

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е. И. Юревич

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2013

ББК 32.816я73
Ю68

Ю р е в и ч Е. И. **Сенсорные системы в робототехнике** : учеб. пособие /
Е. И. Юревич. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 100 с.

Рассмотрены сенсорные системы в живой природе и человека, затем и это основное содержание — сенсорные системы робототехники. Особое внимание уделено системам технического зрения и силомоментного оцувствления, имеющим важнейшие значения в робототехнических системах. Приведены примеры сенсорных систем и их применений в основном из разработок ЦНИИ РТК.

Пособие рассчитано прежде всего на студентов кафедр при ЦНИИ РТК.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Юревич Е. И., 2013

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2013

ISBN 978-5-7422-3774-7

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
<i>Глава первая. Сенсорные системы в живом мире</i>	18
1.1. Развитие сенсорных систем в природе	18
1.2. Органы чувств человека.....	24
<i>Глава вторая. Сенсорные системы, определяющие геометрические и другие параметры внешней среды</i>	34
2.1. Дальномеры и локаторы	34
2.2. Сенсорные системы, определяющие положение в про- странстве	39
2.3. Специальные сенсорные системы	42
2.4. Сенсорное обеспечение построения моделей внешней среды, управления, навигации и безопасности движения ..	47
<i>Глава третья. Системы технического зрения</i>	49
3.1. Назначение и состав систем технического зрения.....	49
3.2. Датчики и аппаратура обработки видеоизображений.....	60
3.3. Бинокулярные и многоакурсные системы технического зрения.....	64
3.4. Алгоритмы систем технического зрения	70
3.5. Примеры применения систем технического зрения.....	74
<i>Глава четвертая. Системы силомоментного оцувствления роботов</i>	77
4.1. Задачи силомоментного оцувствления	77
4.2. Способы и средства силового оцувствления	79
4.3. Силовое оцувствление систем управления роботов.....	87
<i>Глава пятая. Многосенсорные системы</i>	89
5.1. Особенности использования и обработки сенсорной информации в много-сенсорных системах	89
5.2. Комплексирование сенсорных систем	92
Заключение	99
Литература.....	100

ПРЕДИСЛОВИЕ

Это учебное пособие к дисциплине “Информационно-измерительные системы” по направлению “Мехатроника и робототехника”. Пособие ориентировано на студентов, обучающихся в СПбГПУ на кафедрах при ЦНИИ РТК, и проиллюстрировано в основном примерами разработок ЦНИИ РТК.

ВВЕДЕНИЕ

Сенсорные системы роботов составляют основную часть их информационно-измерительных систем, назначение которых формировать и выдавать информацию о состоянии объектов и процессах в окружающей среде и о самом роботе, для функционирования которого эта информация требуется. На рис. В.1 показана обобщенная функциональная схема информационно-измерительных систем.

Чувствительное устройство или датчик — это первичный преобразователь, который реагирует на подлежащую выявлению величину (температура, давление, перемещение, сила тока и т. д.) и преобразует ее в другую величину, удобную для дальнейшего использования, выдавая сигнал о ее наличии и интенсивности. Этот сигнал может быть любой физической природы, определяемой принципом действия чувствительного устройства. Предпочтительно, чтобы он был электрическим, т. к. подавляющее большинство технических систем, в которых он будет использоваться, — электрические. Однако существуют и системы другой природы, например, полностью пневматические, предназначенные для работы в условиях, не допускающих электричества. В этих случаях приходится использовать сигналы другой природы.

Второе звено на рис. В.1 усилитель-преобразователь осуществляет усиление первичного сигнала, выдаваемого чувствительным устройством, и преобразование его в наиболее удобную форму для дальнейшего использования. Например, сигнал в виде напряжения постоянного тока часто преобразуется в частоту переменного тока, что резко повышает устойчивость к помехам. Предпочтительнее всего, конечно, преобразование непрерывного сигнала в цифровой с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

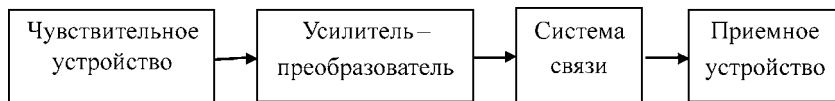


Рис. В.1. Функциональная схема информационно-измерительной системы

Последним возможным этапом преобразования исходного сигнала является его измерение, т. е. количественная оценка его величины путем сравнения с некоторым эталоном и выражения этой величины в единицах, определяемых этим эталоном.

Это общая для всех информационно-измерительных систем часть унифицирована и стандартизирована. Она состоит из двух приборов: электронного ядра системы (крейта) и интерфейсов, связующих его с датчиками, которых в общем случае может быть несколько.

Следующее звено — система связи присутствует только в информационно-измерительных системах, в которых требуется передавать информацию на такие большие расстояния и в таких условиях, когда для этого требуется специальная система такой передачи с преобразованием исходной информации в вид, необходимый для ее осуществления. Используются все существующие каналы связи — телефонные, радио, оптоволоконные, спутниковые и др. Такие информационно-измерительные системы называются телеизмерительными.

Если расстояние от усилителя-преобразователя до приемного устройства невелико — десятки метров, передача информации может осуществляться без ее преобразования. Такие системы называются дистанционными.

При отсутствии необходимости удаления приемного устройства от остальной части системы она вся конструктивно может выполняться в виде одного прибора.

Приемное устройство в зависимости от назначения системы может служить для передачи получаемой информации в какую-нибудь техническую систему управления, контроля и т. д., на пульт человека-оператора с соответствующей визуализацией, просто в запоминающее устройство или для нескольких таких целей.

Представленная на рис. В.1 информационно-измерительная система в общем случае, как выше отмечено, может включать несколько чувствительных устройств — датчиков и тогда все последующие ее звенья будут многоканальными, а сама выявляемая величина — вектором. Общим случаем таких многоканальных систем являются распределенные системы, в которых датчики пространственно разнесены, в том числе, возможно, и по разным объектам. В таких многоканальных системах возникают специфические задачи согласования форм представления сигналов от разных датчиков и их синхронизация для возможности совместного использования.

С развитием компьютерных сетей они стали широко использоваться в качестве таких многоканальных распределенных систем связи и в целом как сетевые информационные и управляющие системы, в частности в виде мультиагентных систем. Передача информации осуществляется в них по стандартным протоколам.

Из компонентов информационно-измерительных систем, представленных на рис. В.1, оригинальными являются только датчики. Остальные компоненты имеют более широкое применение в различных видах техники и заимствованы из них. Поэтому рассмотрим подробнее именно датчики.

Основной характеризующий их признак — это выявляемая величина. Созданы и производятся датчики всех величин, которые используются в современных технических системах: механические величины (перемещение, усилие, скорость, ускорение), электрические (напряжение, ток, частота, фаза, мощность), тепловые, оптические, акустические, магнитные и т. д. Когда создаются принципиально новые системы, использующие новые переменные величины, создание таких систем начинается с разработки соответствующих новых датчиков. Последние примеры: датчики геометрических наноразмеров, необходимые при создании нанотехнологий, химические датчики, имитирующие вкусовые и обонятельные органы чувств живых существ, которые потребовались при создании соответствующих новых информационно-измерительных систем.

Вторая важная классификация датчиков выполняется по принципу действия, т. е. по принципу преобразования интересующих нас величин в пригодную для последующего использования, чаще

всего, как выше отмечено, в электрическую величину. Поэтому признаку различают датчики тензометрические, пьезоэлектрические, емкостные, индуктивные, гальваноманнитные (на эффекте Холла), термопары и др. [1].

Наконец, важно отметить, что наряду с получением информации об искомой величине непосредственно путем прямого ее преобразования с помощью датчиков, примеры которых приведены выше, существует способ косвенного определения этих величин путем вычисления по измеряемым значениям других величин, функционально связанных с искомой величиной математической зависимостью. Такие устройства называются наблюдателями. Например, усилие, развиваемое электрическим двигателем, можно вместо датчика момента определять по формуле, выражающей этот момент через входные переменные — напряжение и ток питания. Этот способ особенно важен для величин, которые физически невозможно непосредственно воспринимать. Кроме того, он полезен и в тех случаях, когда имеет преимущество перед датчиками, например, по диапазону выявляемой величины, стоимости, надежности.

Общая стандартная характеристика датчиков — это статическая и динамическая зависимости выход(выход). Статическая характеристика в предельно простом варианте релейная, как например, у датчиков механического касания, задымления и т. п. В общем случае от статической характеристики требуется линейность, описываемая коэффициентом передачи и соответствующим диапазоном входной величины. Минимальные значения воспринимаемой датчиком входной величины определяет его чувствительность.

Динамическая зависимость обычно описывается частотными характеристиками для линейного участка статической характеристики и переходными характеристиками, а так же значением чистого временного запаздывания, если оно имеется.

Другие показатели, которые могут быть важны для конкретных применений датчиков, — это габариты и масса, энергопотребление, надежность и ресурс, стоимость.

Рассмотрим подробнее из приведенной выше общей классификации датчиков датчики механических величин, которые полу-

чили наибольшее распространение в робототехнике: датчики перемещения, скорости и ускорения, а также силы и давления. Более специфические датчики других типов будут рассмотрены в основном содержании книги.

Датчики перемещения существуют линейные и угловые. Они различаются по диапазону (интервалу) перемещения и классу точности. Например, по отечественному ГОСТ датчики угловых перемещений в диапазоне 360° имеют шесть классов точности от 50" для датчиков I класса до 1" для VI класса. Для этих датчиков важным показателем является так же погрешность от нелинейности, которая у современных датчиков лежит в пределах от 0,01% до 5%, и разрешающая способность, которая не более 10 мкм.

По принципу действия эти датчики делятся на резистивные, электромагнитные, фотоэлектрические и емкостные.

Резистивные (потенциметрические) датчики перемещения представляют собой потенциометр с движком, перемещение которого и является первичной выявляемой величиной, которая преобразуется в сопротивление. Величина последнего преобразуется затем в выходное напряжение постоянного или переменного тока в схеме делителя напряжения и с помощью мостовой схемы.

Резистивные датчики просты, дают высокий уровень выходного сигнала, малы по габаритам и обладают радиационной стойкостью.

Электромагнитные датчики перемещения бывают двух типов — индуктивные и трансформаторные.

В индуктивных датчиках выявляемое перемещение преобразуется в изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи катушки индуктивности. Последнее осуществляется путем либо изменения воздушного зазора в магнитной цепи с помощью подвижного якоря, либо перемещения сердечника внутри катушки. Датчики первого типа служат для выявления малых перемещений 0,1–1,0 мм, а второго — больших до 100 мм. Недостатком таких датчиков является наличие значительной электромагнитной силы, действующей на подвижную часть датчика. Для снижения этой силы основное применение получили дифференциальные индуктивные датчики, собранные по мостовой

схеме, где указанные силы от двух катушек взаимно уравниваются.

Величина погрешности современных индуктивных датчиков перемещения составляет от 0,5% до 2%.

Трансформаторные датчики перемещения преобразуют выявляемую величину в изменение коэффициента взаимной индукции. Такой датчик подобен индуктивному датчику, собранному по дифференциальной схеме, с добавлением вторичных обмоток, с которых снимается выходной сигнал.

На рис. В.2 показаны схемы дифференциального индуктивного датчика с подвижным ярком (а) и трансформаторного датчика (б).

К электромагнитным датчикам перемещения относятся синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы), индуктосины, редуктосины и т. п. датчики в виде специальных электрических машин. Это электрические машины, используемые в режиме генератора как датчики угла поворота. При повороте ротора такой машины Э.Д.С., генерируемая в его обмотках под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, сдвигается по фазе на тот же угол. Это является мерой

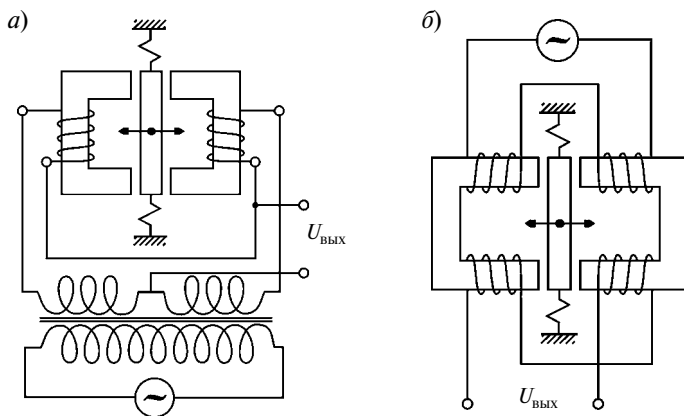


Рис. В.2. Схемы дифференциального индуктивного (а) и трансформаторного (б) датчиков перемещения

угла поворота ротора и в результате последующего преобразования дает напряжение постоянного тока, пропорциональное углу поворота ротора [2]. Основные достоинства этих датчиков как и всех электромагнитных датчиков — значительная мощность выходного сигнала, а так же гальваническая развязка от сети питания, что часто бывает важно.

Фотоэлектрические (оптические) датчики — это самые точные датчики перемещения, в которых перемещения контролируются с помощью луча света. Принцип действия этих датчиков заключается в размещении на контролируемом подвижном объекте экрана с системой отверстий, через которые проходит свет от некоторого источника и регистрируется с другой стороны фотоприемниками. При перемещении экрана изменяются условия их освещения, что и является мерой перемещения. В простейшем варианте такого датчика угловых перемещений в качестве экрана используется диск с равномерно расположенными прорезями. При повороте диска фотоприемник регистрирует число световых импульсов, которое пропорционально углу поворота. Это импульсный датчик, преобразующий угол поворота в унитарный код. Значительно большую точность обеспечивают кодовые оптические датчики, преобразующие угол поворота в цифровой код. Для этого на диске делается несколько дорожек со щелями. Каждая дорожка определяет разряд двоичного кода выходного сигнала (их может быть до 20): освещение фотоприемника на определенной дорожке соответствует двоичной единице, а его отсутствия — нулю. Для повышения надежности считывания вместо прямого двоичного кода часто используются коды с избыточностью типа кода Грея. В этом случае ошибка считывания не превышает младшего значащего разряда независимо от того, в каком разряде она произошла.

В датчиках линейного перемещения этого типа вместо диска используется линейки с такими же щелями и дорожками.

Существует много различных конструкций подобных оптических датчиков перемещения, в том числе двущкальные системы грубого и точного отсчета, системы с растровой интерполяцией, со штриховым кодом и др. [2]. Разрешающая способность

таких прецизионных угловых датчиков до десятых долей секунды.

Емкостные (электростатические) датчики перемещения преобразуют выявляемое перемещение в величину емкости конденсатора путем изменения расстояния между обкладками (электродами) конденсатора. Существуют такие датчики, в которых изменяется активная площадь пластин конденсатора, например, путем поворота одной пластины относительно другой. Основное применение емкостных датчиков — это измерение малых перемещений, в том числе в датчиках давления и ускорения.

Датчики перемещения на основе эффекта Холла (датчики Холла). Собственно эффект Холла заключается в воздействии магнитного поля на электрический ток. Если к пластине или пленке, по которой идет ток, приложить перпендикулярно ей магнитное поле, между боковыми краями пластины возникнет разность потенциалов. Таким образом непосредственно эффект Холла позволяет создавать датчики магнитной индукции, но он получил распространение и для создания датчиков перемещения пластины с током относительно магнита. В качестве материала пластины используются полупроводники GaAs, InAs, InSb и др. Погрешность серийно выпускаемых датчиков Холла — 0,5–1,0%.

Рассмотренные датчики малых перемещений используются так же и как датчики деформаций, а через них давлений и усилий. Последнее их применение будет рассмотрено в основном содержании книги.

Датчики скорости. Величину скорости линейного и углового перемещения можно получить дифференцированием сигнала от рассмотренных выше датчиков перемещения. Однако более точное значение скорости дают датчики непосредственно чувствующие скорость. Основными типами таких датчиков являются тахогенераторы и дискретные датчики, преобразующие скорость в частоту импульсов.

Тахогенераторы — это генераторы постоянного или переменного тока. Тахогенераторы постоянного тока могут иметь минимальную погрешность $\sim 0,2\%$, но они дороже тахогенераторов

переменного тока и менее надежны в связи с наличием щеточно-коллекторного узла.

Дискретные датчики скорости вращения осуществляют счет числа оборотов в секунду с последующим преобразованием в код с помощью АЦП. Простейший вариант такого датчика содержит диск с прорезями и с одной его стороны источник света, а с другой фотоприемник в виде фотодиода или фототранзистора. Возможен вариант с использованием света, отраженного от освещенного вала с нанесенными на нем полосками. Существуют и другие типы дискретных датчиков, в которых импульсы от вращающегося вала формируются не оптически, а с помощью магнитов и т. п.

Датчики ускорения — акселерометры. В этих датчиках ускорение выявляется через силу инерции некоторой известной по величине массы

$$F = m\ddot{x},$$

где — \ddot{x} искомое ускорение.

Масса крепится на упругом элементе, например, на пружине или на конце гибкой консоли. Деформация этого элемента, пропорциональная силе инерции, выявляется датчиком силы. В основном нашли применение тензорезистивные и пьезоэлектрические такие датчики.

Тензорезистивные датчики основаны на изменении сопротивления проводников или полупроводников при деформации и последующего преобразования его в электрический сигнал подобно тому, как это делается в резистивных датчиках перемещения. Такие датчики ускорения имеют линейные размеры ~ 10 мм, массу — единицы грамм и погрешность менее 1%.

Пьезоэлектрические датчики ускорения основаны на прямом пьезоэффекте, которым обладают некоторые материалы (сегнетова соль, кварц, турмалин и пьезокерамика — титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.). Он заключается в возникновении электрического потенциала на их поверхности при деформации. Погрешность лучших таких датчиков — 0,2–0,5%. На рис. В.3 показано устройство пьезоэлектрического датчика ускорения.

Помимо датчиков ускорения указанные датчики применяются как датчики собственно силы в диапазоне от долей грамма до де-

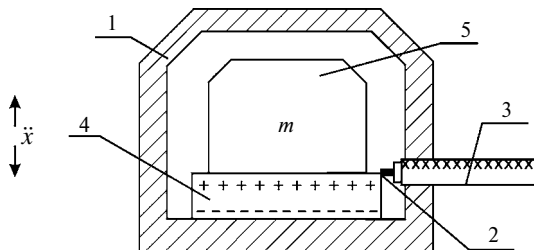


Рис. В.3. Пьезоэлектрический датчик ускорения:

1 — корпус; 2 — центральный проводник коаксиального выходного кабеля; 3 — внешняя оболочка, соединенная с корпусом; 4 — пьезоэлемент; 5 — масса

сятков тонн и в качестве датчиков давления жидкости и газа, которое преобразуется в силу обычно с помощью мембран. Погрешность этих датчиков — десятые и сотые доли процента. Датчики силы будут рассмотрены в главе четвертой.

В робототехнике и в некоторых других видах техники из информационно-измерительных систем в особую группу выделяют системы, выдающие аналогично органам чувств живых существ информацию об окружающей внешней среде. Они называются **сенсорными системами**, а их датчики соответственно **сенсорами**. Настоящая книга посвящена именно сенсорным системам.

По выявляемым свойствам и параметрам сенсорные системы роботов можно разделить на следующие группы:

- 1) системы, дающие общую картину окружающей среды с последующим выделением ее отдельных объектов;
- 2) системы, определяющие различные физико-химические свойства внешней среды и ее конкретных объектов;
- 3) системы, определяющие координаты местоположения робота и параметры его движения, включая координаты относительно объектов внешней среды.

К сенсорным системам первой группы относятся системы технического зрения и различного типа локаторы. Вторая группа сенсорных систем наиболее многообразна: измерители геометри-

ческих параметров, плотности, температуры, оптических свойств, химического состава и т. д. Третья группа определяет параметры, относящиеся к самому роботу: его географические координаты в пространстве от спутниковых систем до использующих магнитное поле Земли, измерители угловых координат, перемещения и скорости, в том числе и относительно отдельных объектов внешней среды вплоть до фиксации соприкосновения с ними.

В составе роботов все эти сенсорные системы служат прежде всего для обслуживания двух исполнительных систем — манипуляционной и передвижения. Это и определяет основные требования к сенсорным системам — дальность действия, точность, быстродействие и т. д.

