

С.А. Воротников

Информационные устройства робототехнических систем

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
«Механотроника и робототехника»

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2005

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.816
В75

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Подураев (кафедра «Робототехника и мехатроника» МГТУ «Станкин»); д-р техн. наук, проф. В.Г. Запускалов

Воротников С.А.

В75 Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 384 с.; ил. (Робототехника / Под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко).

ISBN 5-7038-2207-6

Изложены принципы действия, характеристики и примеры построения информационных устройств робототехнических систем. Даны основы расчета кинестетических, локационных, визуальных и тактильных датчиков; показаны способы их сопряжения с системами управления роботов. Приведены алгоритмы обработки сенсорной информации. Рассмотрены варианты реализации различных сенсорных функций в бионических системах.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Роботы и робототехнические системы», а также по специальностям, связанным с разработкой информационного обеспечения технических систем. Представляет интерес для аспирантов и специалистов, занимающихся созданием и применением средств робототехники.

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.816

ISBN 5-7038-2207-6

© С.А. Воротников, 2005
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Введение	11
В1. Робототехника, мехатроника и информационные системы	11
В2. Основные понятия и определения	14
В3. Бионические аспекты информационных систем	19
В3.1. Общие сведения	19
В3.2. Кинестетическая рецепция.....	22
В3.3. Слуховая рецепция	24
В3.4. Зрительная рецепция	26
В3.5. Особенности тактильной рецепции	28
В4. Понятие об информационном подходе.....	29
Контрольные вопросы	32
1. Общие сведения о датчиках информационно-измерительных систем	33
1.1. Датчики и их характеристики	33
1.2. Процесс измерений. Информационная модель	41
1.3. Способы компенсации и учета погрешности.....	46
Контрольные вопросы.....	50
2. Элементы информационных систем	51
2.1. Чувствительные элементы датчиков	51
2.1.1. Резистивные чувствительные элементы.....	51
2.1.2. Электромагнитные чувствительные элементы	56
2.1.3. Преобразователи Холла	59
2.1.4. Оптические чувствительные элементы	62
2.1.5. Пьезоэлектрические чувствительные элементы.....	66
2.2. Измерительные схемы датчиков.....	71
2.2.1. Общие сведения.....	71
2.2.2. Параметрические схемы датчиков.....	72
2.2.3. Генераторные измерительные схемы	79
2.3. Измерительные усилители	81
Контрольные вопросы	88

3. Кинестетические датчики	89
3.1. Датчики положения и перемещения.....	89
3.2. Резистивные датчики положения.....	90
3.3. Электромагнитные датчики положения.....	97
3.3.1. Общие сведения.....	97
3.3.2. Резольверы	100
3.3.3. Растровые электромагнитные датчики положения	112
3.3.4. Редуктосины.....	115
3.3.5. Индуктосины	117
3.4. Фотоэлектрические датчики положения.....	120
3.4.1. Общие сведения.....	120
3.4.2. Растровые оптические датчики положения	121
3.4.3. Импульсные оптические датчики положения	126
3.4.4. Кодовые оптические датчики положения	129
3.4.5. Прецизионные оптические датчики положения.....	132
Контрольные вопросы	136
4. Измерение скорости и динамических факторов	137
4.1. Датчики скорости.....	137
4.1.1. Тахогенераторы переменного тока.....	138
4.1.2. Тахогенераторы постоянного тока	142
4.2. Датчики динамических величин	145
4.2.1. Пьезоэлектрические датчики	146
4.2.2. Магнитоупругие датчики.....	153
4.2.3. Электростатические датчики.....	157
4.2.4. Электромагнитные датчики.....	162
Контрольные вопросы	165
5. Локационные информационные системы.....	167
5.1. Теоретические основы локации	167
5.1.1. Общие сведения	167
5.1.2. Направленность излучения	170
5.1.3. Модуляция и детектирование сигналов.....	173
5.2. Электромагнитные локационные системы	183
5.2.1. Магнитные локационные системы	183
5.2.2. Вихретоковые локационные системы	186
5.2.3. Электромагнитные локационные системы специального назначения	191
5.3. Акустические локационные системы	195
5.3.1. Общие сведения.....	195
5.3.2. Звук и его основные характеристики	196
5.3.3. Акустические свойства среды.....	200

