфейс *RS 232C*, либо через параллельный 16-разрядный интерфейс. В рабочем режиме система управления робота опрашивает блок связи с СТЗ и после поступления данных о типе и положении очередной клавиши вырабатывает соответствующие управляющие сигналы на приводы манипулятора.

Классификация клавиш проводится по символам, нанесенным на верхней грани. Кроме того, визуальный осмотр выявляет такие дефекты, как трещины, выбоины, сколы. Для уверенного различения символов необходимо, чтобы ширина его изображения составляла не менее 14 пикселов. Инспекционный осмотр клавиши начинается с контроля контраста изображения, после чего с по-

мощью алгоритмов анализа связности рассчитываются характеристики символа, нанесенного на клавише: число связных компонентов, число отверстий в каждом из них, высота и ширина символа, площадь, периметр и вытянутость компонентов. Эти признаки позволяют классифицировать весь набор клавиш, предъявляемых с фиксированной ориентацией. Однако поскольку вибробункер подает клавиши, ориентируя их лишь до угла, кратного  $90^\circ$ , что увеличивает количество различных изображений, подлежащих классификации, с 60 до 240, дополнительно был использован алгоритм поэлементного сравнения изображения с учетом «весов» различных элементов.

Система поставляется пользователю в полностью укомплектованном виде. Ее окончательная наладка на рабочем месте, включая приемные испытания, занимает несколько дней.

## 7.2. СВАРОЧНЫЕ, ОКРАСОЧНЫЕ, СБОРОЧНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ С СИСТЕМАМИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Современный этап развития робототехники характеризуется устойчивой тенденцией к повышению роли технологических роботов, непосредственно выполняющих основные производственные операции (сварку, окраску, механообработку, сборку, монтаж электронных схем и т. п.), по сравнению с вспомогательными роботами, обслуживающими основное технологическое оборудование. Соответственно возрастает значение эффективного применения СТЗ в комплексе с технологическими роботами, что придает последним качественно новые возможности, особенно в ГПС.

**Сварка.** Сварочное производство является одним из главных потребителей роботов, которые уже давно стали массовым и привычным оборудованием точечной сварки и все шире внедряются на операциях дуговой сварки. При всей перспективности роботизации дуговой сварки ее размах пока сдерживается рядом объективных причин, связанных прежде всего с разбросом размеров и кривизны свариваемых деталей, неидеальностью разделки кромок под стык, неоднородностью и температурными деформациями материалов, прогибом тяжелых конструкций, а также с неточностью установки свариваемых элементов в фиксаторах. Все это существенно затрудняет применение жесткопрограммируемых сварочных роботов и требует создания адаптивных роботов, способных подстраивать движения сварочной головки под реальную траекторию стыка (и кроме того автоматически регулировать такие параметры процесса, как сварочный ток, напряжение дуги, скорость сварки).

В настоящее время известны весьма разнообразные подходы к адаптации сварочных роботов, начиная от коррекции управляющей программы путем смещения хранящихся в памяти точек по данным текущих измерений и кончая автоматическим поиском со-

вершенно новой траектории перемещения сварочной головки на основе сенсорной информации о положении стыка. В обоих случаях можно либо вначале пройти вдоль стыка, не включая сварочный аппарат, только в целях определения и запоминания траектории будущего шва, либо формировать движение робота непосредственно в процессе сварки — в однопроводном режиме.

Для очувствления сварочных роботов используют самые различные датчики контактного и бесконтактного типа (механические щупы, тактильные, электромагнитные и струйные датчики), а также результаты измерения положения стыка по параметрам самой сварочной дуги. Естественно, что важное место в системах адаптации сварочных роботов отводится и техническому зрению [47, 49, 79]. При создании СТЗ для роботизации сварки приходится преодолевать специфические трудности, обусловленные сильными помехами от яркого света дуги (горелки) и сварочной ванны, необходимостью защиты видеосенсора от брызг расплавленного металла, загрязнения, воздействия теплоты и агрессивной газовой среды, большой неравномерностью отражения света от поверхности свариваемых элементов. Поэтому наряду с попытками использования стандартных промышленных телевизионных установок активно разрабатываются специальные СТЗ, ориентированные на решение сварочных задач. Эти СТЗ включают осветители с направленным и монохроматическим излучением или модулированным световым потоком, избирательные фильтры, световоды, устройства охлаждения и защиты, различные видеосенсоры, которые устанавливаются как в непосредственной близости от точки сварки (часто монтируются вместе со сварочной головкой), так и на некотором удалении от нее для обнаружения шва «с опережением» и снабжаются системами зеркал, двигателями для сканирования зоны, а также аппаратные и программные средства обработки видеoinформации для быстрого поиска центральной линии свариваемого соединения. Проиллюстрируем сказанное рядом примеров.

Система АРТИСТ (*ARTIST — Adaptive Real-Time Intelligent Seam Tracker*) — адаптивная «интеллектуальная» система отслеживания шва в реальном времени (разработка университета штата Пенсильвания, США) предназначена для роботизации сварки без необходимости предварительного программирования сварочного робота путем его проведения по требуемой траектории [69]. Это достигается благодаря тому, что система АРТИСТ (рис. 7.5) способна управлять движением сварочной головки в реальном времени на основании видеoinформации об искажении лазерного луча на стыке свариваемых деталей.

Видеосенсор с лазерным излучателем фирмы «Чисепик лазер системс» (*Chesapeake Laser Systems*, США) измеряет профиль стыка методом триангуляции. Максимальное число точек измерения на скане — 1000; скорость измерения — несколько миллисекунд на точку; погрешность не более  $\pm 0,125$  мм на линии шириной 32 мм.



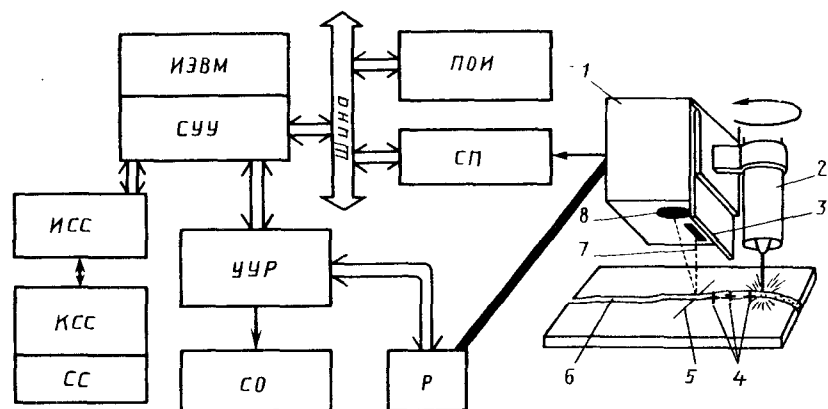


Рис. 7.5. Схема системы дуговой сварки роботом с СТЗ:

1 — видеосенсор; 2 — сварочная головка; 3 — щиток; 4 — позиции коррекции; 5 — линия сканирования; 6 — стык; 7 — лазерный луч; 8 — телекамера; ИЭВМ — интерфейс микроЭВМ; СУУ — супервизорное устройство управления; ИСС — интерфейс сварочного стола; КСС — контроллер сварочного стола; СС — сварочный стол; ЦУР — устройство управления робота; СО — сварочное оборудование; ПОИ — процессор обработки изображения; СП — специализированный препроцессор; Р — робот

Видеосенсор снабжен щитком от брызг расплавленного металла, светофильтром для задымленной среды и специализированным препроцессором, преобразующим исходную видеоинформацию в последовательность значений отклонений оси объектива от средней линии стыка. Эти сигналы поступают в микроЭВМ с архитектурой «Intel-80286» (аналогичной IBM PC), где вместе с текущими координатами видеосенсора используются для расчета пространственного положения стыка в системе координат рабочего органа робота.

Программное обеспечение имеет модульную структуру и реализует следующие алгоритмы: сбора данных о профиле стыка (с управлением частотой съема и временами задержек); фильтрации ошибочных отсчетов, вызванных, например, отражением луча от блестящих участков сварочной ванны; обработки видеоинформации с сегментацией изображений, что позволяет достаточно точно определять V-образную разделку, валики прихваточного шва, среднюю линию и кромки стыка; преобразования геометрии стыка в систему координат сварочной головки.

Система АРТИСТ ориентирована на использование вместе с порталным роботом «Unimate 6000» (шесть степеней подвижности) и рассчитана на многопроходную сварку швов с V-образной разделкой со скоростью до 25,4 мм/с.