Сенсорные системы, обслуживающие манипуляторы, образуют две группы: системы, входящие в контур управления движением манипулятора, и системы очувствления его рабочего органа. В число последних систем, в частности, часто входят размещенные у рабочего органа манипулятора системы технического зрения и датчики усилий.

Сенсорные системы, используемые в системах передвижения робота, подразделяются на системы, обеспечивающие навигацию в пространстве, и системы, обеспечивающие безопасность движения (предотвращения столкновений с препятствиями, опрокидывания на уклонах, попадания в недопустимые для робота внешние условия и т. п.).

Важным параметром сенсорных систем является дальность действия. По этому показателю сенсорные системы роботов можно разделить на контактные, ближнего, дальнего и сверхдальнего действия.

Контактные сенсорные системы применяются для очувствления рабочих органов манипуляторов и корпусов (бамперов) мобильных роботов. Они позволяют фиксировать контакт с объектами внешней среды (тактильные сенсоры), измерять усилия, возникающие в месте этого контакта (силовые сенсоры), определять проскальзывание объектов при их удержании захватным устройством манипулятора. Контактным сенсорным системам свойственна простота, но они накладывают существенные ограни-

чения на динамику и прежде всего на быстродействие управления роботом.

Тактильные сенсоры помимо получения информации о контакте могут применяться и для определения размеров и формы объектов путем их ощупывания. Важным требованием, предъявляемым к этим устройствам, является высокая чувствительность (срабатывание при усилии в единицы грамм), малые габариты, механическая прочность и надежность.

Сенсорные системы ближнего действия обеспечивают информацией об объектах, расположенных в непосредственной близости от рабочего органа манипулятора или корпуса робота, т. е. на расстояниях, соизмеримых с их размерами. К таким системам относятся оптические локаторы и дальномеры, дистанционные измерители плотности грунта и т. п. Такие бесконтактные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задания с большой скоростью, заранее выдавая информацию о различных объектах и средах до соприкосновения с ними.

Сенсорные системы дальнего действия служат для получения информации о внешней среде в объеме всей рабочей зоны манипуляторов робота и окружающей среды мобильного робота.

Сенсорные системы сверхдальнего действия применяются главным образом в мобильных роботах. К ним относятся различные навигационные системы, локаторы и другие сенсорные системы соответствующей дальности действия. Эти устройства находят применение и в стационарных роботах при работе с подвижными объектами, чтобы заранее предвидеть их появление в рабочей зоне.

Сенсорные системы дальнего и сверхдальнего действия могут размещаться как на роботе, так и вне его (для получения информации со стороны).

В бесконтактных сенсорных системах для получения требуемой информации используются излучаемые ими специальные сигналы (оптические, радиотехнические, ультразвуковые и т. д.) и естественные излучения среды и ее объектов. В зависимости от этого различают активные и пассивные сенсорные системы. Активные сенсорные системы имеют передатчик, излучающий первичный сигнал, и приемник, регистрирующий прошедший через среду

прямой сигнал или вторичный сигнал, отраженный от объектов среды или сгенерированный ими под воздействием первичного сигнала. Пассивные системы имеют только приемное устройство, а роль излучателя играют сами объекты внешней среды. Поэтому пассивные сенсорные системы обычно проще и дешевле активных, но менее универсальны. Для некоторых применений важна также скрытность действия пассивных систем.

Заметим, что все органы чувств человека являются пассивными. Однако у некоторых животных, у которых такого типа системы и прежде всего зрение не обеспечивают их необходимой информацией, существуют и активные сенсорные системы (летучие мыши, дельфины).

Для оцувствления роботов наиболее широкое применение получили системы технического зрения, локационные, силомоментные и тактильные системы. Самыми универсальными из них являются системы технического зрения.

Требования, предъявляемые к сенсорным системам, существенно зависят от того уровня системы управления, на котором используется их информация. В частности, наибольшее быстродействие должны иметь сенсорные системы, используемые на уровнях управления, функционирующих в реальном времени, с неизбежным при этом упрощением этой информации. Наоборот, на стратегическом уровне управления поведением робота требуется наиболее полная информация в ущерб, возможно, быстродействию.

Глава первая

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В ЖИВОМ МИРЕ

1.1. Развитие сенсорных систем в природе

Одна из главных особенностей живых организмов — это чувствительность к внешней среде, ощущение ее структуры, отдельных физических и химических свойств и параметров. Эта способность возникла еще у одноклеточных. Существует она и у растений. Они реагируют на температуру, свет, состояние грунта. Многие растения сворачивают листья и цветы при неблагоприятных внешних условиях, поворачиваются в сторону света. Существуют плотоядные растения, захватывающие живых существ и питающиеся ими.

Сенсорные системы живых организмов предназначены для получения информации о внешнем мире и своевременного реагирования на происходящие в нем изменения. У первых многоклеточных губок и червей возникли специализированные рецепторные клетки, реагирующие на определенные внешние раздражения (механические, химические, температурные и др.) и передающие сигналы о них другим клеткам. Вначале эти сигналы передавались химическим путем, а затем с помощью электрических импульсов. Это позволило повысить быстродействие первых простейших рефлекторных движений. Сначала эти сигналы, как до этого химические сигналы, были ненаправленными, диффузно распространяясь по всему телу. Затем постепенно оформились определенные пути для этих сигналов и появились соответствующие специальные нервные клетки, образовавшие нервную систему. Рецепторные клетки со временем объединились в органы чувств. Основные чувства — зрение, слух, обоняние, осязание, вкус. Сформировалась голова со ртом. В голове возник головной мозг и память.

В результате живые организмы научились все более совершенно обрабатывать информацию от органов чувств, сопоставлять ее с ранее приобретенным опытом и все более адекватно реагировать на текущую ситуацию во внешнем мире.

В зависимости от условий обитания у разных живых существ органы чувств развились по-разному. У птиц особенно совершенным стало зрение. А у кротов и рыб, живущих в подземных водоемах, зрение полностью атрофировалось. У лесных обитателей обострилось обоняние, особенно у ведущих ночной образ жизни. У летучих мышей, дельфинов и у некоторых наземных млекопитающих (землеройки и др.) возникли ультразвуковые дальномерные системы. В отличие от всех других органов чувств, которые являются пассивными, т. е. воспринимают воздействия, оказываемые внешней средой, это активные системы, действующие на среду ультразвуком и улавливающие его отражения. В этих системах используется частотная модуляция. Летучие мыши излучают в течение 40–100 мс ультразвуковой сигнал постоянной частоты 70–80 кГц. Локационные сигналы дельфинов имеют длительность 0,04–0,1 мс в диапазоне 30–150 кГц. Наземные животные используют импульсы длительностью 0,1–3,5 мс с частотой ~ 20 кГц.

Перелетные птицы и некоторые морские обитатели научились ориентироваться в пространстве по магнитному полю Земли, за тысячи километров находя нужное им место.

В целом в живой природе существуют организмы, отдельные органы чувств которых намного превосходят органы чувств человека или вообще отсутствуют у него. Рассмотрим их последовательно.

Зрение — один из важнейших органов чувств живых существ. В процессе развития жизни впервые чувствительность к свету появилась еще у одноклеточных организмов с помощью светочувствительного пигмента. У млекопитающих, в частности у некоторых насекомых и медуз, появились уже многоклеточные органы из светочувствительных клеток. Затем вначале у некоторых головоногих моллюсков возникли примитивные глаза, по типу которых были созданы первые фотоаппараты (камера обскура), в которых относительно четкое изображение на светочувствительном поле получалось при прохождении света через маленькое отверстие без

всякой оптики. Первая “оптика” сформировалась у некоторых видов червей в виде заполненной прозрачным веществом глазной ямки, выполняющей функции двояковыпуклой линзы, на дне которой находятся светочувствительные клетки, И, наконец, появился хрусталик как полноценная линза.

В ходе эволюции зрения возник еще другой тип зрительной системы, отличный от существующей у человека и подавляющего большинства животных — это фасеточное зрение у насекомых и ракообразных. Здесь вместо одной оптической системы, направляющей свет на сетчатку, составленную из множества светочувствительных клеток, имеется множество (до десятков тысяч) фасетных глазков со своими хрусталиками. Каждый из них улавливает свет в узком секторе в несколько градусов, а в целом такие фасеточные глаза имеют очень широкое поле зрения.

Цветное зрение возникло у предков первых млекопитающих еще в эпоху динозавров в виде сочетания четырех цветов — красный, зеленый, синий и ультрафиолетовый, которые соответствуют электромагнитному излучению с длиной волны примерно от 600 нм до 400 нм (частоты 100–200 МГц). Такие глаза снабжены рецепторами (колбочки), содержащими пигменты максимально чувствительные к электромагнитному излучению соответствующей длины волны.

В результате последующей эволюции в течение многих десятков миллионов лет, когда многократно менялись условия существования, к настоящему времени исходное четырехцветное зрение, включая ультрафиолетовое, сохранилось только у предков рептилий — ящериц, черепах, у птиц и некоторых насекомых — пчел и муравьев. Приматы и человек получили трехцветное зрение, а большинство млекопитающих — двухцветное. (Например, утверждение, что быки не любят красный цвет ошибочно, т. к. они вообще его не различают). Вместе с тем змеи, тараканы и некоторые другие животные приобрели способность видеть в инфракрасном цвете, чтобы обнаруживать теплокровных живых существ.

Слух — это второй по значению в живом мире орган чувств. Слуховой аппарат у животных и у человека включает два уха и слуховой центр в головном мозгу. Этот орган воспринимает звуки и определяет их громкость, тон, тембр, а так же направление на

возможный их источник. Последнее определяется путем сравнения громкости звука, воспринимаемого каждым ухом. Тон звука определяется его высотой, т. е. частотой колебаний, а тембр — спектром гармоник — их числом и интенсивностью.

Внешняя часть уха — наружное ухо — это ушная раковина с несколькими рудиментарными мышцами, которая кончается слуховым проходом с барабанной перепонкой. Последняя служит для восприятия звуков. За барабанной перепонкой начинается среднее ухо. Оно сообщается с носоглоткой через евстахиеву трубу, которая открывается при глотательных движениях, пропуская воздух из носоглотки и тем самым поддерживая атмосферное давление за барабанной перепонкой в так называемой барабанной полости.

В среднем ухе находится механизм, состоящий из трех подвижных слуховых косточек — молоточка, наковальни и стремени, который передает колебания барабанной перепонки во внутреннее ухо. Молоточек скреплен с барабанной перепонкой и через наковальню как промежуточное звено и стремя ее деформация передается жидкости, заполняющей внутреннее ухо — улитку. Это спирально закрученный костный канал в пять витков у животных и 2,5 витка у человека. Звуковые колебания этой жидкости воспринимаются базилярной мембраной с расположенными на ней звуковыми волосковыми рецепторами — кортиевым органом, который состоит из ~ 20 тысяч слуховых струн разной длины. Звуки в зависимости от частоты воспринимаются различными частями базилярной мембраны и соответственно разными рецепторами. Их деформация преобразуется в электрические сигналы. В результате исходный звуковой сигнал разлагается на частотные компоненты, которые по различным нервным волокнам слухового нерва поступают в слуховой центр головного мозга.

Орган слуха человека воспринимает звуковые колебания в диапазоне в среднем от ~ 20 Гц до 20 кГц. В детстве этот диапазон максимален и может достигать до 40 кГц, а с годами постепенно сужается. Чувствительность слуха по громкости, измеряемая в децибелах (дБ), максимальна на частотах 1–3 кГц и падает к частоте 100 Гц примерно в 1000 раз и так же в сторону верхних частот.

Инерционность слуховой системы определяется чистым временным запаздыванием равным ~ 150 мс. Время установления слухового сигнала зависит от частоты, снижаясь с ее увеличением, примерно от 1 с до 0,5 с.

Важнейшее назначение слуха у человека — это общение с помощью речи, являющееся основным средством, определившим формирование современного человека.

Обоняние — это одно из древнейших чувств запаха. Уже все подвижные одноклеточные обладают способностью перемещаться к источникам пищи и удаляться от опасных веществ, улавливая их отдельные молекулы. Для многих животных обоняние не менее важно, чем зрение и слух.

Животные ощущают запахи во время вдоха воздуха (нюхают). В полости носа находится обонятельный эпителий, содержащий миллионы рецепторных клеток — обонятельных нейронов. Каждый такой рецептор распознает множество пахучих молекул. Аксоны этих нейронов образуют обонятельный нерв, который проходит в головной мозг к обонятельной луковице, осуществляющей первичную обработку информации о запахах. От нее эта информация поступает в обонятельный участок головного мозга, где в результате многоуровневой обработки формируется осознанное представление об источнике и характеристике запаха. Конечным местом обработки информации о запахах у человека является лимбическая система, формирующая реакцию организма, в том числе двигательную, для лучшего распознавания запаха и его источника.

Между химическим составом вещества и его запахом нет однозначной зависимости и разные вещества могут иметь одинаковый запах. Существует так же свойство маскировки одного запаха другим. А смесь некоторых сильно пахнущих запахов может вообще не ощущаться.

Человек, в частности, имеет около 10^7 обонятельных рецепторов и различает тысячи различных запахов, которые делятся на классы: цветочный, гнилостный, едкий, эфирный, мускатный, камфорный.

Важная особенность обоняния — использование этого органа чувств для обмена информацией, т. е. для коммуникаций между

различными организмами. Такая химическая сигнализация — семиохимия существует начиная с бактерий и растений и включая насекомых, рыбами, животными и людьми. Осуществляется она путем выделения определенных химических веществ (у человека это в основном через пот) — феромонов и восприятия их органами обоняния. Основное назначение этой сигнализации — привлечение самками самцов, предупреждение об опасности, чувство страха, радости, сбор в группу для совместных действий и т. п.

Чувство вкуса организовано аналогично обонянию, хотя рецепторов вкуса, например, у человека значительно меньше. Нескольких тысяч химических рецепторов вкуса — вкусовых лукович расположено у высших животных на поверхности языка, а так же на небе, в глотке и гортани. Они реагируют на четыре основных вкуса — сладкий, соленый, кислый и горький. Рецепторы сладкого расположены в основном на передней части языка, соленого в центральной, кислого на его боковых поверхностях, а горького в задней части. Растворенное в слюне какое-нибудь вещество раздражает клетки вкусовых рецепторов, они посылают электрические импульсы в центральную нервную систему и организм реагирует на вкусовое ощущение.

Идентифицировать источник вкусового ощущения на основе бесконечного многообразия оттенков вкуса в виде комбинаций четырех основных вкусов помогает и обоняние, т. е. издаваемый этим источником запах.

Между химическим составом вещества и его вкусом так же нет прямой зависимости, как и у запаха. Например, одно и то же вещество может иметь различный вкус в зависимости от его концентрации.

Осязание как и обоняние относится к одному из первых органов чувств. Вначале это было ощущение прикосновения, контакта с объектами внешней среды — тактильная чувствительность. Затем добавились чувствительность к силе этого контакта, вплоть до болевого ощущения, в том числе и при химическом воздействии, и ощущение температуры (холод, тепло). Эти ощущения воспринимаются соответствующими рецепторами, которые расположены на поверхности отдельных частей тела живого организма.

Информация, поступающая от рецепторов разных органов чувств в соответствующие центры головного мозга, обрабатывается там по однотипному алгоритму путем последовательного обобщения и сопоставления с накопленным опытом вплоть до распознавания источника этой информации. Для зрения это идентификация воспринимаемого объекта; для обоняния определение источника запаха — аромат, дым, газ; для вкуса — вкус пищи, жидкости и всего что можно распознать по вкусу.

1.2. Органы чувств человека

У человека имеется пять основных органов чувств, дающих информацию о внешней среде и положении в ней человека, — это зрение, слух, обоняние, вкус и осязание. Кроме них имеется вестибулярный аппарат, определяющий положение тела в гравитационном поле Земли, а в системе осязания помимо тактильных органов имеются органы, чувствующие температуру и давление.

Здесь будут рассмотрены органы чувств человека не только особо существенные для его существования, но и важные для последующего сопоставления с сенсорными системами роботов. Это зрение, осязание и вестибулярный аппарат. Информация об остальных органах чувств была дана в рамках общего их рассмотрения для живых организмов в целом в предыдущем параграфе.

Приведем только сводные данные о времени формирования (запаздывания) в головном мозгу сигналов от различных органов чувств человека:

осязание	90—220 мс,
слух	120—180 мс,
зрение	150—200 мс,
обоняние	310—390 мс,
температурное воздействие	280—1600 мс,
болевое ощущение	130—890 мс.

Эти величины зависят от интенсивности входного воздействия, уменьшаясь с его ростом. Однако очень сильное воздействие, наоборот, может вызвать так называемое охранное торможение.

При этом надо иметь в виду, что только до $\sim 10\%$ воспринимаемой органами чувств информации осознается человеком, а основной ее объем остается в подсознании и используется в управлении рефлекторными движениями.

Зрительная система включает два глаза, соединенные зрительным нервом со зрительной корой головного мозга.

На рис. 1.1 приведена общая функциональная схема зрительной системы человека. Она включает две части — одна непосредственно в глазах и вторая — в головном мозге. В глазах находятся фоторецепторы и в двух нейронных слоях выполняется предварительная обработка получаемой от них видеоинформации.

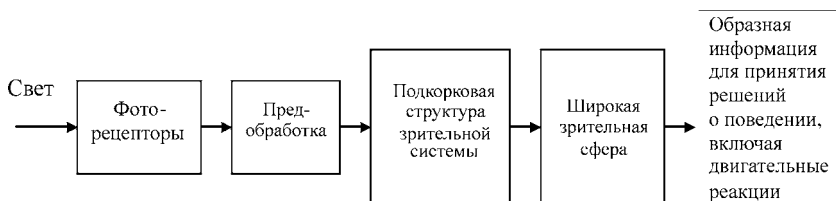


Рис. 1.1. Зрительная система человека

В головном мозгу осуществляются последующие три этапа обработки зрительной информации, каждый реализуется в среднем в шести нейронных слоях, — в подкорковой структуре, в первичной зрительной коре и в так называемой широкой зрительной сфере.

Глаза человека. На рис. 1.2 показано устройство глаз человека. На задней стенке его шарообразной формы находится **сетчатка**, содержащая слой светочувствительных клеток — фоторецепторов. Свет на них фокусируется хрусталиком, имеющим форму двояковыпуклой линзы, который расположен в передней части глаза.

Отверстие в радужной оболочке образует зрачок глаза. Ее окраска определяет цвет глаз. Радужная оболочка имеет мышцы, с помощью которых изменяются размеры зрачка. Его диаметр может меняться от 2 мм (при ярком свете) до ~ 90 мм (в темноте), на порядок изменяя при этом световой поток, падающий на сетчатку.

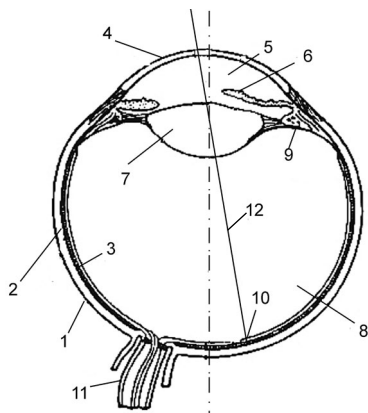


Рис. 1.2. Глаз человека:

1 — склера, 2 — сосудистая оболочка, 3 — сетчатка, 4 — роговица, 5 — передняя камера, 6 — радужная оболочка, 7 — хрусталик, 8 — стекловидное тело, 9 — ресничное тело, 10 — центральная ямка сетчатки, 11 — зрительный нерв (место выхода зрительного нерва из сетчатки — слепое пятно в поле зрения), 12 — зрительная ось

Хрусталик так же может изменять свой размер: он расширяется за счет своей упругости и может сжиматься специальными мышцами. Это необходимо для наведения глаз на резкость при изменении расстояния до рассматриваемого объекта (аккомодация). Диапазон четкого восприятия объектов — от 20 см до ∞ . При этом с увеличением расстояния увеличивается глубина резкости при неизменной настройке (фокусном расстоянии).

Сетчатка помимо слоя фоторецепторов содержит покрывающие его прозрачные для света два слоя нейронных клеток, обрабатывающих информацию от фоторецепторов, слой отходящих от них волокон зрительного нерва, который выходит из глаза, и сеть

кровеносных сосудов. Общая толщина сетчатки — около 0,25 мм.