5.3.4. Направленность и модуляция в акустической локации.....	203
5.3.5. Датчики и системы акустической локации	205
5.3.6. Акустические локационные системы специального назначения.....	216
5.3.7. Основы цифровой записи звука	218
5.4. Оптические локационные системы	220
5.4.1. Теоретические основы оптики	220
5.4.2. Оптическая система и ее характеристики	224
5.4.3. Элементы и схемы оптических локационных систем.....	229
5.4.4. Лазерные оптические локационные системы	236
Контрольные вопросы	241
6. Системы технического зрения.....	243
6.1. Общие сведения.....	243
6.2. Основы формирования и передачи изображения.....	250
6.2.1. Понятие о видеосигнале	251
6.2.2. Способы кодирования цвета.....	254
6.3. Датчики изображения	263
6.3.1. Общие сведения.....	263
6.3.2. Видиконы	268
6.3.3. Телекамеры на приборах с зарядовой связью.....	270
6.3.4. Телекамеры с фотодиодной матрицей.....	274
6.4. Устройства ввода и хранения изображения.....	276
6.4.1. Общие сведения.....	276
6.4.2. Способы хранения изображения.....	280
6.4.3. Кодирование видеосигнала	283
6.5. Форматы хранения изображения в СТЗ	285
6.5.1. Общие сведения.....	285
6.5.2. Структура графического файла.....	288
6.5.3. Сжатие изображения	290
6.6. Базовые алгоритмы обработки изображения.....	300
6.6.1. Общие сведения.....	300
6.6.2. Предварительная обработка изображения	303
6.6.3. Сегментация.....	313
6.6.4. Кодирование изображения	315
6.6.5. Описание изображения	316
6.7. Распознавание изображения.....	319
6.7.1. Основные методы	319
6.7.2. Особенности получения трехмерного изображения	323
Контрольные вопросы	326
7. Системы тактильного типа.....	327
7.1. Общие сведения.....	327
7.2. Контакт и его особенности	328
7.3. Принципы силомоментного очувствления роботов.....	330

7.4. Датчики систем силомоментного очувствления роботов.....	336
7.4.1. Конструктивные схемы датчиков	336
7.4.2. Упругие элементы и измерительные цепи силомоментных датчиков	347
7.4.3. Датчики с совмещенными чувствительными элементами	351
7.5. Методы распознавания контактных ситуаций	355
7.6. Организация управления роботом с силомоментным очувствлением	361
7.7. Тактильные датчики.....	363
7.7.1. Общие сведения.....	363
7.7.2. Тактильные датчики касания и контактного давления.....	365
7.7.3. Тактильные датчики проскальзывания	368
Контрольные вопросы	370
Заключение.....	371
Приложение.....	372
Список литературы	378
Предметный указатель.....	380

ПРЕДИСЛОВИЕ

Подготовка студентов в рамках специальности «Роботы и робототехнические системы» проводится в МГТУ им. Н.Э. Баумана уже более 10 лет. Один из важных разделов робототехники — информационное обеспечение робототехнических систем — является, пожалуй, наиболее бурно развивающимся. Появившиеся в последние годы новые принципы получения и хранения информации, эффективные алгоритмы обработки данных в первую очередь внедряют в высокотехнологичных областях техники, к которым относится робототехника. В то же время существующая литература по этой тематике весьма ограничена и быстро устаревает. Кроме того, приводимые в ней сведения зачастую имеют рекламный характер и не позволяют судить о действительных характеристиках датчиков и информационных систем. Настоящее учебное пособие предназначено устранить указанные недостатки.

Рассмотреть в рамках одной книги все используемые в робототехнике информационные устройства невозможно. В данном издании предложен бионический подход, в соответствии с которым рассмотрены лишь те информационные устройства, которые реализуют некоторую сенсорную функцию человека. Наиболее распространенных сенсорных функций четыре (кинестетическая, тактильная, слуховая и визуальная). Технической реализации каждой из этих функций в книге посвящена отдельная глава.

Несколько слов о структуре книги. Условно она состоит из трех частей. В первую входят введение и первая глава, где приводятся основные принципы построения сенсорных систем человека и рассматриваются общие вопросы построения информационных систем роботов. Приведенные в первой части пособия аналитические зависимости позволяют рассчитать важнейшие параметры датчика: чувствительность, частотную характеристику, быстродействие и т. п., а также определить его функцию преобразования и погрешности.

Вторая часть (гл. 2—4) посвящена вопросам проектирования информационных устройств, их чувствительных элементов, измерительных схем и усилителей, образующих аналоговый канал преобразования информации. Приведены примеры построения кинестетических датчиков, составляющих основу информационного обеспечения современных роботов и включающих датчики положения, скорости и динамических факторов.

В третьей части книги (гл. 5—7) рассмотрены информационные системы адаптивных роботов: локационная, визуальная и тактильная. При построении этих систем использованы приведенные ранее методы проектирования. Кроме того, поскольку информационная система представляет собой совокупность аппаратно-программных средств, значительное внимание уделено рассмотрению базовых алгоритмов обработки информации.

Автор предполагает, что читатель владеет материалом курсов физики, высшей математики, электроники, основ робототехники и управления техническими системами в объеме программ высших учебных заведений.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Робототехнические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ее заведующему, д-ру техн. наук, проф. А.С. Ющенко за помощь в работе над книгой; рецензентам — заведующему кафедрой «Робототехника и мехатроника» МГТУ «Станкин», д-ру техн. наук, проф. Ю.В. Подураеву и главному научному сотруднику МНПО «Спектр», д-ру техн. наук, проф. В.Г. Запускалову за ценные замечания, а также редактору издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана Е.Н. Ставицкой.