Структура оучувствления роботизированного комплекса для сварки двигателя космического корабля «Шатл», разработанная совместно НАСА и компанией «Рокуэлл интернешнл» (Rockwell International), показана на рис. 7.6. Для каждого двигателя, который состоит из большого числа деталей, выполненных из раз-

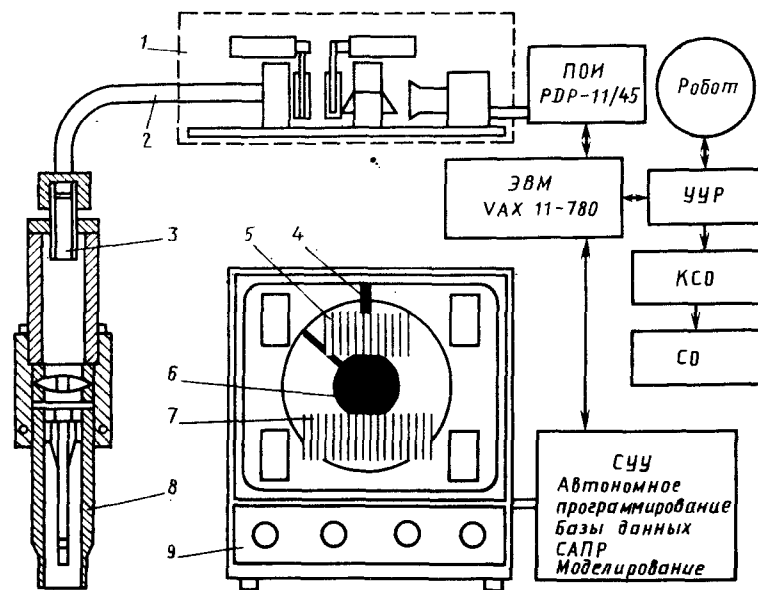


Рис. 7.6. Схема включения СТЗ в адаптивный роботизированный комплекс для сварки двигателя космического корабля «Шатл»:

1 — ПЗИ-камера; 2 — оптоволоконный световод; 3 — соосный оптический приемник; 4 — шов; 5 — «окно» слежения за швом; 6 — тень от электрода; 7 — «окно» измерения ширины сварочной ванны; 8 — оучувствленная сварочная головка; 9 — дисплей; ПОИ — процессор обработки изображения; ЦУР — устройство управления робота; КСО — контроллер сварочного оборудования; СО — сварочное оборудование; СУУ — супервизорное устройство управления

личных жаропрочных сплавов и имеющих большой разброс по толщине, типам разделки кромок, отражательной способности, нужно сварить до 3000 швов, многие из них — многопроходные. Эти факторы вместе с повышенными требованиями к качеству изделия не позволяют применять традиционные средства автоматизации сварки, и около 50 % сварочных операций приходится выполнять вручную.

Для роботизации части этих операций предложено использовать робот «Curo 750» фирмы «Эдвансд роботикс» (Advanced Robotics, США) и СТЗ с видеосенсором, разработанным в университете штата Огайо, приемник которого устанавливается непосредственно в сварочной головке соосно с электродом и связан гибким оптоволоконным световодом с ПЗИ-камерой. Полученное изображение далее обрабатывается процессором PDP 11/45, который, в свою очередь, обменивается информацией с центральной ЭВМ VAX 11-780 производственной ячейки. Имеющиеся средства графического моделирования и САПР дают возможность оператору в интерактивном режиме выбирать вид и параметры алгоритмов выделения характерных признаков, чтобы СТЗ наилучшим образом выявляла швы разных типов и определяла их геометрические характеристики. Адаптивная коррекция движений робота



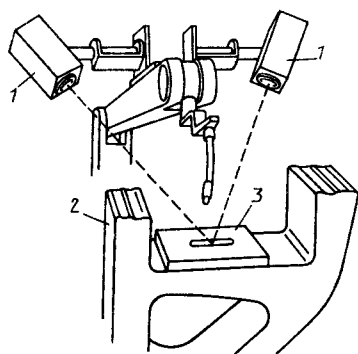


Рис. 7.7. Стереосистема пространственной коррекции траектории сварки робота AID 800:

1 — телекамера; 2 — рама; 3 — вкладыш

в режиме контурного управления рассчитана на скорость сварки до 5 мм/с.

Компания «Норфолк энд уэстерн рэйлуэй» (Norfolk & Western Railway, США) применила стереозрение для формирования пространственной траектории движения робота, приваривающего

вкладыши размером  $190 \times 230$  мм в тяжелые (500 кг) рамы колесных тележек бункерных вагонов во время их ремонта. Длина каждого шва около 90 см, скорость сварки 25 см/мин. Поскольку точная пространственная фиксация вкладышей крайне затруднена, специалисты компании сочли целесообразным использовать сварочный робот AID-800 в адаптивном режиме, снабдив его СТЗ с парой твердотельных телекамер, укрепленных на расстоянии 76,2 см друг от друга (рис. 7.7).

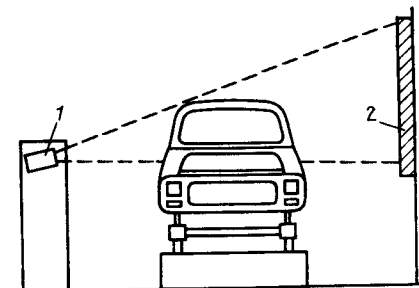
Бинокулярная СТЗ фирмы «Отоматикс роботик систем» (Automatic Robotic Systems, США) по двум изображениям методом триангуляции находит трехмерные координаты крайних точек проеци в середине вкладыша и по известным его размерам определяет траекторию будущего сварного шва. Этот процесс — от начала движения робота к рабочей позиции до начала сварки — занимает менее 6 с. Вычислительная часть системы строится на базе микропроцессора Motorola 6800. Для программирования как СТЗ, так и робота оператор может пользоваться удобным языком RAIL. Вся процедура калибровки и обучения системы новому классу деталей занимает не более часа.

Несколько интересных примеров зрительного оцувствления роботов для прецизионной микросварки при изготовлении электронных приборов описаны в [9], и в частности отечественные адаптивные роботы типа ОЗУН с видеосенсором на ПЗС и микроЭВМ «Электроника 60», обеспечивающие высокую точность и производительность.

**Окраска.** Применение роботов с СТЗ на окрасочных операциях обеспечивает гибкость производства за счет обработки на одном конвейере изделий разных и часто меняющихся типоразмеров, позволяет повысить производительность и качество окраски и существенно уменьшить расход красителей.

Особенности реализации технического зрения на операциях окраски связаны с большим разнообразием вариантов подвески окрашиваемых деталей, которые, кроме того, при транспортировании могут раскачиваться и поворачиваться в пространстве;

Рис. 7.8. Использование СТЗ в роботизированном комплексе окраски кузовов



с проблемой защиты оптики видеосенсоров и источников освещения от загрязнения распыляемой краской; необходимостью учета взрывопожароопасности рабочей среды. В промышленности находят применение различные классы СТЗ окрасочных роботов, начиная от простейших фотоэлементов, включающих краскопульт при появлении объекта и выключающих его при выходе объекта из зоны окраски, и кончая системами с развитыми функциональными возможностями, способными идентифицировать тип поступившего объекта и выбирать соответствующий вариант окраски, определять положение окрашиваемой детали в пространстве, должным образом корректируя движения робота, несущего краскопульт, вплоть до автоматического поддержания нужного расстояния от окрашиваемой поверхности вдоль всей формируемой траектории движения, контролировать качество окраски, подавая роботу команды на устранение обнаруживаемых дефектов.

Например, СТЗ фирмы «Интегретед фотоматрикс» (Integrated Photomatrix, Великобритания), помимо идентификации типа автомобильных кузовов, проходящих мимо видеокamеры 1 перед попаданием в рабочую зону окрасочного робота (рис. 7.8), обеспечивает некоторую дополнительную информацию (открыты или закрыты двери, подняты или опущены крышки багажника и капота и т. п.), которая предотвращает случайное повреждение автомобиля роботом, а также гарантирует правильную окраску в любом из этих случаев. В системе используется твердотельная линейная камера IPL C2246 с разрешением  $256 \times 1$  пиксел, поле зрения которой для данной установки составляет 800 мм. Источником освещения служит флуоресцентный экран 2. Блок анализа изображений базируется на микропроцессоре Z 80, куда поступают также сигналы от позиционного кодового датчика текущего положения конвейера. Тип кузова идентифицируется по его профилю, определяемому последовательностью бинарных вертикальных изображений, которые считываются камерой через интервалы времени, соответствующие шагу в 100 мм. Полученный профиль сравнивается с эталонными образами, которые формируются на стадии обучения при предъявлении кузовов разных моделей автомобилей с указанием их типов. Возможна конфигурация СТЗ не с одной, а с двумя и более камерами, работающими как с встречным освещением, так и с отраженным световым потоком.

На Международной робототехнической выставке в Японии экспонировался робот для шпатлевки швов перед окраской с СТЗ

EPR-4000 на базе двух микропроцессоров, один из которых (16-разрядный) выполняет функции центрального процессора, а другой (32-разрядный) служит для быстрой предварительной обработки изображений. Видеоинформация поступает по 10-канальному оптоволоконному световоду. Память СТЗ позволяет одновременно хранить до 64 кадров изображения размером  $248 \times 192$  пиксел. При обучении можно задать модели 31 объекта. Допускается редактирование и модификация классифицирующих признаков оператором; признаками служат площадь, координаты центра формы, направление главной оси инерции, размеры полуосей эллипсоида инерции, которые строятся для каждого участка шва. Погрешность измерения позиции не превышает 0,1 мм при диапазоне измерений 0,1 ... 10 000 мм. СТЗ распознает типичные участки шва, подлежащие шпатлевке тем или иным способом, и рассчитывает необходимые точки траектории робота. Робот 8604-АК с описанной СТЗ выполняет в автоматическом режиме шпатлевку швов длиной до 400 мм с погрешностью до 1 мм. Полное время подготовки шва к окраске не превышало 4 с. Примеры других СТЗ окрасочных роботов см. в [30, 49, 61].

**Сборка.** Операции сборки, занимая одно из первых мест в современном промышленном производстве по трудоемкости и по доле работ, выполняемых вручную, очень нелегко поддаются автоматизации. Сборочные промышленные роботы начали широко внедряться позже большинства других технологических роботов, причем до недавнего времени их эффективное применение ограничивалось сборкой изделий при массовом и крупносерийном выпуске (например, в часовой или радиоэлектронной промышленности), когда удается создать высокоорганизованную рабочую среду путем подачи компонентов на позицию сборки в строгом порядке с неизменной ориентацией. Если же трудно или невыгодно обеспечивать упорядочение в рабочей среде за счет изготовления специализированного вспомогательного оборудования и оснастки для каждого нового вида изделия и технологии, то использование для сборки жесткопрограммируемых роботов сопряжено с серьезными проблемами, хотя именно широкая роботизация сборочных процессов в мелкосерийном и единичном производстве позволяет, по мнению специалистов, создавать по-настоящему гибкие производственные системы.