Слой фоторецепторов состоит из двух их типов — **палочек и колбочек**. Палочки в сотни раз чувствительнее к свету чем колбочки, но зато последние чувствительны к цвету. Их три типа — чувствительные к синему, зеленому и красному участкам спектра электромагнитного излучения. Всего в сетчатке более 100 млн. палочек и до 7 млн. колбочек. Распределены они по сетчатке неравномерно: на периферии расположены в основном палочки и поэтому боковое зрение не различает цветов, но зато много чувствительнее центрального.

При освещении фоторецепторов они возбуждаются и примерно через 1 мс выдают электрический сигнал в виде пачки импульсов, частота которых является мерой освещенности. После этого фоторецепторы вновь переходят в состояние покоя, несмотря на

то, что освещенность продолжается, т. е. фоторецепторы реагируют только на изменение освещенности.

Как выше отмечено, первоначальная обработка информации, выдаваемой фоторецепторами, осуществляется двумя слоями нейронов, расположенными в глазу. В результате происходит сжатие первичной информации более чем на два порядка: ~ 125 млн. сигналов от фоторецепторов преобразуется в ~ 1 млн. сигналов, поступающих через такое же количество волокон выходящего из глаза зрительного нерва в головной мозг.

Нейроны первого слоя — **вставочные нейроны** передают информацию нейронам второго слоя и имеют поперечные соединения внутри своего слоя. Каждый вставочный нейрон получает информацию от нескольких фоторецепторов, которые образуют рецептивное поле этого нейрона. При этом один фоторецептор может входить в несколько рецептивных полей различных вставочных нейронов.

Нейроны второго слоя — **ганглиозные клетки**. Их аксоны образуют волокна зрительного нерва. Каждая ганглиозная клетка получает информацию от нескольких вставочных нейронов. В результате каждой ганглиозной клетке соответствует свое расширенное рецептивное поле на сетчатке. Кроме того, ганглиозные клетки могут иметь соединения и друг с другом. Имеются два типа ганглиозных клеток: одни реагируют на освещение своего рецептивного поля, а другие, наоборот, — на исчезновение светового пятна на нем.

Обработка информации в нейронных слоях глаза заключается в выделении, во-первых, границ перепадов яркости, и, во-вторых, движущихся световых пятен с определением направления этого движения. С первого типа обработки начинается обобщение первичной зрительной картины, отображенной на фоторецепторах. Это неизбежно ведет к ее определенному искажению: выделение границ перепадов освещенности служит для определения контуров отдельных видимых объектов внешней среды, хотя в действительности этих контуров, конечно, не существует. Это, в частности, является причиной различных оптических иллюзий, искажающих действительные соотношения размеров и формы объектов внешней среды. Некоторые из них используются художниками и модельерами.

Глаза человека находятся в постоянном движении, осуществляя обзорное сканирование поля зрения, что необходимо в связи с узкой (порядка 1°) зоной максимальной остроты зрения. Эти периодические движения — саккады могут иметь амплитуду от долей минуты до 60° . Эти движения могут дополняться еще и движениями головы и всего тела, особенно когда на периферии зрительного поля появляется какой-нибудь новый объект. Частота саккад растет с увеличением их амплитуды от десятков до сотен герц.

При необходимости удержания определенного объекта в зоне наиболее ясного видения глаза так же совершают особые движения. Это микросаккады (амплитуда $3-10'$, частота ~ 2 гц) и еще более мелкие и быстрые колебательные движения — тремор (амплитуда $10-20''$, частота $20-150$ гц). Эти колебательные движения заставляют фоторецепторы все время воспринимать этот объект как новый и не затормаживаться, переставая выдавать информации о нем.

Особый вид движения глаз — это наведение их зрительных осей на определенный объект и последующее слежение за ним. С удалением такого объекта зрительные оси глаз расходятся и начиная с расстояния в ~ 6 м глаза направлены параллельно и остаются в таком положении при дальнейшем удалении объекта.

Обработка зрительной информации в мозгу и ее роль в мышлении человека

Видеоинформация в виде пачек частотно модулированных импульсов поступает с каждого глаза через свой зрительный нерв в многослойные **подкорковые структуры** зрительной системы. Эта информация представляет собой картину зрительного поля в виде точек разной яркости и выглядит подобно фотографии в газете при ее увеличении. Подкорковая часть зрительной системы — наиболее древняя ее часть в головном мозгу. У земноводных и рыб она является верхним уровнем, обеспечивая их рефлекторное поведение. У позвоночных и особенно у человека основные функции зрительной системы по мере их развития переместились в активно развивавшуюся корковую структуру с образованием зрительной коры полушарий головного мозга. При этом в зрительную кору правого

полушария поступает информация от зрительного поля левого глаза за исключением части этого поля с края сетчатки со стороны виска. Вместо нее такая же информация поступает от своего глаза. В зрительную кору левого полушария, наоборот, поступает такая информация от правого глаза и так же частично от левого.

Причина такой перекрестной передачи информации от глаз в мозг остается загадкой. Разумеется, в конечном итоге вся видеoinформация попадает в оба полушария за счет их связи. (Заметим попутно, что такое же перекрестное соединение существует у ушей слуховой системы и у двигательных путей: левое полушарие управляет правой рукой, а правое — левой).

Важно при этом иметь ввиду, что несмотря на многократную обработку этой информации, она сохраняет топологическую привязку к первичному видеоизображению, фиксируемому фоторецепторами сетчатки хотя и с существенными масштабными искажениями. Последнее прежде всего относится к информации от центральной области сетчатки. В зрительной коре мозга она занимает больше места за счет сужения периферийной части. Такая топологическая инвариантность сохраняется во всех нейронных слоях зрительной системы. Эта система представляет собой совокупность колонок, пронизывающих все эти слои вплоть до зрительной коры, в каждой из которых осуществляется обработка информации от определенного участка зрительного поля, все более обобщаясь от слоя к слою. (При этом осуществляется и разворот на 180° видео картины на сетчатке глаза для компенсации такого поворота, совершаемого хрусталиком.)

Функции подкорковых структур зрительной системы человека, как они сформировались еще в ходе эволюционного развития животных, заключаются в опознании отдельных объектов внешней среды — их формы, цвета, взаимного расположения, движения, т. е. всего того, что прежде всего было необходимо в ходе этого развития.

Первичная зрительная кора, в которой осуществляется второй этап обработки зрительной информации в головном мозгу, имеет толщину ~ 2 мм. Она содержит 6 нейронных слоев, через которые проходят колонки сечением $\sim 1\text{--}2$ мм², послойно обрабатывающие информацию с определенных участков зрительного поля, выявляя

отрезки прямых линий с оценкой их длины и углового положения, дуги разной крутизны, крестообразные участки и т. п. Это выполняют специальные **нейроны — детекторы**, которые возбуждаются, когда такие особенности появляются на участке зрительного поля, контролируемом колонкой с такими нейронами — детекторами на выходе.

Совокупность соседних колонок со своими нейронами — детекторами, которые совместно обслуживают определенный участок зрительного поля получил название **функционального модуля**. После нейронов — детекторов отдельных признаков находятся нейроны, выявляющие комбинации таких признаков, которые определяют фрагменты изображений. Они охватывают большие участки зрительной коры и получили название **гностические единицы**. (Например, гностические единицы левого полушария, распознающие отдельные буквы, осуществляют это получая информацию от нейронов — детекторов их частей). Выходные сигналы этих нейронов помимо поступления на следующие уровни зрительной системы для распознавания целых объектов используются и при формировании рефлексов более сложных чем реализуемые с помощью древних подкорковых структур зрительной системы.

Для повышения качества выполнения перечисленных функций в описанной многослойной зрительной системе имеются корректирующие обратные связи на ниже расположенные уровни обработки видеoinформации.

В результате описанного процесса обработки и последовательного обобщения картины зрительного поля на выходе первичной зрительной коры формируется динамичная картина зрительного поля в основном в виде кусочно-линейно аппроксимированных линий.

Дальнейшая обработка этой информации, включая распознавание целостных объектов внешней среды, является функцией другой структуры головного мозга, которая получила название **широкая зрительная сфера**. Она включает в каждом полушарии по три функциональных системы: проекционную (в затылочной области мозга), предметного анализа, т. е. узнавания отдельных объектов (в височно-затылочных областях) и анализа пространствен-

ных отношений, т. е. целых сцен с несколькими объектами (в теменно-затылочных областях).

В правом полушарии эти структуры используют образные представления, а в левом — вербальные. При предметном анализе в правом полушарии — это узнавание отдельных предметов, а в левом — букв и т. п. знаков. При пространственном анализе правое полушарие превосходит левое в формировании представлений о целом по его фрагментам, включая восстановление целого при недостатке последних.

Общий принцип распознавания объектов для обоих полушарий один — это выделение отдельных фрагментов, определение их признаков, распознавания этих признаков и затем по их совокупности распознавание уже объектов в целом. Однако этот процесс происходит по-разному в полушариях мозга в соответствии с разным видом информации, которой они оперируют. В правом полушарии в отличие от левого выявляемые фрагменты могут не иметь словесного эквивалента и вообще самостоятельного значения, как например черты лица человека. Поэтому правое полушарие, оперируя зрительными образами, обеспечивает наиболее быстрое узнавание объектов типа лиц людей, обобщение зрительных образов и их классификацию по форме и т. п.

Левое полушарие, оперируя вербальными понятиями, являющимися обобщением образной информации, в отличие от правого полушария тяготеет к фрагментарности в ущерб целостному рассмотрению и составляет базу абстрактного мышления человека понятиями.

Как следует из изложенного, необходимым дополнением зрительной системы для обеспечения распознавания образов является память, хранящая прототипы и эталоны этих образов и их фрагментов. Это ассоциативная память образная в правом полушарии и вербальная (на внутреннем языке) в левом.

Распознаванию предшествует процесс обучения, который продолжается всю жизнь по мере ознакомления с новыми объектами и явлениями. В результате память заполняется все новыми сведениями о внешнем мире.

Последняя функция зрительной системы человека, на которой следует остановиться, — это определение дальности и связанное

с этим трехмерное представление внешней среды. Основным способом определения дальности заключается в оценке видимых размеров объектов известных по величине. (Например, известно из геометрии, что при увеличении дальности до предмета вдвое на столько же уменьшаются видимые его размеры).

Бинокулярное зрение дает оценку глубины, объема предметов. В мозгу имеются **бинокулярные нейроны**, которые сопоставляют изображения в глазах и находят общие объекты. По расхождению их изображений они дают оценку дальности до этих объектов. Существует несколько таких нейронов, каждый из которых настроен на определенную дальность.

Осязание — это, как выше показано, кожная чувствительность к четырем видам внешних воздействий: тактильному, температурному, силовому и болевому. Эти виды кожной чувствительности осуществляются различными рецепторами:

- корзинчатые сплетения и тельца Меснера, дающие ощущения прикосновения и давления;
- рецепторы Руффини тепловых ощущений;
- колбочки Краузе, ощущающие холод;
- свободные нервные окончания болевых ощущений.

В целом кожа является распределенным чувствительным органом с неравномерно размещенными различного вида рецепторами. Наиболее чувствительна у человека ладонь руки, а так же язык. Скорость передачи различной осязательной информации в мозг так же существенно различна. Наиболее быстро, со скоростью до 120 м/с, передается тактильная информация. Температурная и болевая информация передается со скоростью менее 40 м/с. Эти скорости определяются диаметром нервных волокон, по которым эта информация передается.

Вестибулярный аппарат — орган, воспринимающий изменения положения головы и тела в гравитационном пространстве и направление движения тела. Эта информация передается в головной мозг и служит для обеспечения равновесия тела, поддержания позы и координации движения, для получения информации о действующих на организм силах. Этот орган тесно связан с системой слуха

и находится в среднем ухе. Обе системы эволюционно произошли из одной системы.

Вестибулярный аппарат состоит из симметрично расположенных в левой и правой височных костях черепа гидромеханических систем, называемых лабиринтами. Каждая из них состоит из трех взаимноперпендикулярных полукольцев и отолитового аппарата, на который замыкаются эти полукольца. Вся эта система заполнена жидкостью — эндолимфой. В каждом полукольце имеется желеобразная мембранная перегородка — купула с вестибулярными рецепторами, воспринимающими ее перемещение. При появлении углового ускорения в плоскости одного из полукольцев сила инерции смещает в его канале эндолимфу и с ней купулу. В результате рецепторы выдают соответствующий сигнал в головной мозг.

Линейные ускорения выявляются отолитовым аппаратом с помощью инерционных мембран, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и снабженных рецепторами, чувствующими их деформацию. Величина воспринимаемых рецепторами вестибулярного аппарата перемещений составляет 0,05–0,1 мм. Сигналы от этих рецепторов дают возможность головному мозгу оценивать проекции вектора произвольно направленного линейного ускорения.

Совместное действие полукружных каналов и отолитового аппарата обеспечивает центральную нервную систему информацией обо всех линейных и угловых ускорениях тела, которая необходима для поддержания равновесия и управления движением.

Количественные параметры вестибулярного аппарата человека:

- время установления сигнала линейного ускорения — 0,01–0,02 с, а углового — до 10 с;
- диапазон воспринимаемого линейного ускорения — 2–20 см/с²;
- чувствительность к наклону тела в вертикальной плоскости 1,5–2°, а в стороны — около 1°;
- чувствительность к угловому ускорению — 0,8–2,4 °/с².

Глава вторая

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

2.1. Дальномеры и локаторы

Дальномеры и локаторы, т. е. сканирующие дальномеры, нашедшие применение в робототехнике, по физической природе используемого излучения подразделяются на радиотехнические, лазерные, инфракрасные и ультразвуковые.

На рис. 2.1 приведен пример **радиотехнического локатора**, предназначенного для обследования местности и обнаружения отдельных объектов. Дальность действия 2–200 м.

На рис. 2.2 показан лазерный локатор. Дальность его действия — 80 м, разрешение по расстоянию — 10 мм, по углу $< 1^\circ$.

Основное применение в робототехнике такие системы получили как дополнение систем технического зрения в мобильных роботах, когда требуются повышенная точность и больший диапазон измерения дальности.

Дальномер состоит из передатчика, направленно излучающего указанной выше физической природы излучение, и приемника, регистрирующего отраженное от объектов окружающей среды это излучение. Принцип действия дальномеров осно-



Рис. 2.1. Радар Nav Tech I 800 (США)

ван на использовании в качестве меры расстояния (дальности) времени запаздывания принимаемого отраженного эхосигнала относительно инициировавшего его сигнала, излученного передатчиком. Сигнал этот представляет собой модулированное высокочастотное несущее колебание и может быть импульсным или непрерывным. Соответственно модуляция может быть непрерывной — амплитудной, частотной, фазовой или импульсной с изменением кроме этих параметров еще ширины импульсов или в виде кодовой модуляции.

Лазерные дальномеры и локаторы, получившие применение в робототехнике, основаны на твердотельных импульсных лазерах и применяются на дальностях до нескольких км.

Сенсорные системы, использующие **инфракрасное излучение**, применяются в мобильных роботах как дальномеры ближнего действия для предотвращения столкновений с объектами внешней среды, а так же в режиме работы на просвет в схватах манипуляторов для контроля наличия в них предметов, подлежащих взятию. Их достоинства для этих применений — простота, надежность и низкая стоимость. Диапазон действия инфракрасных дальномеров — единицы метров, погрешность до 10 %. Первичный оптический преобразователь у них — это излучающий светодиод с усилителем, а приемник содержит матрицу фотодиодов или фоторезисторов. Передатчик и приемник имеют свои оптические системы.

Специфическую область применения датчиков инфракрасного излучения составляют системы ночного видения, основанные на электронно-оптических преобразователях (ЭОП), которые преобразуют инфракрасное излучение в видимый свет. Такие приборы используются при естественном излучении ночного неба (лунном и звездном), при подсветке инфракрасными осветителями, часто лазерными, а так же при использовании собственного излучения



Рис. 2.2. Лазерный локатор SICK (Германия)

отдельных объектов. Эти приборы имеют усиление до 50000 раз и дальность действия до ~ 2 км.

Ультразвуковые дальномеры и локации (сонары) используют ультразвуковые колебания с частотой от 15 кГц и до мегагерц. Задачи, решаемые с их помощью:

- предотвращение столкновений и обеспечение обхода препятствий,
- картографирование окружающего пространства,
- распознавание объектов.

Широкое распространение сонаров объясняется их низкой стоимостью, небольшим весом и энергопотреблением, простотой обработки сигналов.

Вместе с тем низкая скорость звука по сравнению с электромагнитным излучением (в воздухе при обычной температуре и плотности — 343 м/сек), снижает быстродействие сонаров. Другим их недостатком является сильная зависимость регистрируемого отраженного сигнала от свойств отражающей среды. Например, от наклонной поверхности этот сигнал вообще не попадает в сонар. В воздушной среде используются частоты 30—100 кГц. В излучателях этих колебаний применяются электростатические, пьезоэлектрические, а так же магнитострикционные преобразователи электрического сигнала в ультразвук. Приемники устроены по принципу обратимых электроакустических преобразователей такого же принципа действия. Наибольшее распространение в приемниках и передатчиках получил прямой и обратный пьезоэффекты.

Один и тот же обратимый преобразователь может использоваться и на излучение и на прием путем циклического переключения режима работы. По сравнению с пьезодатчиками электростатические датчики имеют более широкую частотную характеристику, но требуют более высокого напряжения (более 100 В), что усложняет датчик.

При применении в водной среде в качестве гидроакустических преобразователей получили распространение магнитострикционные преобразователи, которые имеют значительно большую акустическую мощность по сравнению, например, с пьезоэлектрическими и КПД до 80 %. В табл. 2.1 приведены характеристики некоторых ультразвуковых локации.

Таблица 2.1

Параметры промышленных ультразвуковых локоаторов

Модель	Дальность действия, м	f , кГц	θ^* , град	Погрешность, %	Размеры, мм			Масса, кг
					b	h	l	
УТ-10ДР (Россия)	0,15...9,5	60	20	5	200	120	300	2,5
УТ-65 (Россия)	0,001...0,3	Переменная	7	1	85	40	165	0,5
М-942 (Германия)	0,001...2	215	10	0,05	—	—	—	1,0
UC2000-F43 (Германия)	1,1...2,0	—	5	0,5	45	20	210	0,3
RS/8,5 (Япония)	0,1...6	140	5	0,3	—	—	—	0,7
Zirson-4,0 (США)	0,5...12,5	75	10	0,5	62	30	110	0,1

* Угол диаграммы направленности

Ультразвуковые сенсорные системы нашли особенно широкое применение в подводных роботах, как и вообще во всех видах подводных аппаратов, где они являются основным средством контроля окружающего пространства. Ультразвуковые дальномеры и локаторы помимо применения в воздушной и водной среде применяются так же для интроскопии в системах неразрушающего контроля и в других диагностических устройствах, включая медицину (УЗИ).

Тактильные сенсорные системы

Эти системы предназначены для определения непосредственного соприкосновения с объектами внешней среды, т. е. аналогичны органам осязания живых организмов. В робототехнике они применяются для очувствления рабочих органов манипуляторов и корпусов мобильных роботов. Когда наряду с фиксацией контакта требуется определять и его усилие, применяются силовые сенсоры. Тактильные системы применяются так же для контроля проскальзывания предметов в схвате, распознавания формы объектов путем ощупывания, отслеживания краев и т. п.

В целом в тактильных системах применяются датчики касания, давления, проскальзывания. Они могут быть одиночные и матричные, занимающие определенную поверхность, аналоговые и дискретные, в пределе релейные. В них используются тензочувствительные материалы, электропроводящие полимеры, микропереключатели, герконы. Применяются устройства типа “искусственная кожа” на эластомерах (баристоры), пленках поливинилфторида и композитных материалах с волокнами из графита [2].

В последних вариантах матричных тактильных датчиков имеется однокристалльный процессор, который осуществляет опрос точечных тактильных ячеек и формирует тактильный образ оощаемого объекта в двоичном коде. Это пример так называемых интеллектуальных датчиков.

2.2. Сенсорные системы, определяющие положение в пространстве

К этим системам относятся гироскопические системы, акселерометры, магнитометры, спутниковые системы навигации и одометры.