В связи с этим ожидается усиление внимания к роботизации сборки (так, доля сборочных роботов в общем парке промышленных роботов США возрастает с 16 % в 1985 г. до 35 % к 2000 г. [74]) и отчетливо проявляется необходимость перехода к адаптивным сборочным роботам.

Предполагается, что уже в ближайшие годы серийно выпускаемые промышленные роботы смогут гибко переключаться на сборку различных изделий в течение одной смены, имея средства аналитического программирования, связь с САПР/АСУ ТП и развитые системы осязания, включая СТЗ [61]. Ожидается также рост

доли тех применений роботизированных комплексов, в которых роботы будут выполнять не отдельные сборочные операции, а весь многооперационный процесс сборки изделия. Этот процесс включает не только собственно операции соединения элементов собираемого узла, но и подготовительные операции (расконсервация компонентов, извлечение их из тары, входной контроль, комплектация деталей для сборки конкретных изделий), вспомогательные и сопутствующие операции (транспортирование, зачистка, гибка, лужение отводов и т. п.), послесборочные операции (наладка, выходной контроль, маркировка, упаковка и др.). При выполнении большинства указанных работ роботами может быть эффективно использовано техническое зрение.

Выше уже были рассмотрены применения СТЗ роботов, осуществляющих упорядочение и контроль объектов. Фактически эти же требования и стоят, в первую очередь, перед СТЗ роботов на данном этапе: обеспечить возможность взятия нужной детали (в перспективе — сразу из тары); ее входного осмотра; переноса с требуемой ориентацией в зону сборки; инспекционного контроля правильности выполнения каждой из цепочки операций собственно сборки; проверки и упорядоченной укладки собранных узлов. Сочетание всех этих функций в едином роботизированном комплексе, а также реализация систем визуального сервоуправления, которые вместе с развитыми средствами тактильного и силомоментного осязания позволят роботу адаптивно осуществлять сами операции со сближения и фиксации компонентов по текущей сенсорной информации, должны привести к качественному скачку в развитии роботизации сборки. В настоящее время эти задачи часто еще решаются не в комплексе, но даже такие применения СТЗ повышают возможности сборочных роботов, подтверждением чего служат приведенные ниже примеры из области механосборки и монтажа электронных компонентов.

В Институте прикладной математики (ИПМ) им. М. В. Келдыша АН СССР разработана система инспекционного видения, предназначенная для контроля правильности выполнения сборочных операций. Она является составной частью экспериментальной автоматической сборочной системы, содержащей два манипуляционных робота, серийную промышленную телевизионную установку «Электроника Л-50», управляющую мини-ЭВМ М 6000 и вспомогательное оборудование [12]. Телекамера установлена на подвижном основании с двумя степенями подвижности, управляемыми от ЭВМ, и сопряжена с ней через устройства, позволяющие вводить в память любой прямоугольный фрагмент изображения максимальным размером  $128 \times 128$  пиксел с кодированием яркости 10 разрядами. Для контроля правильности сборки СТЗ сравнивает определенные фрагменты изображения с эталонными образами, формируемыми при обучении. Важно, что в каждом конкретном случае на изображении сопрягаемых деталей удастся выделить небольшие информативные участки,

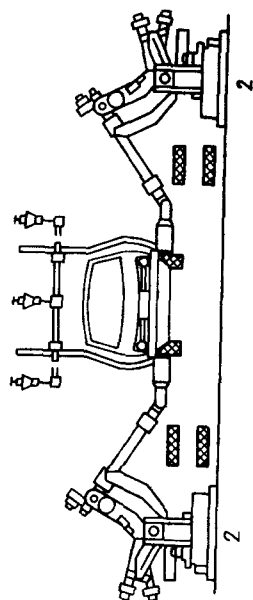
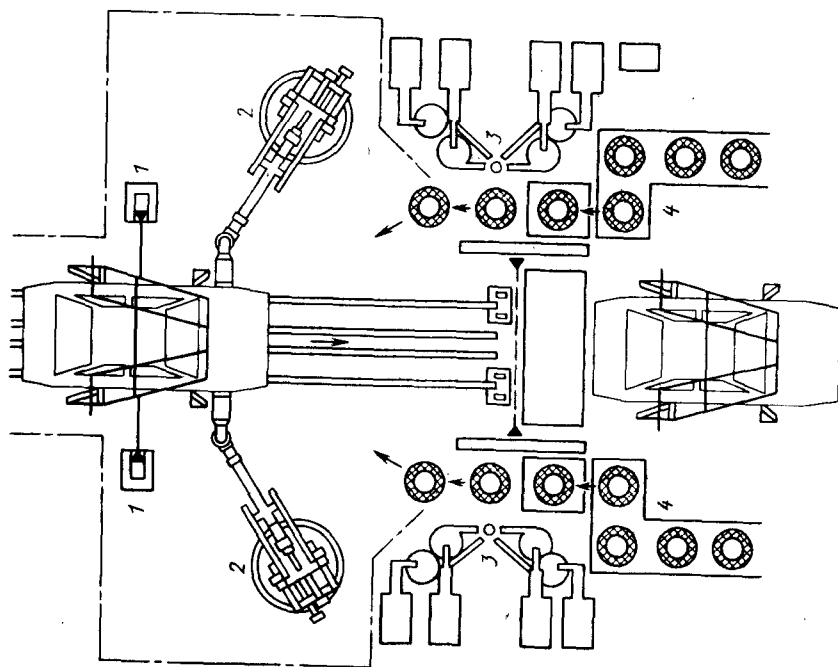


Рис. 7.9. Роботизированный сборочный комплекс для установки автомобильных колес с использованием СТЗ:  
1 — видеосенсор; 2 — промышленный робот; 3 — питатель для болтов; 4 — линия подачи колес



по которым можно судить, правильно ли или нет робот выполнил сопряжение. Возможность использования небольших (порядка  $20 \times 20$ ) фрагментов и их поэлементного сравнения позволяет сделать алгоритмы инспекционного видения компактными и быстрыми. В зависимости от ответа СТЗ на запрос о данной ситуации может происходить ветвление в плане сборки, осуществляемом роботом. Система показала высокую надежность при экспериментальной проверке на сборке масляного насоса и других механизмов.

Уже описанная выше система «Autoview» была использована в реальных производственных условиях для контроля процесса автоматической сборки электробритв. Вводимое с твердотельной камеры примерно за 0,1 с изображение сравнивается в нескольких информативных зонах с изображением узла, который на предыдущем цикле контроля был признан правильно собранным. Если различия не превышают некоторого порога, сборка считается правильной, и изображение узла на следующем цикле будет служить эталонным. В противном случае квалифицируется брак, и сохраняется прежний эталон. Достоинство такого метода состоит в его нечувствительности к плавным вариациям изображения из-за колебаний освещения и других достаточно медленных изменений. Эта СТЗ обеспечивает производительность не менее 200 изделий в минуту.

Еще на выставке «Робототехнологии-84» в Москве демонстрировался робот «Smart» фирмы «Комау» (Comau, Италия), выполнявший установку колес легковых автомобилей по текущей информации от системы стереозрения. В результате обработки в микропроцессоре изображений ступицы колеса от пары телекамер определяются пространственные координаты центров отверстий под болты крепления, что позволяет роботу правильно подогнать колесо к ступице, наживить и затянуть болты. Система надежно выполняет сборку, даже если ступица поступающего по конвейеру автомобиля отклоняется от номинального положения на  $\pm 2$  см по трем линейным координатам, на  $\pm 10^\circ$  по ориентации и произвольно повернута вокруг своей оси. Сходные задачи решает СТЗ SAM фирмы «Бош» (Bosch, ФРГ) при установке колес на ступицы роботами IR 601/60 CP. Схему этого производственного процесса поясняет рис. 7.9. За несколько лет работы СТЗ на заводе фирмы «Форд» не было зарегистрировано ошибок распознавания. Подстройка порога бинаризации требуется примерно раз в месяц.

Еще одним примером применения СТЗ совместно с роботами в автомобилестроении служит роботизация установки стекол автомобилей на предприятиях фирмы «Каули» (Cowley, Великобритания), где четыре линейные камеры определяют положение оконных проемов с погрешностью не более 1 мм, тогда как погрешность позиционирования кузова превышает 10 мм.

Сборка изделий электронной промышленности имеет ряд специфических особенностей: широкое разнообразие видов манти-

руемых элементов (резисторы, конденсаторы, транзисторы, микросхемы, разъемы, реле, радиаторы, трансформаторы и др.), многие из которых имеют большое число легко деформируемых выводов; необходимость очень плотного размещения компонентов на печатных платах с высокой точностью (типичные допуски характеризуются долями миллиметра); частое изменение типов выпускаемых изделий и быстрое развитие технологий, что приводит к выпуску продукции небольшими партиями; повышенные требования к качеству и надежности сборки, обусловленные высокой стоимостью (или даже невозможностью) исправления дефектов; во многих случаях обязательность обеспечения сверхчистой атмосферы в рабочей зоне.

Все это определяет специфику средств робототехники, применяемых в электронной промышленности для сборки микросхем, загрузки-разгрузки сборочных автоматов, монтажа компонентов (как стандартной, так и неправильной формы) на печатных платах, механосборки (например, завинчивания винтов), пайки (в тех случаях, когда волновая пайка неприменима) и сварки, настройки электронной аппаратуры, тестового контроля качества изделий. Поскольку трудоемкость операций сборки достигает 50 ... 60 % трудоемкости изготовления микроэлектронного прибора, многие предприятия и фирмы, специализируются на создании и внедрении сборочных роботов для электронной промышленности. Важное место в их разработках занимают методы и средства зрительного оцувствления этих роботов.