Гироскопические системы предназначены для определения углового положения объектов в гравитационном поле. Первые такие системы, основанные на принципе действия волчка, — роторные гороскопы, были предложены еще в XIX веке. Для измерения трех углов в пространстве требуется три гироскопа с ортогонально ориентированными осями.

Следующим более простым и дешевым типом тоже механических гироскопов являются вибрационные гироскопы. Они основаны на эффекте Кореолиса, обеспечивающем сохранение колебаний в одной плоскости при повороте. Существуют десятки вариантов подобных гироскопов. Наиболее простые, дешевые и миниатюрные из них — это гироскопы, выполненные на МЕМС технологиях — МЕМС гироскопы.

Другим типом гироскопов являются оптические гироскопы — волоконно-оптические и лазерные. В них чувствительное устройство представляет собой вращающийся плоский оптический контур, по которому в противоположных направлениях циркулируют два луча. Время прохождения контура лучом, сонаправленным с вращением контура, будет меньше, чем у противоположно направленного луча, т. к. последний должен проходить больший путь. Разность времени их прохождения этого контура пропорциональна углу поворота контура за это время и может использоваться мерой угла этого поворота.

В робототехнике основное применение получили МЕМС гироскопы. Однако и оптические гироскопы являются по ряду показателей вполне конкурентно способными.

Акселерометры. Эти приборы служат для выявления ускорения и были рассмотрены во введении. В робототехнике в общем случае нашли применения трехкомпонентные (трехосевые) акселерометры, определяющие величину ускорения по трем осям.

Акселерометры применяются вместе с гироскопами в инерциальных навигационных системах, рассмотренных далее, а так же в инклинометрах, определяющих углы наклона мобильных роботов относительно гравитационного поля Земли. В последнем случае акселерометры компенсируют погрешность показаний инклинометра от ускорения.

Рассмотренные в этом параграфе системы нашли основное применение для обеспечения навигации мобильных роботов. В своей совокупности они получили название инерциальная измерительная система (ИИС). Ее достоинство — автономность, основанная на пассивных способах получения навигационной сенсорной информации. В общем случае эта информация включает шесть показателей: три координаты местоположения (x, y, z) и три угла ориентации (крен, тангаж, рыскание). Для этого система должна включать три ортогональных (по трем осям) акселерометра и три ортогональных гироскопа. Данные акселерометров помимо информации об ускорениях робота после интегрирования включают информацию о скорости и о перемещении, т. е. о текущем положении. Данные гироскопов включают так же сведения о величине скорости углового смещения.

ИИС только с гироскопами применяются в стабилизированных платформах на карданном подвесе для их управления. Такие платформы используются в том числе в роботах для проведения различных измерений и других операций, требующих такой базы.

Главным недостатком ИИС является накапливающиеся со временем ошибки в определении координат, вызванные прежде всего получением их путем интегрирования. Поэтому необходимо эти ошибки регулярно устранять. Основным способом этого служат спутниковые системы позиционирования. Для наземных роботов, очевидно, возможно использование для этого и карты местности.

Глобальные спутниковые системы позиционирования (определения местоположения). Первой такой системой была системы GPS (США). Затем были созданы еще несколько подобных систем: китайская Beidou, японская QZSS, разрабатываемая Европейским Союзом Galileo и отечественная система ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система). В настоящее время разрабатываются подобные системы уже третьего поколения, обеспечивающие определение координат объектов с точностью не в десятки, а в единицы сантиметров.

Спутниковая система GPS основана на 24 спутниках. Их орбиты выбраны таким образом, чтобы из любой точки земной поверхности всегда можно было увидеть не менее четырех спут-

ников. Это позволяет вычислять местоположение своего приемника сигналов со спутников в этой точке как чисто геометрическую задачу, получив от спутников их координаты, которые они непрерывно транслируют вместе с точным временем, и вычислив расстояние до них по времени прохождения сигналов. Для определения местоположения приемника достаточно информации от трех спутников. Расстояние от каждого дает сферу. Пересечение двух сфер образует окружность, на которой находится приемник. Точка пересечения с третьей сферой определяет точку нахождения приемника.

Магнитометры. Это приборы для определения параметров магнитного поля Земли. В робототехнике они применяются в навигации подобно компасу. Существует так же возможность определения по карте неоднородностей магнитного поля Земли географических координат.

Основные типы магнитометров: магнитостатический (механический), индукционный (вибрационный, флюксометр, феррозондовый), на эффекте Холла и квантовый (протонный, гелиевый, атомный).

Магнитостатические магнитометры основаны на измерении механического момента, действующего на индикаторный магнит в магнитном поле. В индукционных магнитометрах измеряется ЭДС, возникающая в измерительной катушке, вращающейся или вибрирующей в магнитном поле. Феррозондовые магнитометры основаны на периодическом изменении магнитного сопротивления измерительной катушки путем перемещения пермаллового сердечника или изменения его магнитной проницаемости переменным полем возбуждения. Использование эффекта Холла для измерения магнитной индукции было рассмотрено во введении. Квантовые магнитометры основаны на квантовых эффектах в ядрах и электронах в магнитном поле (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс).

Одометры. Это самые древние простейшие устройства для определения относительного положения транспортного средства путем измерения пройденного им пути. Классическим одометром является измеритель количества оборотов колеса, которые до на-

стоящего времени используются в автомобилях. Иногда, в частности в робототехнике, для измерения пройденного пути применяют специальное колесо, помещенное сзади транспортного средства. (Для мобильных роботов с дифференциальным приводом двух колес пройденный путь вычисляется для точки, лежащей на середине общей оси колес, по величинам поворота каждого колеса.) Источниками погрешности этих систем являются проскальзывание колес, деформация грунта и самих колес. Эти погрешности могут корректироваться с помощью данных, получаемых от сенсорных систем, определяющих местоположение транспортного средства.

Для определения пройденного пути применяются и различные другие средства и способы, включая использование информации от дальномеров, локаторов и других сенсорных систем. Существуют, в частности, корреляционные системы, подобные измерителям для прокатных станков и т. п.

Аналогичного назначения системы применяются и в водной среде.

2.3. Специальные сенсорные системы

Помимо рассмотренных выше сенсорных систем общего применения в соответствии с назначением конкретного робота в составе его сенсорного обеспечения могут потребоваться сугубо специальные сенсорные системы, которые создаются в рамках проекта этого конкретного робота. К таким специальным сенсорным системам относятся, например, системы, служащие для выявления особо опасных объектов — радиоактивных, взрыво- и пожароопасных, химически и биологически опасных и т. п. Это могут быть так же системы, выявляющие различные химические, специальные физические свойства и т. д.

В дальнейшем будут упоминаться и рассматриваться такие специальные сенсорные системы в составе роботов различного назначения. Здесь в качестве примера представлено несколько специальных сенсорных систем, созданных для роботов, работающих с радиоактивными объектами.

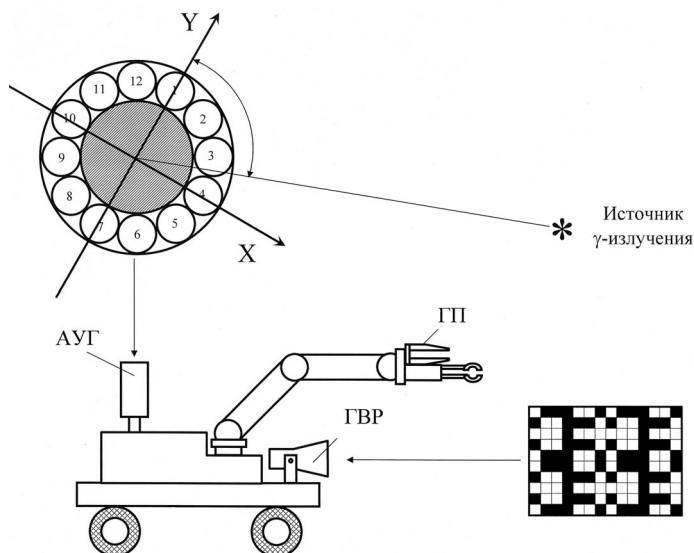


Рис. 2.3. Комплекс сенсорной аппаратуры робота Разведчик (ЦНИИ РТК, Россия):

АУГ — азимутальный угломер; ГВР — гамма-визор; ГП — гамма-прицел

На рис. 2.3 показано сенсорное обеспечение робота Разведчик, предназначенного для поиска и эвакуации источников гамма-излучения.

Установленные на роботе системы технического зрения (СТЗ) передают на пульт оператора видеоизображение окружающей робот территории, а специальная сенсорная аппаратура, регистрирующая гамма-излучения, обеспечивает нанесение на эту картину мест нахождения и активности обнаруживаемых роботом источников такого излучения. На рис. 2.3 показано расположение этой аппаратуры в составе робота — это азимутальный угломер АУГ, гамма-визор ГВР и гамма-прицел ГП.

АУГ (рис. 2.4) содержит 12 счетчиков (СИ29БГ), которые обеспечивают круговой обзор. Выдаваемая прибором диаграмма интенсивности регистрируемого излучения своим максимумом определяет направление на источник излучения. Обработка этих



Рис. 2.4. Внешний вид азимутального угломера
АУГ со снятым кожухом

данных позволяет определить основные параметры источника и по ним осуществить его идентификацию.

При наличии нескольких источников гамма-излучения АУГ выделяет некоторое среднее направление на максимум суммарного поля, создаваемого этими источниками. Для решения задачи выделения отдельных источников предназначен гамма-визор ГВР (рис. 2.5) с показанной на рис. 2.3 кодированной апертурой.

Гамма-прицел ГП, установленный на схвате манипулятора робота, имеет узкую диаграмму направленности и предназначен для точного наведения схвата на источник с целью его взятия.

На рис. 2.6 показан пример робота-миноискателя, в котором для обнаружения взрывчатых веществ использован гамма-лучевой сенсор.

Его принцип действия заключается в облучении обследуемой территории жестким гамма-излучением и в выявлении в регистрируемом обратно-рассеянном излучении гамма-квантов, характерных при облучении азота и углерода, которые составляют основу современных взрывчатых веществ. Для получения первичных гамма-квантов нужной высокой энергии (несколько мегаэлектрон-

вольт) использован линейный ускоритель электронов, который выбивает гамма-кванты из свинцовой или вольфрамовой мишени. Сканирование местности перед движущимся аппаратом осуществляется путем отклонения магнитным полем электронного пучка, падающего на мишень. Детектор вторичного излучения располагается над поверхностью местности на высоте до 2 м, что позволяет работать миноискателю на территории, покрытой травой, кустарником и другими препятствиями.

Подобные специальные сенсорные системы созданы для роботов, взаимодействующих с другими опасными объектами и средами, для выявления дыма, огня, химического состава веществ. Последняя задача приобрела в последнее время особенно большую актуальность для медицины, пищевой промышленности, экологии и безопасности, сельского хозяйства. У человека эта задача решается обонянием и чувством вкуса. В отличие от этих органов чувств их технические аналоги должны иметь значительно более широкий диапазон, включая опасные для человека значения выявляемых параметров.

Из всех органов чувств, пожалуй, только обоняние не имеет до настоящего времени полноценного технического аналога. Причина этого, во первых, в недостаточном знании функционирования бионических систем обоняния, а, во вторых, в том, что основные усилия в этой области техники уделялись созданию аналитических приборов типа спектрометров для определения состава газов в лабораторных условиях. Такие приборы имеют значительные габариты, высокую стоимость, требуют значительного времени для анализа и квалифицированного обслуживания.

Разработки современных датчиков для анализа состава газов начались с середины XX века и привели к созданию соответствующ-

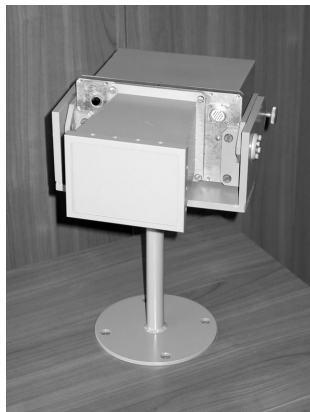


Рис. 2.5. Внешний вид гамма-визора ГВР с детекторной матрицей из счетчиков Гейгера-Мюллера (СБМ-21)

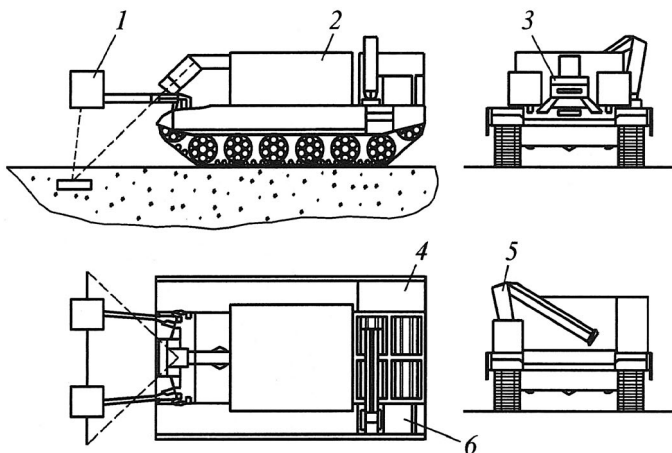


Рис. 2.6. Гамма-лучевой миноискатель МКГР (разработка ФИАН им. П.Н. Лебедева): 1 — детектор; 2 — контейнер с аппаратурой; 3 — гамма-излучатель; 4 — источник электропитания; 5 — технологический манипулятор; 6 — система охлаждения

щих мультисенсорных систем, получивших название “электронный нос” и позволяющих распознавать определенные обонятельные образы, подобно биологическим органам обоняния. Такие приборы на базе мультисенсорных чипов обладают высоким быстродействием, достаточно просты, дешевы и поэтому пригодны для применения во многих видах техники. В пищевой промышленности и торговле они позволяют определять химический и микробиологический состав продуктов, в медицине диагностировать заболевания по составу выдыхаемого воздуха, в экологии и сельском хозяйстве анализировать состав атмосферы.

В робототехнике созданы первые мобильные роботы, обнаруживающие различные запахи и их источники. В перспективе по запаху роботы смогут осуществлять навигацию, как многие животные, обнаруживать утечки разных газов, взрывчатые и другие опасные вещества, контролировать экологическую обстановку.

Примером еще одной специальной сенсорной системы, аналога органа слуха, являются акустические системы. В отличие от рассмотренных выше ультразвуковых сенсорных систем, эти системы работают в диапазоне звуков, воспринимаемых человеческим ухом. Это тоже пассивные системы, воспринимающие звуки с помощью обычных микрофонов и осуществляющие распознавание по ним объектов внешней среды и их свойства.

2.4. Сенсорное обеспечение построения моделей внешней среды, управления, навигации и безопасности движения

Сенсорная информация о местоположении мобильных роботов, объектах внешней среды, включая возможные препятствия, ее общая 3D картина является основой для построения модели окружающего пространства, выбора направления и траектории движения в соответствии с выполняемыми задачами. В ходе движения оперативно получаемая такая информация обеспечивает процесс управления движением, включая преодоление и обход препятствий.

Модель среды строится в виде карты местности и плана помещений внутри зданий. Для этого используются данные дальномеров и локаторов, включая расстояние до обнаруженных неровностей местности и отдельных препятствий и направление на них. По множеству зарегистрированных точек осуществляется 3D картографирование контролируемой части внешней среды. В процессе движения эти данные уточняются вблизи и дополняются на предельной дальности действия сенсорных систем с использованием инерциальных измерительных систем, систем типа GPS и одометрии. Уточнение сведений о ближайшей территории относится прежде всего к возможным препятствиям, включая как возвышенности, так и отрицательные препятствия (ямы, канавы и т. п.), а так же наличие движущихся объектов. Наиболее трудно обнаруживаются на расстоянии отрицательные препятствия и тем более оценка их глубины. Обнаруживают их по разрыву поверхности и по задней кромке этого разрыва. Затем следует оценка свойств самой поверхности передвигания и контроль углов наклона корпуса робота во избежание его опрокидывания.

В этой ближней зоне наиболее эффективны системы технического зрения (СТЗ), которые будут рассмотрены в третьей главе. Они обладают самой широкой полосой пропускания по сравнению с другими сенсорными системами и поэтому наибольшими семантическими возможностями для распознавания объектов внешней среды при картографировании, а так же позволяют осуществлять движение по внешним ориентирам. Последнее получило название “интерпретирующая навигация”, когда движение осуществляется не по карте с географическими координатами, а по топологическому образу среды. Такой способ навигации обеспечивает большую автономность и надежность управления. Распознанные с помощью СТЗ объекты внешней среды позволяют путем обнаружения их на карте устанавливать истинные их координаты и привязывать топологическую картину местности к географической карте.

При выполнении манипуляционных операций основные задачи сенсорного обеспечения решаются с помощью СТЗ и силового очувствления. Для этого камеры СТЗ устанавливаются вне рабочей зоны и на запястье манипулятора. Перспективной задачей развития сенсорного обеспечения манипуляторов является создание измерителей абсолютных координат рабочего органа, в том числе с использованием маяка на этом органе. Силовое очувствление будет рассмотрено в четвертой главе.

Глава третья

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

3.1. Назначение и состав систем технического зрения

В робототехнике как и в живом мире основным видом чувствления является зрение. Первые системы технического (машинного, компьютерного) зрения, нашедшие применение в средствах робототехники, копировали органы зрения живых организмов, развиваясь в такой последовательности: черно-белые монокулярные СТЗ, цветные, стереоскопические и многоракурсные с различными вариантами аппаратной реализации.

Первое устойчивое применение в робототехнике СТЗ получили в системах управления манипуляторов и мобильных роботов от человека-оператора. Так, в 70–80-е годы прошлого столетия в ЦНИИ РТК были созданы такие системы управления для подводных роботов различного назначения. Следующим шагом в развитии таких систем стали системы супервизорного управления. Они оказались особенно эффективны для телеуправления роботами при значительном временном запаздывании в канале связи, когда становится затруднительным управление от оператора в реальном времени, а так же для работы в условиях плохой видимости. Последний случай характерен, например, для подводных роботов, работающих вблизи дна, когда движение робота вызывает подъем осадков и замутнение воды. Поэтому применяемое в этих случаях супервизорное управление сводится к периодическому целеуказанию и заданию оператором очередной выполняемой автоматически элементарной операции в моменты восстановления видимости.

Большой опыт применения таких систем управления роботами с помощью СТЗ был получен при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (1986 год). Здесь впервые, по крайней мере в отечественной практике, было реализовано групповое применение мобильных роботов с централизованным управлением от оператора. Оператор с помощью задающих рукояток и различных средств целеуказания осуществлял управление роботами-наблюдателями, которые выдавали на экран пульта управления общую картину рабочей зоны, роботами-разведчиками, которые проводили детальное обследование этой зоны с передачей помимо видео еще и другой нужной информации, прежде всего, конечно, о радиационной обстановке, и, наконец, технологическими роботами, выполнявшими саму работу по очистке помещений и территории станции от радиоактивного мусора.

Дальнейшим этапом развития систем очувствления роботов стало **комплексирование** СТЗ с другими сенсорными системами, т. е. совместное их использование прежде всего для решения задач, которые иначе не могли быть решены. В качестве примера на рис. 3.1 показана картина зоны радиационного заражения, получаемая на экране пульта управления робота, предназначенного для обследования радиационно зараженных территорий и поиска радиоактивных источников. На экране — картина изолиний поля радиации, которые построены по показаниям специальных сенсоров и по информации, получаемой от СТЗ. Помимо получения общей картины этого поля и выявленных мест нахождения локальных источников радиационного излучения это позволяет определять величины активности последних.

Следующий этап развития видео систем роботов — **визуализация информации**, получаемой от различного типа сенсорных систем. Прежде всего — это системы, использующие другие участки спектра электромагнитных излучений. В сторону более длинных волн — это ИК и радиодиапазоны (“радиовидение”), а более коротких — УФ, рентгеновский и гамма-лучевой диапазоны. По существу, такая визуализация в наиболее развитом виде основана на вычислительных методах восстановления изображений по их проекциям, которые применяются и в томографии. Аналогичная визуализация выполня-



Рис. 3.1. Пульт оператора робота Разведчик и картина зоны радиационного заражения на экране пульта (ЦНИИ РТК, Россия)

ется для сенсорных систем, использующих механические колебания в УЗ диапазоне, ядерно-магнитные резонансные колебания и т. п.

Последние, а так же рентгеновские и гамма-лучевые излучения, благодаря их проникающим свойствам, применяются и в **интроскопии**, включая томографию. Здесь используется либо прямое просвечивание, либо регистрируется обратно рассеянное вторичное излучение. На рис. 3.2 показан робот, предназначенный для борьбы с террористами и обнаружения различных опасных предметов. Он оборудован рентгеновской системой просвечивания. На рисунке показана операция проверки содержимого портфеля и изображение, получаемое при этом на пульте оператора.

Общая тенденция развития СТЗ — это совершенствование алгоритмов обработки видеоинформации, включая адаптацию к внешним условиям и решаемым задачам путем изменения структуры и настройки параметров системы. Актуальной задачей явля-

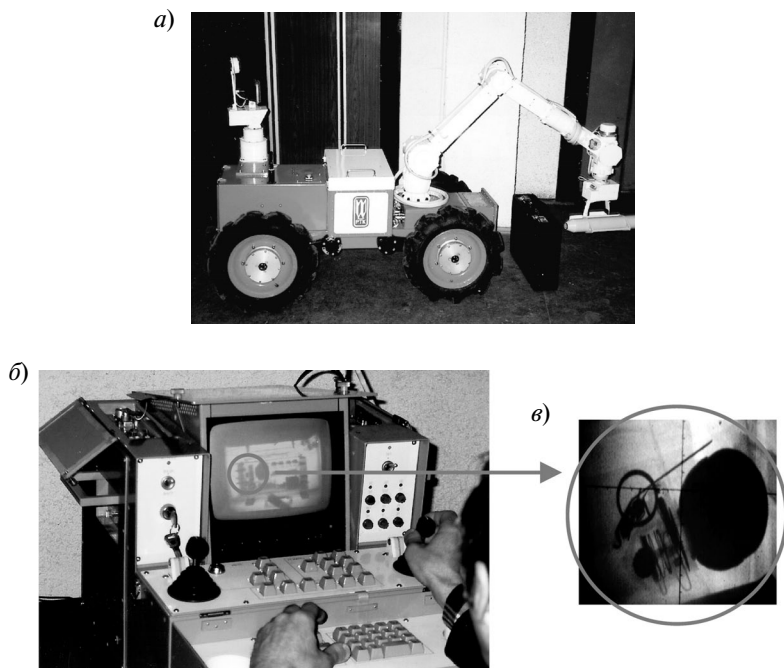


Рис. 3.2. Робот Антитеррорист (ЦНИИ РТК, Россия)

ется так же переход от бинокулярных СТЗ к **многокурсным**. В робототехнике это реализуется путем перемещения робота с СТЗ перпендикулярно направлению видения или такого же перемещения видеокамеры манипулятором. Для отдельных объектов — это осмотр их со всех сторон. В результате компьютерной обработки получаемой видеоинформации синтезируется объемная модель. Разумеется, это неизмеримо информативнее традиционных стереоизображений и позволяет осуществлять соответственно более качественное планирование и управление движением.

По-прежнему, актуальна задача распознавания в реальном масштабе времени достаточно сложных образов подобных лицам людей. Здесь самые совершенные СТЗ пока уступают живым организмам. Основная причина этого в том, что в СТЗ эта задача реша-

ется путем перехода от реальных образов в вербальное множество признаков, в пространстве которых и происходит процесс распознавания, в то время как в живом мире оно осуществляется не выходя из образного представления объектов внешней среды. В настоящее время ведутся исследования по созданию систем, которые воспроизвели бы такой процесс обработки исходной видеoinформации вплоть до распознавания образов на основе ассоциативного сопоставления с эталонными или конкретными образами или их фрагментами. Перспективность такого подхода подтверждается, в частности, и опытом распознавания сложных образов по эталону, “фотороботу” и т. п.

Рассмотрим общее состояние современных СТЗ применительно к потребностям робототехники. СТЗ в составе систем управления роботом предназначены наряду с другими сенсорными системами прежде всего для реализации адаптивного управления и для обеспечения человека-оператора, управляющего роботом, видеоинформацией об окружающей робот обстановке и прежде всего о его рабочей зоне.

В рамках решения последней задачи СТЗ часто комплексированы с компьютерной графикой для построения динамической 3D картины внешней среды в виде системы стилизованной виртуальной реальности, которая используется при планировании действий робота, отработки программ отдельных операций, а так же при управления ими.

Основные задачи, которые решают СТЗ:

- получение общей зрительной картины окружающей внешней среды;

- выделение в этой картине отдельных объектов и их распознавание, включая кластеризацию (разбиение на классы по близости по некоторым важным признакам), классификацию (отнесение к определенным заданным классам), верификацию (обнаружение конкретного искомого объекта);

- определение характеристик тех из выявленных объектов, которые нужны для выполнения роботом конкретных заданий.

При решении этих задач СТЗ так же часто комплексированы с другими сенсорными системами. Кроме того, как выше указано,

СТЗ применяются для визуализации выходной информации других типов сенсорных систем.

СТЗ могут быть

- одномерными (линейка), двух- и трехмерными;
- монохромными (полутонными, черно-белыми);
- цветными.

На рис. 3.3 показан типовой состав СТЗ: датчик (сенсор) изображения, устройство предобработки (последнее может быть объединено с датчиком в цифровой датчик) и процессор, выходная информация от которого поступает в систему управления и к человеку-оператору для дальнейшего использования.

Основной тип СТЗ — это однопроцессорные системы, например, на базе персонального компьютера. Предобработка осуществляется специальным устройством ввода (цифровая плата с памятью изображения). Для повышения быстродействия особенно при работе с достаточно сложными изображениями переходят к многопроцессорным системам с разделением задач на подзадачи, которые можно решать параллельно. Существуют СТЗ и с последовательной (конвейерной) структурой. Они применяются для обработки больших массивов данных за длительный период времени.

В компьютерах используется **цифровое изображение**, которое представляет собой полученную от датчиков изображения совокупность строк и столбцов пикселей (pixels — сокращение слов picture element — элемент изображения), предварительно преобразованных в цифровую форму. Каждый пиксел характеризуется интенсивностью (яркостью), которая представляется числом. Обычно используют однобайтовые (8-битовые) числа, дающие числовые значения от 0 до 255, реже — 10 битовые (1024 значения).

Датчик изображения — это **оптоэлектронный преобразователь** (ОЭП), работающий в диапазоне видимого света. Существуют

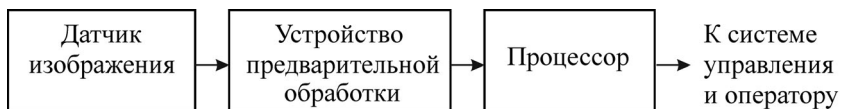


Рис. 3.3. Схема системы технического зрения

так же упомянутые выше ОЭП, работающие в других диапазонах электромагнитного излучения до видимого света — ИК и радио и после — УФ, рентгеновское и гамма излучения. Преобразователь видимого света представляет собой телекамеру одного из двух типов — в виде вакуумных электронно-оптических приборов, которые исторически появились первыми, и более современных твердотельных камер на основе ячеек с зарядной связью (ПЗС) или фотоэлементов (фотодиоды, фототранзисторы, фоторезисторы).

Основные характеристики этих датчиков:

- разрешающая способность (разрешение по вертикали и по горизонтали),
- чувствительность (минимальная воспринимаемая освещенность),
- спектральная характеристика (диапазон частот регистрируемых электромагнитных колебаний).

Изображения могут получаться так же и с помощью сканирующих дальномеров — локаторов (лазерных, микрорадиоволновых и др.).

В соответствии с указанным выше функциональным составом в СТЗ последовательно решаются следующие задачи обработки зрительной информации:

- предварительная обработка видеоизображения, получаемого от датчика, в виде его фильтрации с целью повышения качества изображения путем освобождения от шумов и других помех, включая изменение освещенности и тени, сглаживания, повышения контрастности с усилением границ объектов и их частей, преобразование аналогового сигнала в цифровой;
- сегментация, т. е. декомпозиция изображения с последовательным выделением отдельных объектов из общей картины, затем их частей и т. д. (обнаружением контуров, участков определенной текстуры и цвета);
- определение характеристик этих объектов, т. е. выделение признаков (дескрипторов) для их последующего распознавания (выделение отрезков прямых, отверстий, округлостей, определение величины периметра, площади и т. п.);

— распознавание, т. е. кластеризация, классификация или верификация.

При этом распознавание возможно и при неполной видимости части объектов. В этом случае выдвигается и проверяется несколько гипотез. Последнее может потребовать и дополнительного осмотра объекта.

Выбор отдельных признаков зависит от конкретной решаемой задачи и может быть иерархическим. (Так, при поиске автомашины на коллективной стоянке сперва ищется объект по цвету и марке, а окончательно, конечно, он определяется по номеру).

Кластеризация и классификация осуществляются на основе методов теории принятия решений по перечню признаков внешнего вида (в n -мерном пространстве признаков). При классификации возможно еще сопоставление с эталонами (образцами), представляющими отдельные классы объектов. Эти эталоны обычно являются обобщенными геометрическими или символьными моделями, сохраняющими только необходимые для распознавания характерные признаки (стол, стул).

Основной метод сопоставления с эталонными геометрическими моделями как и верификации — это совмещение структур изображения и модели (обычного по двум характерным точкам) с предварительным масштабированием и ориентацией (поворотом) изображения.

При трехмерных изображениях объектов они обычно распознаются по двумерным проекциям, а третья координата используется для определения взаимного расположения объектов. Вместе с тем существуют методы и объемного распознавания. В частности, известен метод совмещения 3D изображений с 3D геометрическими моделями, образованными из примитивов типа цилиндр, параллелепипед и т. п. (Здесь совмещение производится уже по трем характерным точкам.)

Вычислительные методы обработки изображений развиваются уже в течение более 30 лет. Вначале использовались большие ЭВМ, затем с появлением персональных компьютеров они стали основным аппаратным обеспечением для этих методов. В настоящее время существуют десятки программ обработки изображений

и распознавания образов, в том числе лиц, отпечатков пальцев, рукописных текстов, номеров автомашин, штрих кодов. Многие из них работают в реальном масштабе времени. Как правило, все они предполагают предварительный этап обучения (с учителем или самообучение).

Наряду с перечисленными задачами в СТЗ конкретного назначения могут решаться еще и различные сопутствующие задачи. К ним прежде всего относятся сжатие информации и ее хранение. Что касается последнего, то для решения задачи распознавания необходима база данных для изображений эталонов и прототипов, классифицированных по характерным геометрическим и словесным признакам.

Заметим, что большинство способов и приемов обработки изображений в СТЗ аналогичны существующим в живой природе и подсказаны физиологами и психологами.

Функции СТЗ: обзор видимой зоны, выделение отдельных объектов, их кластеризация, классификация или верификация, определение геометрических и оптических параметров внешней среды и ее объектов, комплексирование с другими сенсорными системами для определения различных физических и химических параметров внешней среды и ее отдельных объектов, визуализация информации от других сенсорных систем и от других источников.

Эти функции определяют назначение СТЗ в системах робототехники в виде обеспечения визуальной информацией систем автоматического управления и операторов систем автоматизированного управления средствами робототехники для выполнения различных технологических и других операций, требующих визуальной информации (мониторинг внешней среды, охрана, боевые операции, контроль качества изготавливаемых изделий, сервисное обслуживание людей и т. д.).

Рассмотрим, как решаются эти задачи.

СТЗ в системах управления манипуляторов

Здесь основная задача СТЗ — обеспечение манипуляционных операций, для выполнения которых требуется визуальная инфор-

мация. К таким операциям относятся взятие неориентированных и движущихся предметов, некоторые сборочные (монтажные) операции, операции дуговой сварки, резки, нанесения покрытий, визуальное обследование отдельных объектов.

В ходе выполнения подобных операций обычно предварительно требуется получение общей видеокартинки рабочей зоны манипулятора с выявлением необходимых для выполнения заданной операции объектов, а так же возможных препятствий, которые предстоит обходить. Первичная картина рабочей зоны затем обрабатывается — упрощается и обобщается с сохранением только той информации, которая требуется для последующего выполнения заданных манипуляционных операций.

В случаях, когда состояние рабочей зоны может со временем измениться, она должна непрерывно контролироваться с корректировкой ее видеокартинки. Для получения общей трехмерной картины рабочей зоны передающие видеокамеры должны соответственно размещаться вне этой зоны с разных ее сторон.

Перспективная задача СТЗ — это определение абсолютных координат рабочего органа манипулятора (относительно его основания). Для этого с разных сторон рабочей зоны должны быть установлены минимум три видеокамеры. Типовым решением является установка на рабочем органе видеомаяка, который и пеленгуется с помощью видеокамер.

Наконец, для оцувствления непосредственно рабочего органа манипулятора вблизи его на манипуляторе так же устанавливается видеокамера.

СТЗ в системах управления движением мобильных роботов

Здесь СТЗ должны обеспечивать решение двух задач — навигации и безопасности движения. В первом случае СТЗ формирует видеокартину (план) внешней среды в пределах видимости, во втором — обеспечивает обнаружение и преодоление или обход препятствий. При групповом применении роботов добавляется еще контроль их взаимного положения для обеспечения координированного совместного движения и совместного выполнения различных технологических операций.

Помимо размещения видеокамер на роботах может потребоваться так же организация видеонаблюдения со стороны за всей зоной их действия. Для этого вне этой зоны, в том числе и над ней, размещаются обзорные видеокамеры, а так же применяются специальные роботы — наблюдатели.

В системах навигации мобильных роботов широко применяется комплексирование СТЗ с другими сенсорными системами. Так, лазерные и радиолокаторы часто дополняют СТЗ для получения третьей координаты — дальности. Комплексировются СТЗ и с различными системами дальней навигации и с различными специальными сенсорными системами, необходимыми для выполнения роботами конкретных задач (поиск взрывчатых веществ, радиоактивных источников и т. д.).

СТЗ в системах управления роботами от оператора

В этих системах используется прежде всего видеоинформация от СТЗ, входящих в состав систем управления роботов. Кроме того, для получения дополнительной информации могут применяться и отдельные СТЗ, работающие только на пульт оператора.

Видеоинформация необходима оператору для оценки общей ситуации в окружающей робот среде и принятия адекватных решений по управлению, включая как выдачу заданий в систему автоматического управления робота, так и для оперативного управления роботом непосредственно оператором. Так, например, для управления мобильным роботом Pathfinder, исследующим Марс, оператор получает видеокартину с СТЗ на посадочном модуле. (Время передачи этой информации на Землю более 10 минут.) Впервые телеуправление напланетным аппаратом по информации от СТЗ было реализовано на советских Луноходах в 1970—73 годах. При создании подобных систем телеуправления важным требованием является обеспечить “эффект присутствия”, когда оператор получает так сформированную видео и другую информацию с борта управляемого им аппарата, что может представить себя находящимся непосредственно на его борту.

Для обеспечения наиболее качественного управления роботом со стороны оператора видеокартина, получаемая им от СТЗ робо-

та, обрабатывается в том числе с использованием технологий виртуальной реальности. При этом в нее вводится дополнительная информация, облегчающая оператору управление роботом. (Наносятся рекомендуемые траектории движения, численные значения различных параметров среды и т. п.). Для этого помимо видеоинформации на пульт оператора передается информация от других сенсорных систем.

Рассмотренные задачи СТЗ в робототехнике определяют следующие специфические требования к ним:

1. Универсальность, охватывающая практически для каждой конкретной СТЗ большую часть перечисленных выше функций.
2. Функционирование в реальном времени, определяемом назначением робототехнической системы, укомплектованной СТЗ.
3. Миниатюризация датчиков изображения, установленных на манипуляторах, и всей СТЗ для мобильных роботов.

Эти общие требования дополняются требованиями, связанными с конкретным назначением объекта, в состав которого входит СТЗ, от исполнения, определяемого внешними условиями, до задач анализа получаемой визуальной информации.

3.2. Датчики и аппаратура обработки видеоизображений

Датчики видеоизображения — это, как уже отмечалось, вакуумные передающие трубки и полупроводниковые матричные приборы из твердотельных ячеек, преобразующих световую энергию в электрический заряд. Наибольшее распространение среди последних получили приборы с зарядовой связью (ПЗС). В табл. 3.1 приведены характеристики таких датчиков, нашедших применение в СТЗ. Приведенные здесь КМОП датчики (матрицы) отличаются от ПЗС способом формирования выходного сигнала, что делает их более дешевыми, но за счет снижения чувствительности.

На рис. 3.4 и 3.5 показан внешний вид некоторых видеодатчиков.

Как выше уже было отмечено, предварительная обработка изображения, получаемого от видеокамер, обеспечивает снижение уровня помех, искажающих исходное изображение, повышение контрастности изображения и контуров. Кроме того первичная

Таблица 3.1

Датчики видимого спектра электромагнитного излучения.

№	Технические параметры	Видикон	ПЗС	КМОП
1	Чувствительный элемент	Покрытие CdSe	На базе МОП конденсатора	На базе МОП конденсатора
2	Разрешающая способность (тв. лин)	200–600	200–1600*	до 1700*
3	Отношение сигнал/шум (ДБ)	до 46	до 50	до 54
4	Чувствительность (ЛК)	16	до 0,00005	до 0,1

* В матрицах высокого разрешения

видеоинформация содержит обычно на порядки больший объем информации, чем необходимо для решения конкретных задач, решаемых СТЗ, и эту избыточную информацию необходимо так же убрать. Завершает предварительную обработку видеоинформации преобразование ее в цифровую форму, если видекамера аналоговая. Таким образом, в целом устройство предварительной обработки



Рис. 3.4 Телевизионная передающая камера на базе видикона. Внизу блок управления (фирма Диаконт, Россия)



Рис. 3.5 Телевизионная ПЗС камера (фирма ЭВС, Россия)

обеспечивает ввод видеоданных в цифровую аппаратуру анализа изображений в результате выполнения следующих операций:

- **Фильтрация.** Она осуществляется с помощью линейных низкочастотных фильтров и нелинейных фильтров, подавляющих импульсные помехи.

- **Контрастирование.** Оно заключается в выравнивании яркости элементов изображения.

- **Бинаризация.** Это преобразование исходного полутонового изображения в двухградационное (черно-белое), что позволяет резко сократить объем исходной видеоинформации в тех случаях, когда это допустимо для решения конкретных задач. (Например, выделения очертаний при распознавании текста и т. п.). Алгоритмы бинаризации осуществляют разделение всех элементов изображения на две группы по их яркости путем сопоставления с определенным выбранным порогом яркости.

- **Выделение контуров.** Это определение очертаний отдельных объектов и однородных областей внешней среды в виде границ скачкообразного изменения яркости, например, путем дифференцирования пространственной функции яркости. После этого обычно производится еще дополнительная обработка выделенных контуров с целью устранения разрывов и ложных контурных линий, вызванных, например, шумами.

- **Преобразование видеоинформации в цифровую форму** с помощью стандартных АЦП, если первичный видеодатчик аналоговый.

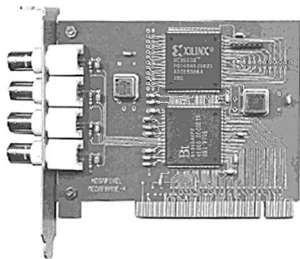


Рис. 3.6. Фреймграббер Меда Frame-4 (фирма Меда Pixel, Россия)

На рис. 3.6 приведен пример устройства преобработки видеосигналов телевизионного стандарта (фреймграббер) с четырьмя входами и 32 разрядным выходом.

На рис. 3.7 показано устройство преобработки для аналогового видеосигнала (в центре) в составе СТЗ на базе ноутбука.

Согласно схеме СТЗ на рис. 3.3 дальнейшая обработка видеоин-

формации осуществляется видеопроцессором, реализующим алгоритмы анализа видеoinформации в реальном времени.

Применительно к мобильной робототехнике существуют два базовых подхода реализации этой части СТЗ. Первый подход — это размещение на роботе минимального комплекта аппаратуры, например, только телекамер и радиопередатчика, а вся обработка сигналов производится на пункте управления у оператора. Очевидные недостатки этого подхода — предельно высокие требования к качеству радиоканала, а преимущества — низкая стоимость и возможность использования стандартных средств обработки, таких как персональные компьютеры и устройства расширения их возможностей.