Техническое зрение в этих приложениях служит для точной локализации кристаллов БИС, поиска контактных площадок на кристаллах, определения фактического местоположения и ориентации печатных плат и отверстий на них, а также монтируемых компонентов, для визуального контроля допустимости промежутков между выводами и их изгиба, управления движениями робота при совмещении выводов с отверстиями, обнаружения возможных нарушений при монтаже компонентов и т. д.

Например, СТЗ CRS 1000, разработанная в Великобритании, используется при производстве интегральных схем. В поле зрения телекамеры (512×512 пикселей, 256 градаций яркости) последовательно подводятся кристаллы интегральных схем, установленные в ячейках поддона размером 5×5 мм. В результате обработки видеoinформации центр кристалла определяется с погрешностью не более 10 мкм; погрешность ориентации — не более 0,2°. Далее кристалл захватывается роботом и помещается на кристаллодержатель с правильной ориентацией, после чего автоматически прикрепляется к подложке. Весь цикл не превышает 1 с. СТЗ способна также идентифицировать тип кристалла по таким признакам, как размеры, общее число и картина расположения контактных площадок, передавая эту информацию устройству управления робота. Отечественный сборочный робототехнический комплекс для монтажа кристаллов СБИС, использующий СТЗ на

базе микро-ЭВМ «Электроника МС-1201» при подготовке сборки и контроле ее качества, описан в [20]. Обзоры ряда других СТЗ, которые эффективно применяются при роботизированной сборке изделий микроэлектроники и монтаже печатных плат в СССР, США, Японии, содержатся в [9, 30, 61].

### 7.3. ЗРИТЕЛЬНОЕ ОЧУВСТВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Мобильные роботы отличаются способностью самостоятельно перемещаться в рабочей среде и предназначены для транспортирования грузов (транспортные роботы), проведения исследований и наблюдений в окружающем пространстве (исследовательские роботы — подводные, космические, вулканологические и т. п.), выполнения различных работ (автоматические сельскохозяйственные, дорожностроительные, пожарные, горнодобывающие и другие машины, передвижные платформы с манипуляционными механизмами). Наряду с классификацией по области применения мобильных роботов различают по типу движителя (колесные, гусеничные, шагающие, плавающие и др.), по способности перестраивать свои действия (жесткопрограммируемые; с возможностью условных переходов от одной жесткой программы к другой; адаптивные), по степени автономности (перемещающиеся по заранее проложенным маршрутопроводам; перемещающиеся в произвольном направлении при супервизорном дистанционном управлении; свободно перемещающиеся с автоматической прокладкой маршрута).

Большинство современных мобильных роботов снабжены теми или иными средствами зрительного оцувствления, начиная от простейших оптических датчиков безопасности и кончая сложными системами стереозрения и измерения дальности (см., например, обзор [73]). Естественно, что для перечисленных классов роботов функциональные задачи технического зрения могут существенно различаться. Рассмотрим основные из этих задач и некоторые конкретные примеры их решения в СТЗ мобильных роботов.

Мобильные роботы уже нашли довольно широкое применение в промышленности как внутрицеховой и междецеховой транспорт для перевозки заготовок, изделий и других грузов. Пока в большинстве случаев эти роботы представляют собой жесткопрограммируемые автоматы — транспортные тележки с *маршрутопроводным* управлением. Маршрутопроводами могут служить механические направляющие, электрические кабели, прокладываемые под полом цеха, цепочки фиксированных радиомаяков, а также — что важно для настоящего изложения — светоотражающие или контрастные полосы, наносимые на полу. Зрительное отслеживание маршрутопроводной полосы в простейшем случае может осуществляться, например, парой расположенных на днище робота справа и слева от его осевой линии видеосенсоров, которые посылают управляющие команды на соответствующие приводы ходо-

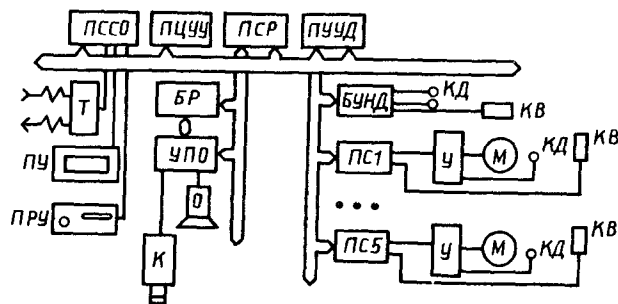


Рис. 7.10. Структурная схема системы управления мобильным транспортным роботом с СТЗ:

ПССО — процессор системы связи с оператором; ПЦУУ — процессор центрального устройства управления; ПСР — процессор системы распознавания; ПУУД — процессор устройства управления движением; Т — терминал дистанционной системы связи; ПУ — пульт управления; ПРУ — панель ручного управления; К — телевизионная камера; О — осветительные устройства; УПО — устройство предварительной обработки; БР — блок распознавания; БУНД — блок управления направленным движением; ПС — процессор сервопривода; У — усилитель; М — двигатель; КД — кодовый датчик положения; КВ — конечный выключатель

вой части при нарушении баланса сигналов, возникающем, если один из датчиков воспринимает полосу, а другой — фон. Обычно полоса освещается источником света, установленным на самом роботе.

Более сложная СТЗ для распознавания полосы использована в японском мобильном роботе, специально созданном для работы в цехах производства полупроводников с учетом высоких требований к чистоте атмосферы [31]. Автоматическая тележка с четырьмя независимо управляемыми колесами способна двигаться в любом направлении без изменения ориентации корпуса. Она имеет грузоподъемность 60 кг и несет на себе манипуляционный робот MELFA-RH для загрузки-разгрузки деталей, распознавание которых выполняется СТЗ с телекамерой. Эта же СТЗ в процессе движения служит для отслеживания яркой полосы, нанесенной на полу цеха.

Схема системы управления мобильным роботом показана на рис. 7.10. Она функционально делится на центральное устройство управления, устройство распознавания и устройство управления движением тележки, каждое из которых имеет встроенный 8-разрядный микропроцессор, связанный в мультимикропроцессорную распределенную систему. Кроме того, мобильный робот имеет дистанционную связь с оператором, который в сложных ситуациях или при опасности аварии может взять управление на себя.

Маршрут транспортного робота можно задавать не только непрерывной линией, но и цепочкой дискретных зрительных ориентиров, однозначно определяющих нужную трассу. Еще в конце 1970-х гг. в Японии была создана СТЗ, обнаруживающая и распознающая искусственные ориентиры, устанавливаемые

в фиксированных точках по маршруту движения робота. Ими служили контрастные вертикальные полосы, число которых являлось кодом ориентира. Транспортная тележка массой 54 кг и размером 68×48 см имеет два боковых ведущих колеса с независимыми сервоприводами. На ней установлена телекамера с перископом, совершающим один оборот за 22 с, что позволяет получать круговой обзор рабочей зоны. Перископ может также отслеживать направление на ориентир, распознаваемый с расстояния 1 ... 8 м. При обработке в мини-ЭВМ изображений телекамеры для выделения ориентиров и подсчета числа полос используется метод сравнения с эталонными масками.

Поскольку сети маршрутопроводов могут быть достаточно разветвленными и движение по ним допускает диспетчеризацию от ЭВМ, то транспортные роботы описанного типа повышают вариативность доставки грузов по сравнению с конвейерным транспортом, что и обусловило их внедрение в первые ГПС. Однако несравненно большую гибкость производства могут обеспечить свободно перемещающиеся мобильные роботы, не требующие заранее прокладываемых маршрутопроводов и способные двигаться к оперативно задаваемым целям с обходом встречающихся на пути препятствий. Следует отметить, что и жесткопрограммируемые транспортные роботы, как правило, снабжаются датчиками (в том числе оптическими), позволяющими обнаруживать непредвиденные препятствия, однако при этом в большинстве случаев предусматривается не обход последних, а лишь прекращение выполнения задания с выдачей соответствующего сигнала. Свободно перемещающиеся роботы в реальных производственных условиях должны при движении к цели избегать столкновения не только с постоянными преградами (станками, трубопроводами, стенами), но и с непредвиденными препятствиями (вновь монтируемым оборудованием, временно сложенными на полу цеха штабелями деталей, тарой, отходами) и даже с движущимися объектами (людьми, автокарами, грузовиками, другими транспортными роботами).

Важность умения распознавать и обходить априорно неизвестные препятствия существенно возрастает с переходом из заводской обстановки в непромышленную сферу, где ожидается широкое применение мобильных роботов для таких задач, как добыча полезных ископаемых, сбор урожая, спасательные работы в опасных зонах, исследования планет и океана и т. д. Мобильные роботы могут перемещаться не только по двумерной опорной поверхности, но и в трехмерном пространстве: под водой, в воздухе, в космосе, когда возникает задача планирования пространственных траекторий движения по текущей сенсорной — и, прежде всего, зрительной — информации.