Второй подход состоит в установке на роботе полного комплекта аппаратуры СТЗ. Недостатками такого подхода являются большая стоимость и большое энергопотребление собственно робота, а основное преимущество — повышенная автономность робота даже при потере связи с пунктом управления.

Реальные системы выполняются в виде некоторых промежуточных вариантов, оптимизированных для конкретных технических требований.

Основой для построения бортовых видеопроцессоров являются программируемые логические матрицы и цифровые сигнальные процессоры. На рис. 3.8. и рис. 3.9. приведены примеры промышленной ЭВМ и платы расширения, применяемых в СТЗ. Платы расширения увеличивают вычислительные воз-



Рис. 3.7. Аппаратура СТЗ с устройством предобработки DFG 1394 (Фирма The Umagin Source, США)



Рис. 3.8. Промышленная ЭВМ стандарта Mini ITX (фирма i Base, Тайвань)

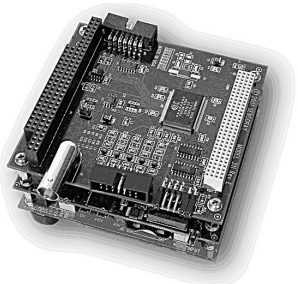


Рис. 3.9. Плата расширения формата Mini ITX (фирма AR00, США)

возможности ЭВМ, осуществляя дополнительную обработку видеoinформации перед передачей ее в ЭВМ.

В ЭВМ использован процессор Intel Pentium M с частотами до 2 ГГц и западная память DDR2 SDRAM на 1 Гбайт. Диапазон температур -40 — $+85$ °С.

3.3. Бинокулярные и многокурные системы технического зрения

Бинокулярные СТЗ. Поскольку внешняя среда трехмерна, сенсорное обеспечение систем управления в общем случае должно иметь возможность давать именно такую 3D информацию об этой среде и об отдельных объектах. Существуют три основных способа получения информации о трехмерной сцене:

1. На основе двумерного образа по взаимному видимому расположению отдельных объектов дается оценка третьей координаты. Такие системы получили название 2,5-мерные (2,5D).

2. Монокулярная СТЗ дополняется каким-либо дальномером, который определяет третью координату — дальность.

3. Стерео СТЗ, содержащая две видеокамеры, разнесенные на определенное расстояние (базу) в плоскости перпендикулярной третьей координате — дальности.

Первый способ оценки глубины сцены наиболее прост и основан на использовании следующих приемов, отработанных в практической деятельности людей:

- Оценка расстояния до предмета на основе знания его размеров.

- Использование при наложении изображения предметов друг на друга очевидного факта, что предмет, закрывающий другой предмет, находится ближе.

- Использование эффекта перспективы, заключающегося в визуальном сближении двух уходящих вдаль параллельных линий.

- Анализ световых эффектов — теней, бликов, и т. п.

Второй указанный способ — это, по существу, комплексирование, когда третья координата определяется не СТЗ, а другой системой.

Перейдем теперь к рассмотрению собственно стереосистемы. Две видеокамеры, разнесенные на определенное расстояние — базу, позволяют сформировать общее трехмерное изображение видимой сцены. Количественная оценка дальности до отдельных объектов, как известно, может быть определена как высота треугольника, образованного базой и направлениями от каждой камеры на этот объект. Для этого надо знать только угол между этими направлениями.

Практически получил распространение алгоритм оценки дальности непосредственно по величине расхождения (сдвига) изображений конкретного объекта на экранах двух видеокамер, которое называется диспаратностью. Процесс формирования трехмерной сцены по стереопаре изображений включает два этапа. На первом этапе устанавливается соответствие между двумя изображениями одной и той же сцены. После чего вычисляются величины диспаратности, по которым определяется третья координата отдельных точек каждого видимого объекта, а, следовательно, и его форма.

Установление указанного соответствия можно представить как процесс деформации совмещаемых изображений, как бы нанесенных на эластичные листы, до их совпадения. Эта операция формализована с помощью ряда алгоритмов — пирамидальный, псевдоградиентный и др. Идея пирамидального алгоритма, например, состоит в том, что пара сопоставляемых изображений посредством указанного деформирования последовательно совмещается сначала центрами яркости изображений, затем центрами яркости отдельных частей, начиная с четырех прямоугольников, на которые разбиваются изображения, и далее вплоть до совмещения отдельных пикселей.

Рассмотрим процедуру поиска соответствующих точек на двух изображениях, основанную на построении так называемых эпиполярных линий. Эпиполярная линия — это линия пересечения плоскости изображения плоскостью проведенной через луч зрения одной камеры и оптический центр другой камеры. На рис. 3.10 приведена соответствующая схема.

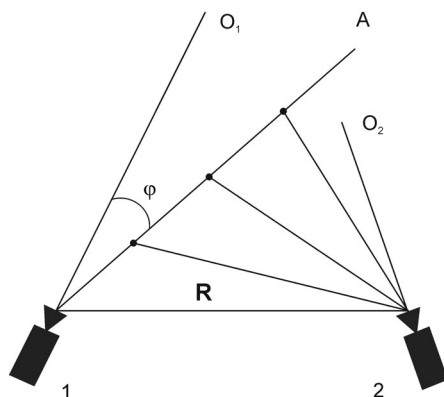


Рис. 3.10. Метод построения эпиллярных линий:
1,2 — видеокамеры; O_1, O_2 — их оптические оси

Предполагается, что видеокамеры откалиброваны, т. е. имеется таблица, в которой каждой пиксельной координате точки (x, y) поставлена в соответствие пара угловых координат — азимут φ и наклон θ , задающие направление (A) на данную точку из оптического центра камеры. Считаем также, что известно взаимное положение двух камер, заданное базой R , связывающей оптические центры двух камер, и матрицей углов поворота одной камеры относительно другой.

Возьмем на изображении, полученном с первой камеры, некоторую точку с координатами (x_1, y_1) . Этой точке на изображении с камеры 1 соответствуют два угла (φ, θ) , задающих луч A к данной точке. Зная взаимное положение двух камер чисто геометрически можно построить этот луч на изображении с камеры 2 — эпиллярную линию. После чего для каждой точки этой линии на изображении с камеры 2 можно проделать аналогичную операцию по отношению к камере 1 и построить свою эпиллярную линию, соответствующую эпиллярной линии на второй камере.

С помощью эпиллярных линий осуществляется нахождение точек на изображении с одной камеры, соответствующих точкам

на изображении с другой камеры, путем поиска их на этих линиях, соответствующим этим точкам.

Многоракурсные СТЗ. Принципиально новый подход в развитии стереосистем дает идея многоракурсной системы, заключающаяся в увеличении количества “точек зрения” (ракурсов). Помимо более высокого качества получения трехмерного изображения внешней среды многоракурсная СТЗ позволяет получать виртуальные объемные изображения ее отдельных объектов. Существует два основных способа формирования объемного изображения, основанных на этом принципе. Первый способ — это использование нескольких видеокамер, второй — использование мобильного робота или манипулятора с одной видеокамерой.

Рассмотрим принцип действия многоракурсных СТЗ на примере применительно ко второму варианту. Робот, обходя объект, делает его снимки с разных ракурсов. Затем на основе полученных кадров синтезируется 3D модель этого объекта. На рис. 3.11 пред-

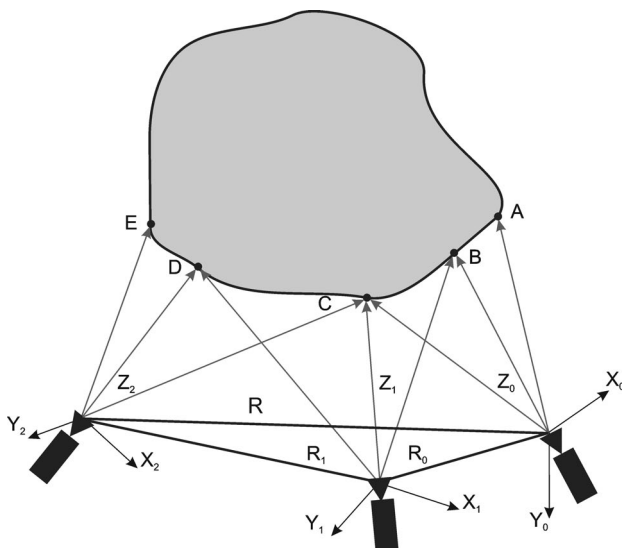


Рис. 3.11. Формирование 3D модели поверхности объекта в СТЗ на мобильном роботе

ставлена схема такой системы, соответствующая трем дискретным положениям робота.

Задача СТЗ сводится к определению расстояния D от камеры до некоторых характерных точек в абсолютной системе координат, связанной с неподвижной точкой, например, с первоначальным положением камеры. Эта задача решается в следующем порядке:

- идентификация точек на поверхности объекта, т. е. установление соответствия между точками, зафиксированными с разных ракурсов;

- вычисление дальности до этих точек.

На основе полученных значений дальности для выбранных точек осуществляется стандартными средствами (например, OpenGL, DirectX) построение 3D изображения объекта. Полученная трехмерная компьютерная модель объекта передается оператору на дисплей компьютера в наиболее удобной форме, в том числе с возможностями вращения объекта, построения проекций и др. На рис 3.12 приведен алгоритм вычисления дальности до характерных точек поверхности объекта и последующего построения 3D модели этого объекта.

Известно, что для повышения точности определения дальности необходимо увеличивать базу, а для повышения точности решения задачи идентификации точки на нескольких изображениях желательно расстояние между очередными точками съема визуальной информации уменьшать. В рассматриваемой монокулярной СТЗ необходимо, следовательно, выбирать оптимальное расстояние между соседними позициями робота (ракурсами), на которых СТЗ осуществляет съем кадров в соответствии с требуемой погрешностью.

Значение величины базы R определяется по известной зависимости погрешности определения дальности от величины базы. Перед вычислением дальности решается задача идентификации точки на двух изображениях. Для обеспечения требуемой точности ее решения вычисленное значение базы R разбивается на n равных частей, так чтобы при каждом смещении камеры на расстояние R/n задача идентификации решалась с требуемой точностью. После выполнения n последовательных съемов изображения и решения

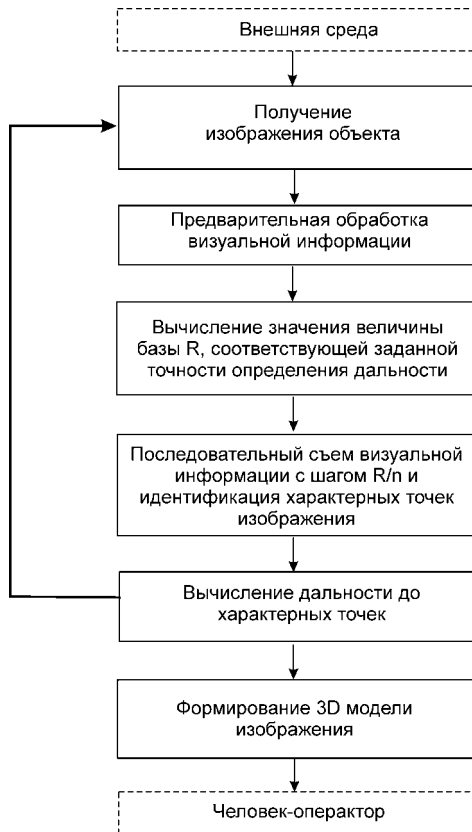


Рис. 3.12. Алгоритм определения дальности до точек на поверхности объекта в СТЗ на мобильном роботе

на каждом шаге задачи идентификации характерных точек исходного изображения на последнем n -ом шаге определяется расстояние до этих характерных точек описанными выше методами.

Наряду с рассмотренным вариантом применения многокурсовой СТЗ на мобильном роботе для получения трехмерной общей картины внешней среды, такая система, как было отмечено, может использоваться для получения объемного виртуального образа от-

дельных объектов этой среды или комплекта его проекций, путем осмотра их со всех сторон.

С помощью рентгеновской или любой другой системы интроскопии такая СТЗ может применяться и для получения объемных интроскопических изображений отдельных объектов и сред, подобно томографии, но с большими информационными возможностями формирования соответствующих моделей виртуальной реальности.

3.4. Алгоритмы систем технического зрения

Принципиальное отличие СТЗ, применяемых в робототехнике, состоит в чрезвычайно широком диапазоне как подлежащих выполнению задач, так и условий их выполнения. Большинство имеющихся на рынке СТЗ для промышленных и других применений являются специализированными, т. е. предназначены для выполнения сравнительно узкого класса задач при вполне определенных внешних условиях. В отличие от таких СТЗ в робототехнике требуется определенная универсальность, а это означает, что они должны быть адаптивными, т. е. в самом общем случае иметь переменную структуру и настройку параметров. Это может осуществляться с помощью оператора или автоматически. На рис. 3.13 показана соответствующая функциональная схема СТЗ.

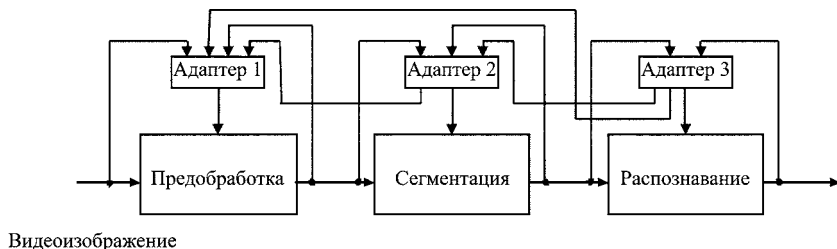


Рис. 3.13. Схема адаптивной СТЗ

В соответствии с описанными в параграфе 3.1 основными задачами, решаемыми СТЗ, их алгоритмическое обеспечение в общем случае включает:

- алгоритмы предварительной обработки информации, получаемой от датчиков изображения;
- алгоритмы сегментации изображений и выделения характерных признаков;
- алгоритмы кластеризации, классификации и верификации объектов внешней среды.

Схема на рис. 3.13 реализует соответствующие этапы обработки информации: предварительная обработка, сегментация с выделением информативно значимых признаков, распознавание образов. На схеме показаны варианты структурной и параметрической адаптации на каждом из трех уровней и в общих контурах оптимизации, охватывающих несколько уровней. Это осуществляется тремя устройствами адаптации.

На уровне предобработки, осуществляющем общее повышение качества изображения, используются алгоритмы обработки сигналов от видеодатчиков, основанные на сложившихся методах построения информационно-измерительных систем различного назначения.

Уровень сегментации и выделения значимых для последующего распознавания признаков, использует следующие алгоритмы:

- выделение областей по яркости и цвету;
- выделение контуров;
- выделение движущихся объектов;
- выделение геометрических, частотных и др. информативных признаков изображения.

Типичный метод выделения контуров — это вычисление градиента и пороговое разделение, определяющее разрывы в интенсивности изображения, в том числе и на границе объекта и фона.

Уровень распознавания образов по выделенным признакам использует следующие типы алгоритмов:

- реализующие различные решающие правила (вероятностные, байесовы, минимаксные, максимума правдоподобия и т. п.);
- алгебраические (вычисления оценок потенциальных функций, логические, синтаксические);
- ассоциативные (корреляционные и др.).

Как было показано в параграфе 3.1, задача распознавания образов имеет три варианта — кластеризацию, классификацию и верификацию. Для их решения существуют соответствующих три подхода: на сравнении изображения объекта с эталонным, по анализу характерных признаков и по анализу структуры.

Первый подход заключается в совмещении изображения распознаваемого объекта с эталоном (образцом) путем поворота, масштабирования и переноса.

Второй подход — параметрический основан на переходе от исходного образа к набору характеризующих его вербальных признаков — дескрипторов, по которым и осуществляется распознавание. Такими признаками могут быть геометрические параметры (размеры, форма, симметричность, цвет и его неравномерность и т. д.). В пространстве этих признаков каждый объект представляется точкой, а каждому классу образов соответствует определенная область этого пространства. (Ее центр, очевидно, соответствует эталону в первом подходе). Задача распознавания заключается в определении, к какой из этих областей принадлежит точка, соответствующая данному образу.

Третий подход основан на структурном описании образов. Он применяется для распознавания наиболее сложных образов, для описания которых требуется очень большое число признаков, что заставляет переходить к более обобщенному структурному описанию и соответственно структурным признакам. Этот подход называется лингвистическим, т. к. такие сложные объекты могут описываться только лингвистически. Соответственно и их признаки тоже являются лингвистическими, т. е. синтаксическими.

Эти три подхода могут применяться в комбинации с целью повышения качества, т. е. точности и достоверности распознавания, параллельно или последовательно. В первом случае окончательное решение по распознаванию образа принимается в результате выбора наиболее достоверного из полученных различными способами. Он получил название коллективного распознавания образов. Второй случай может, например, использоваться при решении задачи опознания конкретного объекта. Вначале определяются объекты, принадлежащие к соответствующему классу, а затем устанавли-

ливаются идентичность одного из них заданному образцу, т. е. осуществляется верификация.

Повышение качества распознавания образов при применении нескольких параллельно работающих классификаторов достигается за счет того, что в этих классификаторах могут использоваться различные признаки и алгоритмы распознавания. При этом для каждого очередного подлежащего распознаванию образа эффективность отдельных классификаторов будет различной и какой-то из них будет давать наилучшее решение.

Существует два способа коллективного распознавания — иерархический и с определением наиболее “компетентного” классификатора.

Система распознавания по первому способу включает два уровня классификаторов. Первый уровень составляют “базовые” классификаторы, на которые параллельно подается распознаваемое изображение, а второй уровень образует выходной классификатор, который выбирает из всех решений базовых классификаторов одно в качестве окончательного, выходного. Одним из способов этого выбора является голосование. При статистических методах распознавания в базовых классификаторах выходное решение определяется просто как решение, имеющее наибольшую вероятность.

При втором способе коллективного распознавания для каждого входного образа определяется один “компетентный” классификатор и его решение принимается за выходное. Выбор такого классификатора осуществляется с помощью специального алгоритма, который заключается в следующем. Все пространство признаков можно разделить на области “компетенции” отдельных классификаторов, где они дают наиболее точное решение по сравнению с другими классификаторами. Границы этих областей формируются в ходе обучения классификаторов и определяют выбор компетентного классификатора для каждого входного изображения.

Основные задачи при синтезе систем коллективного распознавания — это выбор классификаторов, т. е. методов распознавания, и выбор выходного решения.

Наиболее распространенный подход к распознаванию двухмерных объектов основан на сопоставлении с эталоном. По двух-

мерным изображениям возможно распознавание и трехмерных объектов, включая их третью координату — глубину, дальность.

Распознавание трехмерных объектов по их 3D изображениям так же может осуществляться подобно двумерным, путем совмещения с эталонами или по характерным признакам хотя, конечно, задача в этом случае значительно сложнее прежде всего из-за очевидного усложнения эталонов и соответственно большей размерности пространства признаков.

Возможным завершением процесса анализа видеоизображений может быть и реконструкция трехмерных объектов, например, в среде виртуальной реальности.

3.5. Примеры применения систем технического зрения

Примером использования СТЗ для управления космическими манипуляторами является система управления двумя бортовыми манипуляторами многоцветного космического корабля “Буран”. Манипуляторы размещены с двух сторон грузового отсека корабля и управляются оператором с пульта управления. Две размещенные там же передающие телекамеры со светильниками, имеющие две



Рис. 3.14. Космический манипулятор ДОРЕС (ЦНИИ РТК, Россия)

степени подвижности, тоже управляются с пульта. На кистевых звеньях манипуляторов установлено еще по телекамере.

Оператор может управлять манипуляторами по видеоинформации на экране пульта, получаемой от этих телекамер. На основании этой информации в управляющем устройстве манипуляторов осуществляется синтез траекторий их движения с распознаванием и обходом возможных препятствий. По этой информации реализуется так же автоматическое программное управление выполнением типовых операций.

На рис. 3.14 показан манипулятор ДОРЕС, предназначенный для выпол-

нения различных технологических операций снаружи космических аппаратов.

СТЗ манипулятора включает две передающие камеры, дающие общую трехмерную картину рабочей зоны манипулятора, и камеру, размещенную вместе со светильником на захватном устройстве манипулятора. При выполнении инспекционных операций для получения детальных объемных изображений отдельных объектов эта камера может использоваться для многокурсного их осмотра со всех сторон путем перемещения ее манипулятором.

На основе информации, получаемой от СТЗ, в управляющем устройстве осуществляется распознавание объектов внешней среды, формируется ее модель и синтезируются программные траектории для выполнения различных технологических операций. Время распознавания $\sim 0,2$ с, погрешность ориентации $\sim 1^\circ$.

На рис. 3.2 был показан робот Антитеррорист, входящий в состав робототехнического комплекса, предназначенного для поиска и изъятия или уничтожения опасных объектов. В состав робота входят СТЗ с двумя цветными передающими камерами — одна обзорная на двухступенной платформе со светильником, другая — на конце манипулятора и рентгеновская система интроскопии подозрительных предметов (сумок, портфелей и т. п.), перемещаемая манипулятором. Пульт оператора связан с роботом радиоканалом. Рентгеновская система состоит из рентгеновского излучателя и приемного детектора с видеопроцессором. На рис. 3.2 показан пример обследования дипломата с демонстрацией кадра, переданного видеопроцессором на экран пульта оператора. Разрешающая способность рентгеновской системы — доли миллиметра через стальную преграду толщиной до 10 мм.

На рис. 3.15 показан радиоуправляемый робот РТК-05, предназначенный для поиска и эвакуации радиоактивных источников. Пульт оператора был показан на рис. 3.1. Робот комплектуется сенсорами гамма, альфа и бета излучений. Управление роботом осуществляется оператором через бортовую ЭВМ, связанную с пультом оператора. Робот оснащен пятью телевизионными камерами.

Три камеры расположены на звеньях манипулятора и две — на двухпозиционных платформах, размещенных на шасси робота.



Рис. 3.15. Робот — разведчик РТК-05 (ЦНИИ РТК, Россия)

Сенсоры ионизирующих излучений так же размещены на манипуляторе и на шасси робота. Они осуществляют круговой обзор и определение направления на обнаруживаемые источники излучения на дальности до 50 м.

Система управления робота обеспечивает автономный поиск источников ионизирующих излучений, продвижение к ним, их взятие и помещение в транспортный контейнер. Оператор может вмешиваться в этот процесс, корректируя направление и скорость движения робота. На экране пульта оператор видит получаемое от СТЗ изображение обследуемой территории с нанесенной картой радиационной обстановки и выделенными локальными источниками излучения с указанием их параметров. СТЗ обеспечивает так же обход препятствий при движении к обнаруженным источникам, их взятие и помещение в контейнер.

Система стереозрения обеспечивает получение трехмерной информации о внешней среде на дальности 1–12 м. Погрешность определения дальности — 5–10 см, а определения направления на объекты — 10^0 .

Глава четвертая

СИСТЕМЫ СИЛОМОМЕНТНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ РОБОТОВ

4.1. Задачи силомоментного очувствления

Назначение роботов как аналогов человека предполагает развитое их взаимодействие с внешней средой путем выполнения различных действий с объектами этой среды. Основным средством для этого служат манипуляторы. Чтобы выполнять эти функции система управления манипулятора должна получать информацию о его положении, перемещении и силовом взаимодействии с внешней средой, т. е. иметь средства очувствления — соответствующие сенсоры. Даже для выполнения самой простой операции взятия и переноса какого-либо предмета, особенно хрупкого, необходимо помимо координат схвата манипулятора контролировать усилие захвата, чтобы с одной стороны не повредить, а с другой не опустить этот предмет. Тем более необходима информация об усилии для выполнения более сложных силовых операций. Таким образом, в общем случае для управления манипуляторами необходимо использовать два вида информации — о положении рабочего органа и о силе взаимодействия его с объектами внешней среды. Что касается первой задачи, то она еще до робототехники получила решение, в частности, в станкостроении.

Совершенно другая ситуация с задачей управления по силе. По существу, это оказалось серьезной научно-технической проблемой и прежде всего именно для робототехники. Значительный задел по решению этой проблемы был накоплен в разработках копирующих манипуляторов, которые явились одними из предшественников

современной робототехники. Первые существенные результаты были получены при создании копирующих манипуляторов, в которых был реализован эффект отражения усилия. Он заключается в том, что оператор, перемещающий задающий манипулятор, ощущает своей рукой противодействующее усилие, пропорциональное усилию, с которым рабочий орган исполнительного манипулятора действует на объекты внешней среды. Для получения такого эффекта первоначально были использованы синхронные передачи между степенями подвижности задающего и исполнительного манипуляторов, а затем следящие системы с датчиками момента на исполнительной и задающей осях степеней подвижности.

После создания систем управления манипуляторами с помощью задающих рукояток в них для выполнения силовых операций было введено управление по вектору силы, а для получения эффекта отражения усилия — обратная связь по силе, развиваемой рабочим органом исполнительного манипулятора.

В ходе развития современной робототехники и появления оцувствленных роботов с адаптивным управлением наступила очередь их силового оцувствления для освоения в автоматическом режиме различных операций, требующих приложения усилия или просто контроля его величины. К таким операциям относятся:

- манипуляционные операции механической обработки (абразивная зачистка, шлифование, полировка, резка и т. п.);

- сборочные операции (вставление стержня в отверстие, резьбовые соединения и т. п.);

- действия с различными органами управления (рукоятка, тумблер, кнопка), поворот вентиля, руля, открытие двери, люка и т. п.;

- упомянутые выше манипуляционные операции с хрупкими и легко деформируемыми объектами, включая людей (больные, раненные, инвалиды).

Кроме того, силовое оцувствление манипуляторов необходимо при ошупывании предметов и для предотвращения ударов о препятствия. Для этих целей часто возможно так же применение более простых тактильных датчиков, которые могут рассматриваться как простейший вариант датчика силы.

Наконец, для мобильных роботов силовое очувствление может требоваться для оснащения различного навесного оборудования, требующего такого очувствления (нож бульдозера и т. п.), и в системах передвижения. В последнем случае типовыми применениями силового очувствления являются силомоментное управление движением, применение датчиков силы в системах предотвращения удара об объекты внешней среды и, конечно, силовое очувствление ног (педипуляторов) шагающих систем передвижения. В последнем случае применяется позиционно-силовое управление, аналогичное такому управлению манипуляторов.

Такова общая картина развития в робототехнике систем управления с использованием информации об усилиях. Еще долго будут существовать операции, которые не удастся автоматизировать или их качественнее выполняет человек. Поэтому наиболее общим подходом к решению задач выполнения операций, требующих силового очувствления, является комбинированное автоматическое и автоматизированное (в основном с помощью задающих рукояток) позиционно-силовое управление. Такой подход помимо возможности подключения человека, когда пасует автоматика, позволяет непрерывно наращивать возможности последней по мере отработки соответствующих алгоритмов при управлении от человека и обучению им систем автоматического управления[3].

4.2. Способы и средства силового очувствления

Наиболее сложная силовая информация необходима для управления манипуляторами в силу того, что здесь может потребоваться очувствление по большему числу степеней подвижности рабочего органа манипулятора. В самом общем случае это три составляющих вектора силы и три момента по углам ориентации. Поэтому часто применяется термин “силомоментное” очувствление. В предельно простом случае такое очувствление может быть ограничено только одним линейным усилием или моментом по одной угловой координате. Например, это относится к операции зачистки плоской поверхности или внутренней поверхности цилиндра.

Функциональная схема соответствующей системы очувствления имеет типовую структуру, включающую собственно датчики силы (момента), предусилитель и блок обработки информации, где осуществляется необходимое преобразование выходного сигнала датчика.

Конечно, главным элементом системы силового очувствления являются датчики силы, выдающие первичную информацию о силе (моменте). Принцип действия большинства этих датчиков основан на использовании упругого элемента, деформирующегося под действием усилия, и определении величины этой деформации как его меры.

Величина деформации в свою очередь определяется с помощью различных датчиков, преобразующих перемещение в электрический сигнал, чаще всего фотоэлектрических, пьезоэлектрических, тензорезистивных.

Одними из наиболее точных и чувствительных таких преобразователей являются фотоэлектрические. На рис. 4.1 показан силомоментный датчик с таким фотоэлектрическим преобразователем. В качестве источника света используется лазерный светодиод. Лазерный луч проецируется на деформируемый упругий элемент и, отражаясь, попадает на поверхность фотодиодного преобразователя в виде набора фотодиодов. Аналоговый выходной сигнал датчика определяется положением светового пятна на поверхности этого преобразователя.

На рис. 4.2 показаны датчики силы на пьезопреобразователях. На рис. 4.3 показан пример получивших широкое распространение тензорезистивных датчиков силы. В табл. 4.1 приведены характеристики некоторых силомоментных датчиков.

Существует три основных варианта размещения силомоментных датчиков на манипуляторе: в шарнирах манипулятора, у рабочего органа и непосредственно на рабочем органе. На рис. 4.4 показаны примеры установки датчиков у рабочего органа.

Наряду с устройствами непосредственного определения силы существуют так же различные косвенные способы оценки силы с помощью вычислительных устройств, так называемых **наблюдателей**.

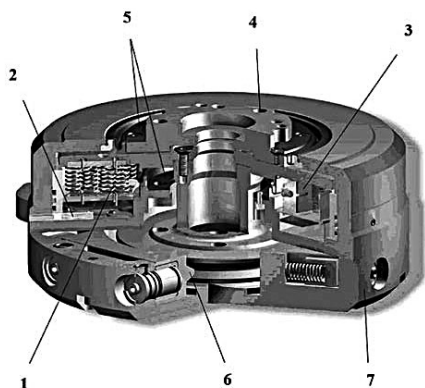
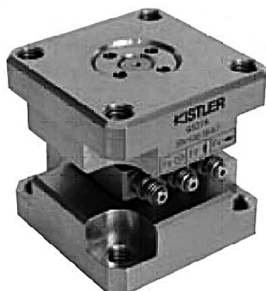


Рис. 4.1. Шести компонентный силомоментный датчик FTC-L-50-40 (фирма SCHUNK, США):

1 — упругий элемент; 2 — волоконно-оптический интерфейс; 3 — фотодиодный преобразователь; 4 — узел крепления датчика; 5 — сильфонные уплотнения для защиты от пыли; 6 — блокиратор (защита от перегрузок); 7 — алюминиевый корпус

а)



б)



Рис. 4.2. Силовые датчики на пьезопреобразователях:
а — трех компонентный датчик силы 9328А (фирма Kistler, Германия); б — шести компонентный силомоментный датчик Gamma (фирма ATI, США)



Рис. 4.3. Шести компонентный силомоментный датчик на тензорезисторах СМД (ЦНИИМаш, Россия).

Справа — датчик со снятым кожухом

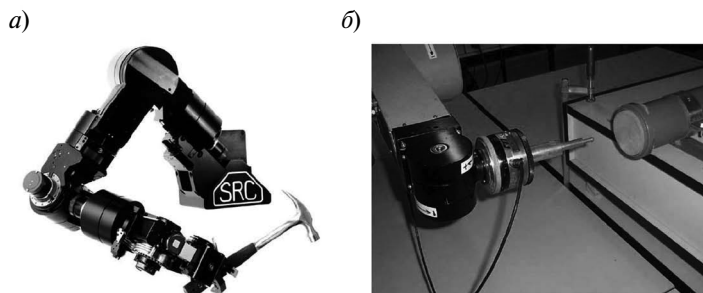


Рис. 4.4. Варианты размещения силомоментного датчика у рабочего органа манипулятора:

а — манипулятор Sarcos Dextrous Arm (МТИ, США), *б* — манипулятор PUMA (фирма UNIMATE, США)

Технические характеристики силомоментных датчиков

Характеристики	СМД ЦНИИМаш	9328A Kistler	Gamma ATI	FTC-L-50—40 SCHUNK
Габаритные размеры, мм	60×50	65×65×65	75×33	144×42
Вес, кг	0,3	0,39	0,25	0,96
Сила максимальная, Н	30	2500 (XY), 5500(Z)	130 (XY) 400 (Z)	150
Момент силы максимальный, Нм	5	—	10	8

Например, развиваемый электрическим двигателем момент можно оценить по величине тока питания. По этим данным с помощью математической модели механической системы манипулятора может быть рассчитано результирующее усилие в рабочем органе манипулятора. Предложены различные алгоритмы и схемы наблюдателей, которые дают оценку этого усилия.

При невысоких требованиях к точности определения усилия такие устройства могут быть предпочтительнее датчиков силы, т. к. они существенно дешевле и проще, не требуют вмешательства в конструкцию манипулятора. Наблюдатели могут также применяться в комбинации с силомоментными датчиками.

Применение наблюдателей силы — сравнительно новое направление в робототехнике. Известны три их основных типа, основанные на использовании разных математических моделей манипулятора:

- полной модели манипулятора с приводами;
- модели без системы приводов с использованием датчиков соответствующих промежуточных переменных;

— модели, подстраиваемой по рассогласованию с показателями датчиков реального манипулятора.

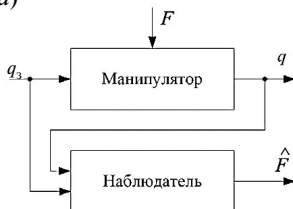
В первом типе наблюдателя (рис. 4.5) используется математическая модель механической системы манипулятора с системой приводов

$$A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q) = Q_{\text{д}} - Q_{\text{внут}} - J^T(q)F.$$

Здесь q — координаты звеньев манипулятора, $A(q)$, $b(\dot{q}, q)$ и $c(q)$ — соответственно матрица инерции, вектор скоростных сил (центробежных, кориолисовых и др.) и вектор статических сил тяжести, $Q_{\text{внут}}$ — внутренние возмущающие силы, F — внешние возмущающие силы, действующие со стороны внешней среды, $J^T(q)$ — транспонированная матрица Якоби $J(q) = \frac{\partial f(q)}{\partial q}$, с помощью которой

осуществляется пересчет F в систему относительных координат для отдельных звеньев манипулятора.

а)



б)

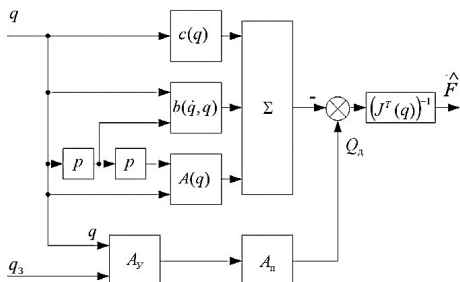


Рис. 4.5. Наблюдатель силы на основе математической модели манипулятора с системой приводов:

а — схема соединения наблюдателя с манипулятором; б — структурная схема наблюдателя

На вход модели подаются с датчиков текущие значения составляющих вектора обобщенных координат и управляющие воздействия на приводы. В результате решения задачи динамики

находится оценка силы взаимодействия рабочего органа манипулятора с внешней средой

$$\hat{F} = \left(J^T(q) \right)^{-1} \{ Q_d - A(q)\ddot{q} - b(\dot{q}, q) - c(q) \}.$$

Математическая модель, используемая во втором указанном выше типе наблюдателей существенно проще, т. к. это модель только механической системы манипулятора с оценкой усилий приводов при помощи соответствующих датчиков. В случае электрических двигателей это могут быть простые датчики тока питания (см. рис. 4.6). В этом случае имеем:

$$\hat{F} = \left(J^T(q) \right)^{-1} \{ Q_d - [A(q)\ddot{q} + b(\dot{q}, q) + c(q)] \},$$

$$Q_d = f(I_{\text{я}}),$$

где $I_{\text{я}}$ — ток в цепи якоря двигателя.

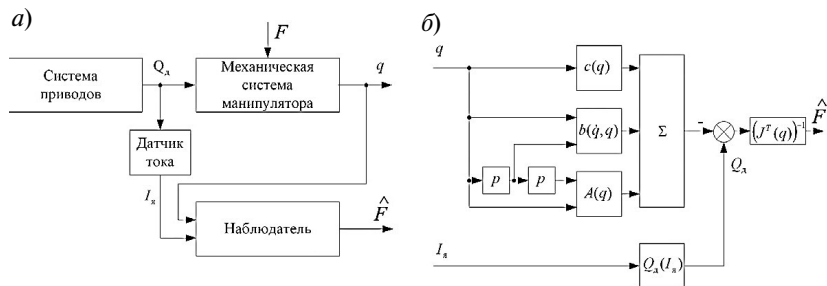


Рис. 4.6. Наблюдатель силы на основе математической модели механической системы манипулятора и информации о движущем усилии приводов (в виде силы тока в цепи якоря двигателя):

a — схема соединения наблюдателя с манипулятором, *б* — структурная схема наблюдателя

На рис. 4.7 представлена функциональная схема последнего указанного выше типа наблюдателя силы с подстройкой по рассогласованию. Сигнал подстройки формируется в виде рассогласования координат q модели и реального манипулятора. Идея этого наблюдателя состоит в том, что в модели манипулятора

отсутствует искомая сила F , поэтому она и является причиной указанного рассогласования, которое таким образом может служить мерой F .

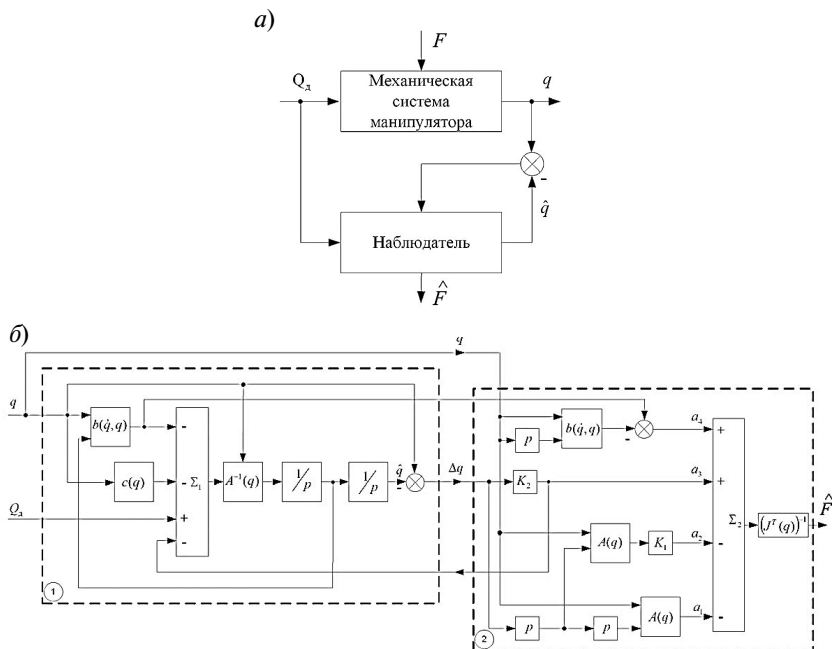


Рис. 4.7. Наблюдатель силы с подстройкой по рассогласованию:

a — схема соединения наблюдателя с манипулятором; b — структурная схема наблюдателя: 1 — модель механической системы манипулятора, 2 — вычислитель \hat{F}

Для всех вариантов наблюдателей основное очевидное условие, определяющее точность оценки силы, — это адекватность используемой математической модели манипулятора. Поэтому последняя должна периодически подстраиваться. Одним из способов такой подстройки является использование моделей на базе обучаемых нейронных сетей. На рис. 4.8 показана соответствующая схема наблюдателя. Здесь пунктирной стрелкой показан канал подстройки модели, который включается до начала силового взаимодействия с внешней средой, т. е. при $F=0$. В этом режиме равенство нулю

сигнала подстройки означает идентичность модели самому манипулятору.

Рассмотренный способ оценки силового взаимодействия манипуляторов с объектами внешней среды при помощи наблюдателей примерно вдвое уступает современным датчикам силы по точности и быстродействию. Это ограничивает возможную область применения этого привлекательного своей простотой и дешевизной способа силового очувствления. Перспективы развития систем с наблюдателями силы соответственно

связаны прежде всего с повышением точности и быстродействия используемых в них наблюдателей, в том числе путем совершенствования способов подстройки, а также использования дополнительных датчиков промежуточных переменных [3].