Пока полностью автономные мобильные роботы с адаптивным формированием целенаправленных движений еще только создаются, для проведения работ, исследований и наблюдений в сложных, труднодоступных и экстремальных средах используется

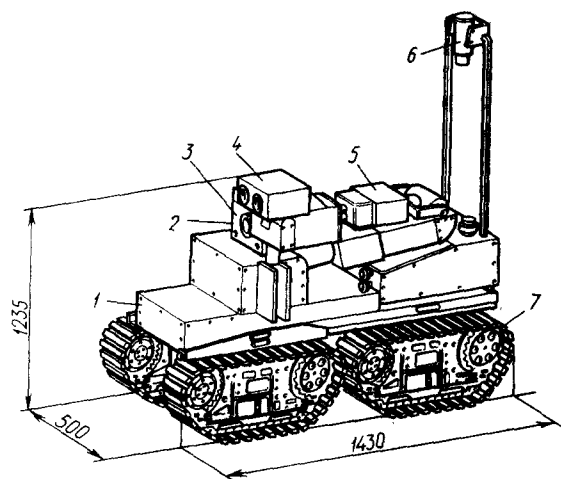


Рис. 7.11. Мобильный робот фирмы «Тошиба» с дистанционным управлением для обслуживания АЭС:

1 — блок управления перемещением; 2 — блок датчиков (радиационный дозиметр, термометр, микрофон и др.); 3 — цветная телекамера; 4 — стереопара черно-белых камер; 5 — многозвенный шарнирный манипулятор; 6 — черно-белая камера осмотра крупным планом; 7 — гусеничный движитель

супервизорный режим дистанционного управления свободными перемещениями роботов. В частности, активно ведутся работы по роботизации обслуживания атомных электростанций: профилактического осмотра, очистки и мелкого ремонта реакторов, контроля температуры, уровня радиации и других параметров, удаления радиоактивных отходов. В США созданы мобильные роботы с супервизорным управлением для работы в радиоактивных зонах *Surveyor* компании «Отомейшн технолоджи» (*Automation Technology*), *Kluge* компании «Сайбермейшн» (*Cybermation*) и др. [58, 75], которые, помимо высокоманевренных движителей, радиотелеметрической аппаратуры и специальных датчиков, снабжены разнообразными средствами получения видеоинформации. Мобильный робот корпорации «Тошиба» (*Toshiba*, Япония), также предназначенный для наблюдения и осмотра оборудования реакторов АЭС, изображен на рис. 7.11. Он способен перемещаться не только по ровной поверхности, но и преодолевать крутые подъемы и спуски (с уклоном до  $30^\circ$ ) и даже лестницы (с высотой ступенек до 20 см). На роботе установлены цветная телекамера, пара черно-белых телекамер, позволяющих наблюдать стереопанораму обзораемого пространства, и еще одна черно-белая телекамера, передающая изображения крупным планом для снятия показаний с приборов, обнаружения видимых дефектов, осмотра самой подвижной тележки. Однако функции этой видеоаппаратуры в подобных роботах с супервизорным управлением пока почти целиком сводились к передаче зрительной информации человеку-оператору.

Гораздо более активную роль призвано играть техническое зрение усиленно разрабатываемых в научных центрах многих стран автономных мобильных роботов с адаптивным поведением, которые будут самостоятельно формировать свои действия в сложных незнакомых средах, целенаправленно выполняя полученные задания. Можно указать две основные задачи, стоящие перед СТЗ таких роботов: а) выявление допустимых для движения робота участков рабочего пространства и непроходимых по тем или иным причинам областей (препятствий), а также опасных зон, где перемещение робота хотя и возможно, но сопряжено с определенным риском; б) распознавание и локализация целей, ориентиров и других объектов окружающей среды для определения собственного местоположения робота (абсолютного или относительно этих объектов) с целью его навигации. Для информационно-управляющих систем роботов с элементами искусственного интеллекта обе эти задачи объединяются в общую проблему получения данных для построения модели рабочей среды, которая дает возможность роботу планировать и корректировать свое поведение, самообучаться, приобретая «опыт».

Для практически приемлемого решения указанных задач требуется создание надежных, компактных и легких видеосенсоров и другой аппаратуры СТЗ автономных мобильных роботов, эффективных методов обработки, анализа и использования видеоинформации, обеспечивающих высокое быстродействие (вплоть до работы в реальном времени — без остановки и замедления движения робота) при реализации на бортовых вычислительных устройствах. В этом направлении советскими и зарубежными исследователями ведется большая работа. В [32] описаны одни из первых американских разработок экспериментальных мобильных роботов, способных адаптивно действовать в соответствии со зрительной информацией от бортовых телекамер.

В отличие от описанной выше СТЗ, локализирующей искусственные ориентиры заранее известного типа, исследовательская тележка Станфордского университета и робот-вездеход (ровер) Университета Карнеги—Меллона работают в неструктурированной естественной среде, автоматически строя маршруты с обходом препятствий. При этом СТЗ станфордской тележки для обеспечения навигации и распознавания препятствий вводит во время остановок робота при осмотре местности последовательность стереоизображений и выделяет на них около 30 характерных признаков (типа углов, ярких пятен и других фрагментов изображений, расположение которых однозначно устанавливается на различных видах сцены). В СТЗ ровера заложены аналогичные принципы анализа изображений, получаемых при перемещении телекамеры. Результаты этих пионерских исследований при всей их научной значимости были далеки от удовлетворения практических потребностей: станфордская тележка вследствие медленного выполнения перечисленных процедур проходила лишь 1 м за 10 ... 15 мин,



а СТЗ ровера, использующая мощную стационарную ЭВМ (с быстроедействием до  $100 \cdot 10^6$  операций в секунду, по оценкам авторов, должна действовать всего на порядок быстрее.

Более новые разработки позволяют надеяться на появление эффективных автономных мобильных роботов с техническим зрением. Так, в Университете бундесвера (ФРГ) создан действующий прототип робота-автофургона, способный без водителя и без телеуправления ездить по шоссе (правда, пока без других движущихся объектов) [57]. Информация для управления роботом в контуре зрительной обратной связи поступает от СТЗ, отслеживающей края дороги. Организация системы иллюстрируется рис. 7.12.

В СТЗ используются две телевизионные камеры, установленные на управляемой платформе с двумя степенями свободы (поворот и наклон) непосредственно за ветровым стеклом автомобиля. Одна камера с широкоугольным объективом получает изображение всего видимого участка дороги, а другая — с длиннофокусным объективом — укрупненное изображение в выбранном «окне», наводимом на небольшие зоны вдоль границы между

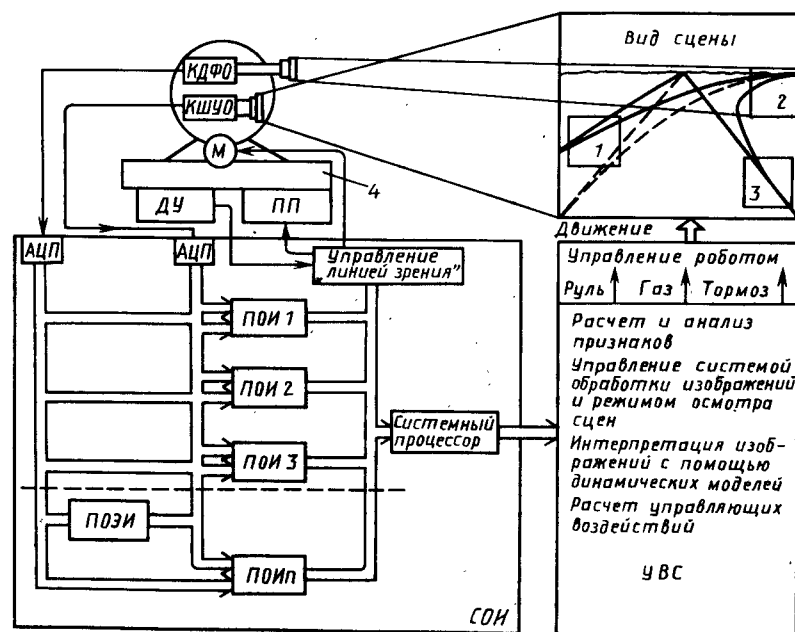


Рис. 7.12. Организация управления автономным роботом-автомобилем по информации от СТЗ:

КДФО — камера с длиннофокусным объективом; КШУО — камера с широкоугольным объективом; ДУ — датчики углов; ПП — привод поворота; М — двигатель привода наклона платформы; ПОИ — процессор обработки изображений; ПОЗИ — процессор обработки элементов изображения; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; СОИ — система обработки изображений; УВС — управляющая вычислительная система; 1—3 — «окна», выбираемые на краях дороги; 4 — подвижная платформа

асфальтом и обочиной. Оцифрованные изображения размером  $256 \times 256 \times 8$  бит по двум видеопинам поступают в бортовую мультимикропроцессорную систему обработки изображений BVV2. Сравнивая результаты анализа изображений с динамическими моделями изменений геометрии краев дороги при поворотах, подъемах и спусках, бортовая управляющая вычислительная система рассчитывает соответствующие воздействия на рулевое управление, акселератор и тормоз. Работа СТЗ в реальном времени позволяет автономному роботу-автофургону массой 5 т ехать со скоростью около 50 км/ч на сравнительно прямых участках шоссе и около 25 км/ч — при поворотах с радиусом 50 м.

В автономных мобильных роботах, предназначенных для работы на пересеченной местности, сложность задач совместного анализа последовательности изображений, поступающих с одной или нескольких камер, необходимого для определения пространственных координат объектов внешней среды, резко возрастает. Это делает актуальными также исследования, в которых для зрительного оцувствления мобильных роботов используют сканирующие дальномеры. Хотя информация с них поступает медленнее, чем с телекамер, обработка этой информации в целях локализации характерных точек рабочего пространства во многих случаях оказывается значительно проще. Этот подход, в течение ряда лет развиваемый в нашей стране, описан в [39], а также в [13] и в серии других препринтов ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР.

В обзорно-информационной системе мобильного робота по дальности и угловому положению луча лазерного дальномера измеряются геометрические характеристики среды в сферической системе координат. Расстояния измеряются в диапазоне 0,3 ... 4 м с погрешностью не более  $\pm 3$  см; сектор сканирования составляет  $\pm 30^\circ$ , его положением, а также дискретностью по углу сканирования ( $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ) можно управлять от ЭВМ [47].

Большое внимание уделено алгоритмическому и программному обеспечению рассматриваемой системы. По дальнометрической информации строятся локальные двумерные модели среды (типа карт), содержащие координаты измеренных точек, высоту поверхности в них, погрешность и число проведенных измерений, а также специальные признаки. По локальной модели определяются параметры очередного отрезка движения робота, например выбирается наиболее широкий свободный проход или путь с наименьшим отклонением от заданного направления, и рассчитываются линейная и угловая скорости движения, которые обеспечивают безопасное прохождение этого участка.

Разработанные методы и средства показали работоспособность в экспериментах с адаптивным шагающим роботом с дальнометрической СТЗ. Представляются перспективными и предложения сочетать телевизионные и дальнометрические системы зрительного оцувствления мобильных роботов.



#### 7.4. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Анализ современного состояния и устойчивых тенденций, наблюдаемых в процессах роботизации в различных сферах, позволяет с уверенностью прогнозировать приближение качественных скачков в развитии робототехники, касающихся как технического уровня и функциональных возможностей робототехнических систем, так и масштабов и областей их эффективного применения. Скажем, эксперты Общества инженеров промышленного производства (США) еще в 1982 г. предсказывали, что в 1990 г. половину всего парка промышленных роботов в мире составят адаптивные роботы, причем каждый второй из них будет обладать техническим зрением; в 1995 г. 50 % роботов будут иметь системы оучувствления непосредственно в контурах обратной связи, управляющих движениями, десятая часть роботов будет способна по информации от сенсоров работать в неупорядоченной среде с деталями, расположенными в навал, и лишь 4 % всех роботов будут выполнять только жестко запрограммированные операции типа «взять и перенести» [77].

Правильность сделанных тогда прогнозов в целом подтверждается: в 1987 г. свыше 20 % парка промышленных роботов составили роботы с техническим зрением [61]. По существующим оценкам, период с 1983 по 1987 г. характеризовался ростом объема мировых продаж СТЗ с микропроцессорами не менее чем на порядок, причем доля СТЗ, специально рассчитанных на робототехнические приложения, возросла с 6 до 24 %. Согласно более новому прогнозу ведущих экспертов, опрошенных Технологическим институтом штата Джорджия (США) [74], 50...70 % промышленных роботов, выпущенных в США в 2000 г., будут иметь техническое зрение; многоградационные СТЗ к этому году должны подешеветь на 48 % (при снижении средней цены типичного промышленного робота на 29 %). В Японии темпы роста выпуска видеосенсоров превышают 50 % в год. Программы роботизации в нашей стране также предусматривают существенное развитие и серийный выпуск СТЗ для роботов.

Столь большое внимание, уделяемое средствам зрительного оучувствления, являющимся одним из важных факторов придания роботам способности к адаптации, обусловлено объективными потребностями все усложняющихся задач роботизации. Во многих отраслях промышленности ощущается настоятельная потребность существенного повышения гибкости автоматизации производственных процессов, перехода к все более мелким сериям выпуска изделий расширяющейся и часто меняющейся номенклатуры. Как отмечалось в [34, 41], в этих условиях не всегда выгодно и возможно обеспечивать организацию полностью упорядоченной рабочей среды для жесткопрограммируемых роботов. Хотя робот с СТЗ стоит дороже простого неочувствленного робота, зна-

чительное удешевление вспомогательного оборудования и оснастки, упрощение перепроектирования и переналадки часто изменяющихся технологий, выигрыш за счет гибкости и ускорения выпуска на рынок новой продукции делают адаптивные роботы с техническим зрением в конечном итоге более выгодными.

В этой связи интересны следующие оценки [56]. Если принять обобщенную стоимость типичного промышленного робота (класса PUMA) за  $R$  единиц, то стоимость черно-белой телекамеры, обеспечивающей после оцифровки изображения разрешающую способность  $256 \times 256$  пиксел при 256 градациях яркости, составит всего  $0,003 R$ . Цена цветных телекамер с разрешением  $512 \times 512$  пиксел доходит до  $0,01 R$ . Разрабатываемые твердотельные камеры на ПЗС с большим быстродействием будут стоить примерно  $0,03 R \dots 0,05 R$ . Стоимость серийно выпускаемых СТЗ с процессором, способным за 1...5 с классифицировать изолированные объекты по изображениям их двумерных проекций на основе стандартных признаков, колеблется от  $0,3 R$  до  $1 R$ . Однако с развитием технологии и методов технического зрения она будет снижаться, а функциональные возможности СТЗ — расти.

Специалисты ожидают, что распространенные сегодня СТЗ на базе одиночных или нескольких фотоэлементов, фотодиодных линеек и матриц, передающих вакуумных трубок будут в робототехнических приложениях вытесняться более совершенными системами с твердотельными преобразователями [70]. Уже в недалеком будущем войдут в практику высококачественные видеосенсоры, обладающие разрешением  $1024 \times 1024$  пиксел, малой инерционностью, высокой линейностью, равномерностью и стабильностью видеосигнала, большой чувствительностью в расширенном спектральном диапазоне; шире будут применяться цветные камеры, твердотельные преобразователи, инфракрасные, рентгенотелевизионные, радиоволновые и другие системы.

Появятся новые модели малогабаритных и легких (вплоть до миниатюрных) видеосенсоров с улучшенной оптикой, обеспечивающей малые искажения и астигматизм, повышенной скоростью сканирования, автоматическим и адаптивным выполнением процессов фокусировки и диафрагмирования объектива, перемещения и наведения камеры, выбора светофильтра. Больше внимания будет уделяться осветительным приборам для СТЗ роботов, в том числе с возможностями управляемого и структурированного освещения, варьирования длины волны (и не только в видимом диапазоне); в качестве источников света будут использоваться как различные лампы накаливания, так и лазеры, флюоресцирующие, стробирующие и другие источники. Получит развитие волоконная оптика: повысится гибкость световодов, понизится затухание светового сигнала. Должны быть созданы более совершенные оптические локационные датчики, прежде всего лазерные дальномеры, которые будут обладать большей дальностью действия,

высоким быстродействием, хорошей точностью и разрешающей способностью во всем секторе обзора.

Прогресс микроэлектроники и вычислительной техники приводит, с одной стороны, к удешевлению, миниатюризации и расширению функциональных возможностей универсальных ЭВМ и микропроцессоров, используемых в СТЗ роботов, а с другой стороны — к разработке эффективных спецвычислителей (вплоть до заказных СБИС), обеспечивающих высокое быстродействие как на этапах ввода и запоминания видеoinформации (в том числе с адаптивным выбором положения и размеров окна, шага дискретизации, порогов и числа уровней квантования), так и на дальнейших стадиях обработки, сегментации, описания и анализа изображений. Должны быть развиты методы и средства распараллеливания вычислительных процедур, а также устройства, базирующиеся на принципах оптоэлектроники и голографии.

Наряду с аппаратурой будет совершенствоваться и программное обеспечение СТЗ роботов. Они будут комплектоваться богатыми библиотеками стандартных программ решения типичных задач технического зрения, построенными по модульному принципу и допускающими возможности гибкой переконфигурации, наращивания и модификации. При этом существенно повысится удобство работы с СТЗ за счет системных и сервисных программ, обеспечивающих, в частности, интерактивный режим с активным использованием современных средств диалога и машинной графики.

Прогнозируется бурное развитие языковой поддержки СТЗ роботов (включая языки высокого уровня), адекватно учитывающей специфику их настройки, обучения, контроля и функционирования в реальном времени. Разработки все более эффективных — в смысле быстродействия, затрат памяти и другой аппаратуры ЭВМ — программных и особенно программно-аппаратных реализаций хорошо зарекомендовавших себя известных вычислительных процедур будут сопровождаться созданием новых теоретических принципов, математических методов и алгоритмических решений, которые должны привести к качественному расширению функциональных задач СТЗ, реализуемых при приемлемых затратах времени и ресурсов.

Гораздо большее распространение получают системы, работающие с многоградационными изображениями; параллельные алгоритмы пространственной фильтрации изображений, их «улучшения» и сопоставления с эталонами; методы автоматического формирования классифицирующих признаков с наращиванием размерности признакового пространства по мере необходимости; подходы к распознаванию ситуаций на основе моделей проблемной среды робота и баз знаний; стереоскопические СТЗ, комбинации телевизионных видеосенсоров с дальнометрическими, а также с тактильными, силомоментными и другими датчиками в единой системе осязания робота; СТЗ с установкой видео-

сенсоров непосредственно на руке робота. Все это даст возможность роботу с техническим зрением воспринимать и анализировать трехмерные сцены, распознавать частично перекрывающиеся объекты, ориентироваться в динамически изменяющихся ситуациях, используя информацию от СТЗ не только для оперативного выбора правильной последовательности имеющихся жестких программ по априорно предусмотренным условиям, но и для адаптивного формирования заранее не запрограммированных действий — вплоть до визуального сервоуправления движениями.

Приведенные оценки и прогнозы развития СТЗ роботов, обобщающие сведения из многочисленных источников (см., например, [47, 56, 61, 74, 75]), подкрепляются поступающими из разных стран данными о конкретных разработках и реализациях новейших робототехнических систем с техническим зрением, которые обладают чертами роботов будущего. Так, в Центре научных исследований и разработок корпорации «Тошиба» (Япония) ведутся эксперименты с СТЗ робота, которая содержит стереопару установленных на руке телекамер, лазерный дальномер, быстродействующий видеопроцессор, процессор высокого уровня с развитым программным обеспечением и базой знаний и позволяет воспринимать, анализировать и «понимать» трехмерные сцены в рабочей среде робота. В промышленности уже используется сборочный робот «Adept-1» компании «Адепт Текнолоджи» (Adept Technology, США), который, помимо системы непосредственных приводов, обеспечивающих сверхвысокое быстродействие, развитого программного обеспечения, тактильных и силомоментных датчиков, снабжен СТЗ «Adept Vision», способной при обычном освещении распознавать даже соприкасающиеся и частично перекрывающиеся объекты (одновременно до четырех в поле зрения), как стационарные, так и перемещающиеся по конвейеру со скоростью до 0,3 м/с [76].