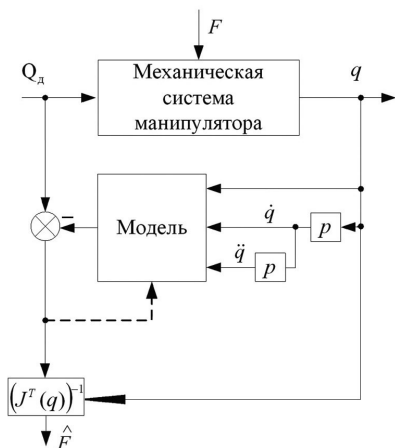


Рис. 4.8. Наблюдатель силы на основе нейронной сети

4.3. Силовое очувствление систем управления роботов

Силовое очувствление манипуляторов роботов, как выше указано, требуется прежде всего для обеспечения позиционно-силового способа управления его степенями подвижности. Во первых, это может осуществляться путем раздельного управления по силе и по перемещению различными степенями подвижности. Например, на операциях зачистки или шлифовки поверхности по направлению, перпендикулярному этой поверхности, осуществляется управление по силе, а по остальным — позиционное управление, обеспечивающее ее сканирование. Более общим является совместное позиционно-силовое управление по одним и тем же степеням подвижности, обеспечивающее силовое воздействие на объект внешней среды в функции от перемещения или, наоборот, пере-

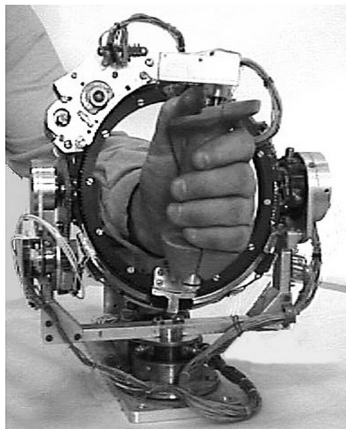


Рис. 4.9. Задающая рукоятка
МГТУ (Россия)

мещение в функции развиваемого при этом требуемого силового воздействия.

При управлении манипулятором от человека-оператора с помощью задающих рукояток силовое ощущение требуется для этих рукояток. Как выше отмечено, в этом случае сигналы от составляющих вектора контролируемого усилия подаются на приводы соответствующих степеней подвижности задающей рукоятки, обеспечивая тем самым ощущения оператором этого усилия. На рис. 4.9 приведен пример такой очувствленной задающей рукоятки.

Рукоятка представляет собой трехстепенной карданный подвес, связанный с шестистепенным тензодатчиком, тремя потенциометрами и тремя моментными загрузителями, создающими эффект отражения усилий. Задающий сигнал управления перемещениями формируется тензодатчиками, а углами — потенциометрами. Устройство обеспечивает регистрацию трех линейных и трех ориентирующих координат в пространстве, ограниченном кубом со стороной 30 см.

Особенность использования силового очувствления в системах управления передвижением мобильных роботов по сравнению с управлением манипуляторами состоит в том, что основным способом такого управления является не позиционно-силовое, а скоростно-силовое управление как у всяких транспортных систем с переходом к позиционно-силовому управлению только на этапах остановки.

Глава пятая

МНОГОСЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ

5.1. Особенности использования и обработки сенсорной информации в многосенсорных системах

Как выше было показано, в составе развитых адаптивных и тем более интеллектуальных робототехнических систем обязательно имеются сенсорные системы различного назначения и принципа действия. Примером может служить робот, показанный на рис. 3.15. В этой связи возникает задача их согласованного функционирования, которая включает следующие два аспекта:

1) обеспечение согласованного и взаимодополняющего функционирования сенсорных систем;

2) совместное решение общих задач несколькими сенсорными системами;

Типовые задачи, относящиеся к первому аспекту:

— повышение достоверности и надежности сенсорной информации путем дублирования сенсоров, основанных на различных физических принципах действия;

— расширение диапазона действия путем разбиения его на поддиапазоны с применением в них различных сенсорных систем;

— повышение точности сенсорной информации путем совместного применения широкодиапазонной, но недостаточно точной системы, и точной системы, но работающей в узком диапазоне измеряемой величины.

Типовые задачи, относящиеся ко второму аспекту:

— определение параметров объектов внешней среды, являющихся функцией информации от нескольких сенсоров;

— распознавание объектов по совокупности признаков, выявляемых разными сенсорными системами.

Особенностью последнего аспекта задачи является необходимость системного подхода к совокупности совместно работающих сенсорных систем, основанного на общих критериях. Именно такой подход будем называть комплексированием в узком смысле и он рассмотрен ниже.

Согласование совместно работающих сенсорных систем включает:

— обеспечение их совместимости и исключение взаимных помех;

— согласование во времени, включая синхронизацию по крайней мере на уровнях обработки различной сенсорной информации, на которых осуществляется их совместное использование в реальном времени;

— согласование аппаратной реализации обработки информации различных сенсорных систем с максимальной унификацией;

— объединение в единой структуре — централизованной, децентрализованной или комбинированной.

В предыдущих главах уже были рассмотрены примеры совместного использования нескольких сенсорных систем. Во второй главе описано совместное применение спутниковой навигационной системы и инерциальной измерительной системы. Оно позволяет скомпенсировать их недостатки и полностью использовать достоинства: долговременную точность обеспечивает первая система, у которой, как у инерциальных систем не накапливается погрешность во времени, а кратковременная пропажа ее сигналов (затенение спутников зданиями, горами и т. п.) компенсируется инерциальной системой. В третьей главе описано определение величины активности радиоактивных источников, обнаруживаемых роботом Разведчик, по информации, получаемой от СТЗ, локатора и дозиметра. Там же указаны варианты комплексирования СТЗ с локаторами для дополнения видеоизображения значениями дальности и с различными системами навигации. В четвертой главе при рассмотрении силомоментного очувствления манипулято-

ров описаны различные варианты совместного использования информации от датчиков перемещения и усилия в алгоритмах позиционно-силового управления движением.

На рис. 5.1 показан состав многосенсорной информационно-измерительной системы робота.

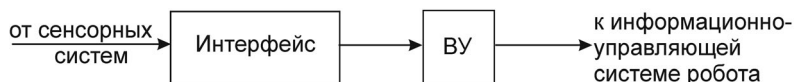


Рис. 5.1. Многосенсорная информационно-измерительная система

Информация от сенсорных систем поступает на многоканальный интерфейс, в том числе дистанционно и через системы связи. Затем она обрабатывается вычислительным устройством ВУ с получением многомерной комплексной сенсорной картины внешней среды нужной степени обобщения и формы для последующего формирования моделей среды и принятия решений о поведении робота с максимальным распараллеливанием для повышения быстродействия.

Собственно интерфейс может быть трех типов: аналоговый, цифровой дуплексный и цифровой сетевой.

Аналоговые интерфейсы предназначены для первого поколения сенсорных систем и включают аналогоцифровые преобразователи аналоговых сенсорных сигналов.

Цифровые дуплексные интерфейсы появились позже и предназначены для сенсорных систем следующего поколения с цифровым выходом. Примеры таких стандартизированных интерфейсов: RS-232, RS-485, ARINC 429.

Наконец, третий тип интерфейса — это цифровые сетевые интерфейсы, которые находят все большее применение особенно при создании наиболее сложных многосенсорных систем. Здесь передача сенсорной информации осуществляется через коммуникационную сеть по стандартным сетевым протоколам, к которой с помощью контроллера подключено ВУ. Примеры такой сети: MIL STD 1553B, CAN, Ethernet. Этот тип интерфейса наиболее перспективен и обладает наилучшими показателями по быстродействию, надежности и стоимости [4].

5.2. Комплексирование сенсорных систем

Приведем классификацию систем комплексирования с точки зрения уровня комплексирования. Сенсорная информация в ходе обработки последовательно преобразуется из первичной информации во все более обобщенные формы и соответственно может комплексироваться на все более высоких уровнях. Различают пять таких уровней:

- 1) первичная сенсорная информация (первичные сигналы);
- 2) элементы сенсорной информации (например, пиксели матричных изображений в СТЗ);
- 3) образы объектов;
- 4) вербальные признаки, выделенные сенсорными системами;
- 5) символы (понятия) — верхний уровень комплексирования.

В табл. 5.1 приведены характерные особенности этих уровней комплексирования. Приведенная классификация является упрощенной и не учитывает некоторых деталей, которые могут быть существенными при рассмотрении конкретных систем. (Например, матричные изображения, поступающие обычно в виде удобном для анализа на уровне пикселей, обрабатывают часто с помощью математических методов, применяемых для обработки сигналов).

Следующий важный признак классификации — это степень универсальности сенсоров. Как уже отмечено, все сенсорные системы можно разделить на две группы:

- системы общего назначения;
- специальные системы, определяемые назначением конкретного робота.

Комплексирование сенсорных систем первой группы является типовой и поэтому наиболее отработанной задачей. Комплексирование специальных сенсоров друг с другом и с сенсорами общего назначения, очевидно, не может иметь общего решения, и поэтому представляет наибольшую трудность.

Проиллюстрируем рассматриваемую проблему на примере ее решения применительно к мобильному роботу Разведчик, предназначенному для обследования полей ионизирующих излучений и поиска радиоактивных источников (рис. 2.3). К сенсорным си-

Таблица 5.1

Уровни комплексирования сенсорной информации

Уровень Характеристика	Сигналы	Пространственно- временная сегментация	Образы	Признаки	Символы
Тип информации	Непрерывная и дискретная	Элементы образов	Образная	Символьные признаки	Понятия
Значимость информации	Низкая	Средняя	Более высокая	Более высокая	Высокая
Тип математической модели	Случайный процесс	Вероятностная модель	Вероятност- ный образ	Физико- химические признаки	Обобщенная символьная модель
Пространственно- временная плотность информации	Высокая	Менее высокая	Средняя	Средняя	Низкая
Способы совместного использования информации	Обнаружение и сопоставле- ние сигналов	Сопоставление и комбинирование	Сопоставле- ние и комби- нирование	Сопоставле- ние и объеди- нение	Логические и статистиче- ские
Эффективность комплексирования	Устранение несоответствий	Улучшение образ- ного представления информации	Повышение достоверно- сти	Выделение характерных признаков. Повышение точности	Повышение качества и точности информации

стемам общего назначения этого робота относятся системы навигации, наблюдения за окружающей средой и состоянием самого робота — это СТЗ, одометрические датчики, акселерометры, датчики положения звеньев манипулятора. Специальные сенсорные системы, предназначенные для контроля радиационной обстановки, описаны в параграфе 2.3 второй главы. Они включают азимутальный угломер и гамма-визор для поиска источников ионизирующих излучений (ИИИ) на большом расстоянии и гамма-прицел для точного определения положения источника в рабочей зоне манипулятора.

Управление роботом осуществляет оператор по радиоканалу с помощью пульта и задающих рукояток на основании выводимой на экран пульта оператора информации от перечисленных сенсорных систем.

Рассмотрим задачи комплексного использования сенсорной информации для следующих комбинаций сенсорных систем:

- навигационная система, СТЗ, азимутальный угломер и гамма-визор;
- СТЗ и гамма-прицел.

Задачи, решаемые первой группой сенсоров, — это нахождение ИИИ, его идентификация, определение его координат на карте местности и выдача информации для обеспечения движения к нему.

Вторая группа сенсоров обеспечивает информацией о положении ИИИ в рабочей зоне манипулятора и геометрических параметров источника для обеспечения его взятия.

В качестве критериев качества решения перечисленных задач примем следующие характеристики:

- скорость обработки сенсорной информации и величина задержки поступления результирующей информации в систему управления;
- степень сокращения и обобщения комплексной сенсорной информации, используемой при управлении роботом.

В системе управления рассматриваемого робота комплексирование сенсорной информации осуществляется на базе бортовой ЭВМ. Усреднение и фильтрация сигналов от отдельных сенсоров и их согласование осуществляется специализированными контрол-

лерами. Они же выполняют комплексирование на уровне пикселей и частично на уровне признаков. Это разгружает бортовую ЭВМ и каналы передачи информации от больших потоков данных, идущих непосредственно от сенсоров.

На каждом уровне комплексирования происходит сокращение объема информации с выделением только существенных данных. Наибольший выигрыш при этом, естественно, получается на нижних уровнях обработки.

Комплексирование информации от общих и специальных сенсоров осложнено их различной физической природой, что требует предварительного преобразования выдаваемых ими данных и возможно только на верхних уровнях, начиная с уровня признаков. В роботе Разведчик это реализовано, в частности, путем юстировки сенсорных систем и связывания их систем координат. Главный эффект от комплексирования на этих уровнях заключается уже не в повышении плотности информации, а в получении принципиально новой информации, которая не может быть получена от отдельных сенсоров. Такой информацией в данном случае является величина активности локальных ИИИ, определяемая по совокупности информации от гамма-локатора и системы измерения пройденного пути.

Комплексирование сенсорной информации в рассматриваемом роботе позволило существенно повысить уровень автоматизации его системы управления и облегчить работу оператора. Первоначально система управления была рассчитана на работу двух операторов. В их задачу входило прежде всего именно сопоставление информации, поступающей от сенсорных систем. В результате применения рассмотренного подхода на пульт оператора стала передаваться уже обобщенная информация и для управления роботом оказалось достаточно одного оператора.

Следующим этапом развития этой системы стало построение еще более информационно обобщенной супервизорной системы управления роботом с включением в его комплексную сенсорную систему дальномерных и некоторых других сенсорных устройств. Участие оператора при этом свелось к эпизодическому принятию только тактических решений. Дальнейшее развитие системы —

полное исключение оператора из контура управления в результате его замены уровнем интеллектуального управления.

Рассмотренный пример позволяет продемонстрировать некоторые общие принципы эффективного комплексирования сенсорной информации и сформулировать соответствующие рекомендации по построению комплексных сенсорных систем, включающих в общем случае как общие, так и специальные сенсоры, и основанных на них систем управления.

Эту задачу целесообразно решать поэтапно подобно тому, как это было реализовано в вышеприведенном примере. Начав с системы автоматизированного управления путем постепенного развития процесса комплексирования с введением все более обобщенных уровней комплексирования и соответствующим сокращением и упрощением функций операторов можно прийти до полного исключения операторов из контура управления.

Прежде всего определяется набор сенсорных систем, необходимых для выполнения основных функций робота. При этом определяются задачи, которые невозможно либо нецелесообразно решать при помощи отдельных сенсоров и необходимо комплексирование. Для каждой такой задачи следует определить их комбинацию сенсоров, требующихся для ее решения. В рассмотренном выше примере при помощи гамма-пеленгатора можно определять только направление на источник излучения, но невозможно установить расстояние до него и его активность. Однако, учитывая связь между этими параметрами, указанные задачи можно решить на основе комплексирования специального сенсора и системы навигации робота, что и было реализовано.

Подобный комплексный подход означает системное решение задачи сенсорного обеспечения робота на основе общесистемных критериев оптимальности, которые определяются конкретным назначением робота. Как правило, к ним относятся качество информации, точность, быстродействие и такие типовые показатели, как надежность, стоимость, массогабаритные характеристики.

На рис. 5.2 приведен еще один пример робототехнической системы с информационным обеспечением в виде комплекса сенсорных систем и датчиков, который включает:

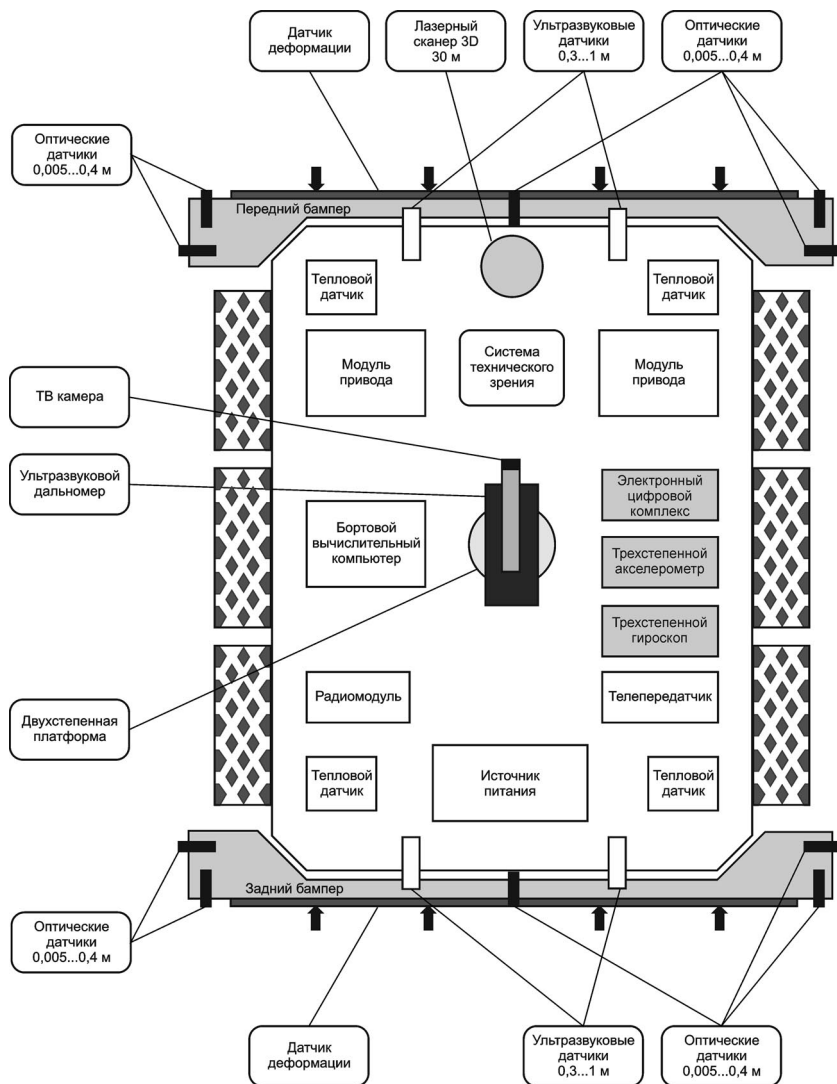


Рис. 5.2. Платформа интеллектуальной мобильной робототехнической системы ИМРТС (ЦНИИ РТК, Россия)

— сенсоры внешней среды — ультразвуковые и лазерные дальномеры и локаторы, система технического стереозрения, контактные и бесконтактные датчики приближения;

— датчики направления или курсовые датчики — гироскоп, цифровой магнитный компас;

— датчики местоположения и ориентации — инклинометры, акселерометры, одометры, спутниковая система навигации типа GPS;

— датчики внутреннего состояния и системы управления — температуры, скорости и т. д.

Навигационные сенсоры и датчики образуют бесплатформенную инерциальную навигационную систему, дополненную спутниковой системой позиционирования. Сенсорные устройства и датчики имеют в своем составе микропроцессор, контроллер обработки информации с передачей ее по последовательному интерфейсу. В состав сенсорной системы входит также одноплатный промышленный контроллер для обработки информации с процессором, памятью, цифровыми и аналоговыми вводами-выводами, интерфейсами и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сенсорное обеспечение для роботов имеет не меньшее значение, чем органы чувств для живых существ. И это значение возрастает по мере развития интеллектуальных возможностей роботов. Сами сенсорные системы становятся все более интеллектуальными и появились даже “интеллектуальные датчики”, т. е. методы искусственного интеллекта распространяются на самые нижние уровни обработки сенсорной информации.

Другой постоянной и самой старой тенденцией развития сенсорики является миниатюризация прежде всего датчиков. Настоящий прорыв в этом направлении был сделан с появлением МЭМС технологий. Впереди — освоение наноразмерностей.

Следующая важная перспектива заключается в развитии распределенных многосенсорных систем, в том числе в сенсорном обеспечении коллективов роботов, их коллективного интеллекта.

Сенсорные системы — органическая функциональная часть робототехнических систем. Знание их возможностей, характеристик и перспектив развития, умение формулировать технические требования к сенсорным системам, выбирать их и проектировать — всем этим должны обладать разработчики средств робототехники.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Солопченко Г.Н.** Измерительные информационные системы. СПб.: изд. Политехнического университета, 2010.
2. **Воротников С.А.** Информационные устройства робототехнических систем. М.: изд. МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005.
3. **Попов А.В., Юревич Е.И.** Роботы с силовым осязанием. СПб.: Астерион, 2008.
4. **Каляев И.А., Мельник Э.В.** Децентрализованные системы компьютерного управления. Ростов-на-Дону: изд. ЮНЦ РАН, 2011.

Юревич Е. И.

СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Учебное пособие

Компьютерная верстка *Е. А. Типцовой*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 — учебная литература

Подписано в печать 09.01.2013. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 6,25. Тираж 50. Заказ 10052b.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел. (812) 550-40-14
Тел./факс: (812) 297-57-76