Появляются сообщения о реальных перспективах применений роботов с новейшими СТЗ не только в традиционных процессах промышленного производства, но и в непромышленной сфере. В сельском хозяйстве такие роботы будут полезны для оценки состояния посевов, прополки, уборки урожая [61, 63, 75]. Уже разработаны, например, робот-газонокосилка с локационными датчиками для обнаружения препятствий и с ПЗС-камерой для нахождения границы между скошенной и нескошенной травой, роботы для сбора апельсинов, яблок, томатов, которые обнаруживают плоды на фоне листвы и определяют степень их зрелости по спектру отраженного света.

В горном деле роботы с СТЗ нужны для оценки перспективности месторождений, расчистки штреков, крепежных работ [робот фирмы «Деннинг мобайл роботикс» (Denning Mobile Robotics, США), имеющий 24 дальнометрических сенсора, затягивает болты шахтных перекрытий]. В строительстве техническое зрение требуется роботам для контроля качества построек, окраски,

монтаж и наметки стройплощадок. Выше уже говорилось о перспективах применения роботов с СТЗ в *экстремальных средах* под водой, в космосе, на АЭС. Предпринимаются попытки создания роботов с техническим зрением для военных целей, полицейских функций, работ в зонах разрушений и стихийных бедствий.

В уже цитировавшемся прогнозе экспертов [74] утверждается, что в 2000 г. из 50 тыс. роботов, выпущенных в США, лишь 22 тыс. составят промышленные роботы, а остальные будут предназначены для *военных и бытовых* применений. Появятся роботы-продавцы, официанты, библиотекари, уборщики, гиды, тренеры. Роботизация затронет и *медицину* — профилактический и предварительный осмотр больных, массаж, обслуживание лежачих пациентов и инвалидов, ассистирование врачам. По аналогии с персональными ЭВМ становятся доступны «персональные роботы», способные производить уборку и другие работы по дому, охранять жилище, играть с детьми, разносить закуски гостям.

Таким образом, роботы по мере роста их функциональных возможностей (что в значительной степени связано с развитием СТЗ) неизбежно входят не только в трудовую деятельность, но и в повседневную жизнь человека. К этому необходимо подготовиться как в научно-техническом, так и в социально-психологическом плане, исходя из того, что в нашем обществе роботизация служит повышению благосостояния и улучшению условий труда и быта людей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
2. Афанасьев Е. И., Скобелев В. М. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
3. Большаков В. Д., Деймлих Ф., Голубев А. Н., Васильев В. П. Радио-геодезические измерения/Под ред. В. Д. Большакова. М.: Недра, 1985. 303 с.
4. Быков Р. Е., Гуревич С. Б. Анализ и обработка цветных и объемных изображений. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
5. Высокоточные угловые измерения/Д. А. Анникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин и др.; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
6. Вычислительная оптика: Справочник/М. М. Руснов, А. П. Грамматин, П. Д. Иванов и др.; Под ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 424 с.
7. Грейм И. А. Оптические дальномеры и высотомеры геометрического типа. М.: Недра, 1983. 320 с.
8. Данилов А. А. Сенсорные устройства автоматов контроля и сборки. Л.: Машиностроение, 1984. 162 с.
9. Жаботинский Ю. Д., Исаев Ю. В. Адаптивные промышленные роботы и их применение в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1985. 104 с.
10. Закаэнов Н. П. Прикладная геометрическая оптика. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.
11. Зотов В. Д. Полупроводниковые устройства восприятия оптической информации. М.: Энергия, 1976. 152 с.
12. Использование визуальной информации в задачах автоматической сборки/Д. Е. Охотимский, С. И. Гриняйло, С. С. Камынин//Роботизация сборочных процессов. М.: Наука, 1985.
13. Исследование характеристик дальномерной обзорно-информационной системы/В. А. Веселов, В. Г. Кузнецов, А. К. Платонов и др. Препр. ИПМ АН СССР, № 98. М.: 1983. 27 с.
14. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 175 с.
15. Келли Р. Б., Мартинш Э. А. Ш., Берк Дж. Р., Дессимос Ж.-Д. Три алгоритма технического зрения для задачи взятия деталей из бункеров/Пер. с англ. ТИИЭР. 1983. Т. 71. № 7. С. 23—44.
16. Коляска А. Ш., Лашко Е. Б., Модель Б. И., Саламандра Б. Л. Об одном регулярном методе получения признаков для идентификации плоских объектов//Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. 1982. № 4. С. 132—136.
17. Компьютеры на СБИС: В 2-х кн./Т. Мотоока, С. Томита, Х. Танака и др.; Пер. с япон. М.: Мир, 1988. Кн. 1. 392 с.; Кн. 2. 336 с.
18. Корреляционно-экстремальные видеосенсорные системы для роботов/Ю. А. Андреев, Н. Н. Белоглазов, А. М. Корников и др. Под ред. А. М. Корникова и В. П. Тарасенко. Томск: Изд-во Томск. государственного ун-та, 1986. 240 с.
19. Кругер Р. П., Томпсон У. Б. Технико-экономическая оценка применения машинного зрения в устройствах контроля качества и сборочных работах/Пер. с англ. ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 12. С. 5—21.

20. Крылов В. П., Славинский З. М. Совмещенные системы технического зрения — путь к развитию гибких автоматизированных производств//Проблемы создания гибких автоматизированных производств. М.: Наука, 1987. С. 177—180.
21. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой/Пер. с франц. М.: Мир, 1985. 285 с.
22. Кузьмин С. А. Алгоритм управляемого ввода и обработки сенсорной информации для манипуляционного робота//Детерминированные и стохастические системы управления. М.: Наука, 1984. С. 114—120.
23. Кузьмин С. А. Методы определения ориентации объектов в системах технического зрения//Измерения, контроль, автоматизация. 1986. Вып. 2 (58). С. 37—46.
24. Кузьмин С. А., Петров А. А. Алгоритмы классификации и определения параметров силуэтных изображений в системе технического зрения робота//Проблемы машинного видения в робототехнике. М.: ИПМ АН СССР, 1981. С. 140—151.
25. Левшин В. Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. М.: Машиностроение, 1978. 168 с.
26. Мамчев Г. В. Стереотелевизионные устройства отображения информации. М.: Радио и связь, 1983. 96 с.
27. Машинное зрение. Тематический выпуск/Пер. с англ. ТИИЭР. Т. 76. № 8. 1988.
28. Микропроцессоры/Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Высшая школа, 1986. Кн. 1. 494 с.; Кн. 2. 382 с.
29. Микроэлектронные фотоприемные устройства/М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников, О. В. Смолин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.
30. Мишкин С. И. Системы технического зрения для автоматизации машиностроительного производства//Обзор С-6-3. Технология металлообработки в автоматизированном производстве. М.: НИИМАШ, 1982. 88 с.
31. Мобильный робот для выполнения транспортных операций в автоматических производствах с высокими требованиями к чистоте окружающей среды//Мицубиси денко гихо. 1985. Т. 59. № 10. С. 700—704.
32. Моравец Х. П. Тележка Станфордского университета и ронер Университета Карнеги—Меллона. ТИИЭР. 1983. Т. 71. № 7. С. 112—128.
33. Никифоров Д. Д., Лифшиц М. Л. Телевизионные автоматы в сварке элементов атомной техники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 128 с.
34. Петров А. А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов (алгоритмы технического зрения роботов)//Техническая кибернетика (Итоги науки и техники ВИНТИ). М.: ВИНТИ. 1984. Вып. 17. С. 251—294.
35. Петров А. А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов: Ч. II. Алгоритмы формирования движений//Техническая кибернетика (Итоги науки и техники ВИНТИ). М.: ВИНТИ, 1985. Вып. 18. С. 241—284.
36. Пол Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М.: Наука, 1976. 104 с.
37. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1981. 136 с.
38. Принципы построения систем автоматизации проектирования прикладных систем восприятия внешнего мира роботов/В. И. Рыбак, А. И. Болдырев, В. С. Ланбин и др.//Математические и технические средства робототехники и распознавания образов. Киев: ИК АН УССР, 1981. С. 3—15.
39. Проблемы машинного видения в робототехнике/Под ред. Д. Е. Охочимского//М.: ИПМ АН СССР, 1981. 245 с.
40. Прэтт У. Цифровая обработка изображений/Пер. с англ. М.: Мир, 1981. Т. 1. 310 с.; Т. 2. 290 с.
41. Робототехника/Ю. Д. Андрианов, Э. П. Бобриков, В. Н. Гончаренко и др.; Под ред. Е. П. Попова и Е. И. Юревича. М.: Машиностроение, 1984. 288 с.
42. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. М.: Высшая школа, 1986 (в 9 кн.).

43. Розенфельд А. Распознавание изображений/Пер. с англ. ТИИЭР. 1981. Т. 69. № 5. С. 120—133.
44. Руцков М. В. Видеопроектор бинарных сигналов//Микропроцессорные средства и системы. 1987. № 2. С. 35—38.
45. СБИС для распознавания образов и обработки изображений/Пер. с англ.; Под ред. К. Фу. М.: Мир, 1988. 248 с.
46. Система технического зрения и адаптации промышленных роботов для работы с неориентированными деталями в гибких автоматизированных производствах/А. А. Петров, С. А. Кузьмин, В. Б. Тулепбаев и др.//Проблемы создания гибких автоматизированных производств. М.: Наука, 1987. С. 199—207.
47. Системы осязания и адаптивные промышленные роботы/В. Б. Брагин, Ю. Г. Войлов, Ю. Д. Жаботинский и др.; Под ред. Е. П. Попова, В. В. Ключева. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
48. Твердотельное телевидение: Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах/Л. И. Хромов, Н. В. Лебедев, А. К. Цыцулин и др.; Под ред. И. А. Росселевича. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
49. Техническое зрение роботов/Под ред. А. Пыс. М.: Машиностроение, 1987. 320 с.
50. Чернов В. Г. Устройства ввода-вывода аналоговой информации для цифровых систем сбора и обработки данных. М.: Машиностроение, 1988. 184 с.
51. Шульман М. Я. Фотоаппараты. Л.: Машиностроение, 1985. 142 с.
52. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
53. Якушенков Ю. Г., Колосов М. П., Луканцев В. Н. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.
54. Anderson R. L. Real-time gray-scale videoprocessing using a moment-generating chip//IEEE J. of Robotics and Automation. 1985, V. RA-1. N. 2. P. 79—85.
55. Bickel G., Häusler G., Maul M. Triangulation with expanded range of depth//Opt. Eng., 1985. V. 24. P. 975—977.
56. CEDEFOP. Robotics developments and future applications. Report of Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg. Austria. 1985.
57. Dickmann S. E., Zapp A. Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision//Prepr. 10-th World Congress on Automatic Control. Munich. FRG. 1987. IFAC. V. 4. P. 232—237.
58. Fischetti M. A. Robots do the dirty work//IEEE Spectrum. 1985. V. 22. N. 4. P. 65—72.
59. Furman A. B., Kanade T. Optical proximity sensor using multiple cones of light for measuring surface shape//Optical Eng. 1984. V. 23. N. 5. P. 546—553.
60. Gonzales R. C., Safabakhsh R. Computer vision techniques for industrial application and robot control//Computer. 1982. V. 15. N. 12. P. 17—32.
61. International Encyclopedia of Robotics. Application and Automation/R. C. Dorf Ed., N. Y., J. Wiley & Sons, 1988.
62. Jarvis R. A. Application-oriented robotic vision — a review//Robotica. 1984. N. 2. P. 3—15.
63. Kawamura N. et al. Fruit harvesting robot. Robotica//Robot, 1986. N. 51. P. 62—69.
64. Koch M., Kashyap R. A vision system to identify occluded industrial parts//IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. St. Louis. Missouri. 1985. P. 55—60.
65. Krotkov E., Fuma F., Summers J. An agile stereo camera systems for flexible image acquisition//IEEE Journ. of Robotics and Automation. 1988. V. 4. N. 1. P. 108—113.
66. Luh J. Y. S., Klaasen J. A. A three-dimensional vision by off shelf system with multi-cameras//IEEE Trans. 1985. V. PAMI-7. N. 1. P. 35—45.
67. Luo R. C., Lin M.-H., Sherr R. S. Dynamic multi-sensor data fusion system for intelligent robots//IEEE Journ. of Robotics and Automation. 1988. V. 4. N. 4. P. 386—396.

68. Muelenfeld E. Robot vision by a contour sensor with associative memory//Pattern Recognition. 1984. N. 1. P. 169—176.
69. Nayak N. et al. Conceptual development of an adaptive real-time seam tracker for welding automation//Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Raleigh. N. C. 1987. Washington. 1987. V. 2. P. 1019—1024.
70. Nitzan D. Development of intelligent robots: achievements and issues//IEEE J. of Robotics and Automation. 1985. V. RA-1. N. 1. P. 3—13.
71. O'Gorman F. Edge detection using Walsh functions//Artificial Intelligence. 1978. V. 10. N. 2. P. 215—223.
72. Petrov A. A., Kuz'min S. A. A flexible and user-friendly vision system for adaptive industrial robots//Prepr. of V IFAC/IFIP/IMACS/IFORS Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology. Suzdal. USSR. 1986. Moscow. 1986. P. 258—264.
73. Place H., Jullier M., Marce L. Qu'en est-il des robots mobiles?//Nouvel Automatisme. 1983. N. 35. P. 31—39.
74. Porter A. L., Rossini F. A. Robotics in the year 2000. Robotics Today. 1987. V. 9. N. 3. P. 27—28.
75. Rogers M. Robots find their place. Newsweek. 1988. V. 111. N. 13. P. 44—45.
76. Rooks B. Advancing sensor technology into industry//The Industrial Robot. 1985. V. 12. N. 1. P. 10—13.
77. Schlusel K. Robotics and artificial intelligence across Atlantic and Pacific//IEEE Trans. on Industrial Electronics. 1983. V. IE-30. N. 3. P. 244—251.
78. Shirai Y. Robot vision//Robotics. 1986. V. 2. N. 3. P. 175—203.
79. Sicard P., Levine M. An approach to an expert robot welding system//IEEE Trans. on systems, man and cybernetics. 1988. V. 18. N. 2. P. 204—222.
80. Strand T. C. Optical three-dimensional sensing for machine vision//Opt. Eng. 1985. V. 24. N. 1. P. 33—40.
81. Torgersen E., Paul F. W. Vision guided robotic fabric manipulation for apparel manufacturing//Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation. Raleigh. N. C. 1987. Washington. 1987. V. 2. P. 1196—1202.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| Предисловие . . . . .  | 3   |
| Глава 1. Структура и особенности систем технического зрения роботов . . . . .                            | 6   |
| 1.1. Основные функциональные задачи систем технического зрения в робототехнике . . . . .                 | 6   |
| 1.2. Использование видеoinформации в системах управления роботами . . . . .                              | 9   |
| 1.3. Специфические требования к техническому зрению адаптивных роботов . . . . .                         | 17  |
| 1.4. Обобщенные структуры и функциональные схемы систем технического зрения роботов . . . . .            | 23  |
| Глава 2. Принципы построения и алгоритмического обеспечения систем технического зрения роботов . . . . . | 30  |
| 2.1. Аппаратные, программные и аппаратно-программные средства зрительного оцувствления роботов . . . . . | 30  |
| 2.2. Алгоритмы формирования изображений в системах технического зрения роботов . . . . .                 | 35  |
| 2.3. Методы сегментации изображений в робототехнических задачах . . . . .                                | 49  |
| 2.4. Принципы описания и анализа изображений . . . . .   | 60  |
| 2.5. Сопряжение систем технического зрения с системами управления роботов . . . . .                      | 76  |
| Глава 3. Типовые элементы и узлы систем технического зрения роботов . . . . .                            | 83  |
| 3.1. Источники оптического излучения . . . . .   | 83  |
| 3.2. Приемники оптического излучения . . . . .   | 91  |
| 3.3. Оптические и оптико-механические узлы систем технического зрения . . . . .                          | 95  |
| 3.4. Основные узлы электронного тракта систем технического зрения роботов . . . . .                      | 110 |
| Глава 4. Оптико-электронные функциональные преобразователи . . . . .                                     | 126 |
| 4.1. Координатные аналоговые приемники излучения . . . . .   | 126 |
| 4.2. Многоэлементные твердотельные приемники излучения . . . . .   | 128 |
| 4.3. Мозаичные преобразователи . . . . .   | 132 |
| 4.4. Передающие телевизионные трубки и камеры . . . . .  | 137 |
| Глава 5. Аппаратные средства реализации типовых функций систем технического зрения . . . . .             | 143 |
| 5.1. Фотореле и фотосчетчики . . . . .   | 143 |
|  | 265 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2. Фотометрические преобразователи и спектроанализаторы   | 146        |
| 5.3. Специализированные видеопроцессоры   | 151        |
| 5.4. Фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых величин   | 159        |
| 5.5. Системы автоматического наведения и фокусировки  | 165        |
| 5.6. Оптические трехмерные преобразователи систем технического зрения   | 168        |
| 5.7. Устройства для определения ориентации объектов   | 178        |
| 5.8. Корреляционно-экстремальные системы технического зрения  | 182        |
| <b>Глава 6. Основы расчета систем технического зрения</b>   | <b>190</b> |
| 6.1. Энергетические (светотехнические) расчеты  | 190        |
| 6.2. Методы предварительного выбора и расчета некоторых важнейших параметров и характеристик источников и приемников излучения        | 198        |
| 6.3. Выбор и расчет типовых оптических и оптико-механических узлов  | 204        |
| 6.4. Выбор структуры системы технического зрения  | 213        |
| 6.5. Определение объема видеoinформации, перерабатываемой системой технического зрения  | 218        |
| 6.6. Расчет емкости памяти вычислительных средств системы технического зрения   | 221        |
| 6.7. Расчет требуемого быстродействия вычислительной системы  | 224        |
| 6.8. Выбор структуры вычислительных средств системы технического зрения   | 227        |
| <b>Глава 7. Типичные применения технического зрения в робототехнике</b>   | <b>229</b> |
| 7.1. Использование систем технического зрения при роботизации вспомогательных производственных операций и контроля качества продукции | 229        |
| 7.2. Сварочные, окрасочные, сборочные промышленные роботы с системами технического зрения   | 238        |
| 7.3. Зрительное оцувствление мобильных роботов  | 249        |
| 7.4. Перспективы применения технического зрения в робототехнике   | 256        |
| Список литературы   | 261        |

#### ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

*Мошкин Владимир Иванович,  
Петров Андрей Александрович,  
Титов Виталий Семенович,  
Якушенков Юрий Григорьевич*

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ РОБОТОВ

Редактор Т. В. Абизова  
Переплет художника В. С. Голубева  
Художественный редактор А. С. Вершинкин  
Технический редактор Н. Н. Скотникова  
Корректор И. М. Борейша

ИБ № 5210

Сдано в набор 25.04.89. Подписано в печать 03.08.89. Т- 08121  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,0. Усл. кр.-отт. 17,0. Уч.-изд. л. 18,43. Тираж 9200 экз. Заказ 764. Цена 1 р. 20 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машинно-строение», 107076, Москва, Стромшинский пер., 4

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машинностроение» при Государственном комитете СССР по печати.  
193144, г. Ленинград, ул. Монсеенко, 10.