ВВЕДЕНИЕ

В1. Робототехника, мехатроника и информационные системы

Робототехника сформировалась в 60-х годах XX в. как наука о технических устройствах, способных работать самостоятельно, принимать решения и заменять человека при выполнении сложных операций. Первый этап развития робототехники был связан с созданием промышленных роботов, которые получили широкое применение в машиностроении при обслуживании металлорежущих станков, прессов, металлургических агрегатов, т. е. для замены человека при выполнении однообразной, утомительной и зачастую небезопасной для здоровья работы. Роботы первого поколения представляли собой манипуляторы — механические руки, имеющие до шести степеней подвижности и управляемые по заранее составленной программе. Несмотря на то что в промышленности область применения подобных устройств обширна, довольно быстро выяснились ограничения по их использованию. Например, при сборке узла с помощью робота последний должен взять необходимые детали с монтажного стола или конвейера. Поскольку робот управляется по жесткой программе, местоположение каждой детали и ее ориентация должны быть достаточно точно определены. Поэтому приходилось создавать дорогостоящую оснастку — специальные приспособления для размещения и ориентирования детали с точностью функционирования робота.

Эта особенность существенно отличает работу роботов первого поколения от работы человека, которого он должен заменить. Человек благодаря зрению, слуху и осязанию легко выполняет аналогичные действия даже в том случае, если деталь или заготовка произвольно ориентирована, несколько смещена или повернута. Для жестко запрограммированного робота это невозможно, потому что он слеп и бесчувственен по сравнению с человеком.

Именно отсутствие органов чувств у промышленных роботов первого поколения привело к кризису в мировой робототехнике к концу 80-х годов XX в. Имеющиеся образцы промышленных роботов быстро закрыли ту нишу, в которой их применение было экономически оправданным. В то же время надежных и недорогих роботов, способных видеть, чувствовать и приспосабливаться (адаптироваться) к изменяющейся обстановке, еще не было. Производство промышленных роботов повсеместно стало сокращаться. Только к середине 90-х годов XX в. положение начало понемногу исправляться благодаря тому, что на рынке передовых промышленно развитых стран — Японии, США, Германии — появились оснащенные сенсорными устройствами промышленные роботы, способные к адаптации.

На рубеже XX—XXI веков робототехника стала широко внедряться в непромышленные сферы человеческой деятельности. Это — спасательные работы на месте техногенных аварий и катастроф, разведка полезных ископаемых на морском дне, работы в космическом пространстве, борьба с терроризмом, обезвреживание взрывоопасных предметов и т. п. Роботы начали успешно применяться в медицине для решения задач диагностики и дистанционной хирургии. Подобные роботы не могут выполнять своих функций без технического зрения, тактильного ощущения, оценки развиваемых сил и моментов. Поэтому их появление и активное применение было связано с разработкой надежных сенсорных систем.

Наряду с робототехникой сейчас часто употребляют термин «мехатроника». Появился он примерно в 80-х годах XX в. в известном смысле как развитие понятия «электромеханика». Различие этих, на первый взгляд тождественных, понятий заключается в разном уровне используемых электронных решений. Мехатроника предполагает непосредственное внедрение микроэлектронных систем в систему управления, в некотором роде синтез электроники и механики, позволяющий создавать эффективные регуляторы. В дальнейшем термин «мехатроника» был существенно обобщен, в результате чего к мехатронным системам стали относить практически любые сложные технические системы, содержащие механическую и электронную части и управляемые компьютером. В результате роботы также оказались мехатронными системами. Однако термин «мехатроника», конечно, шире. К этой области относятся также системы, которые не являются робототехническими, например: системы управления комплексами технологического оборудования, обрабатывающие центры, системы поддержания заданной температуры в помещении. Функционирование таких систем связано с выполнением разнообразных измерений, для чего их также оснащают соответствующими сенсорными устройствами.

Можно констатировать, что создание информационно-сенсорных систем является самостоятельным, имеющим очень широкое применение и в робототехнике, и в мехатронике направлением. Однако его возникновение не связано непосредственно с этими науками. Любой процесс управления предполагает наличие обратной связи, а ее реализация требует датчиков обратной связи, измеряющих регулируемые параметры (координаты, скорость, температуру и т. п.). В настоящее время наука о технических измерениях вступила в новую фазу, связанную с применением сенсорных устройств в мехатронике и робототехнике. Эта новая фаза состоит в переходе от отдельных датчиков к сложным измерительным системам, которые в большинстве случаев предполагают довольно сложные способы обработки информации, поступающей от этих датчиков. Примером может служить система технического зрения робота. Функциональная особенность такой системы состоит в том, что она позволяет получать комплексную характеристику окружающей обстановки. Таким образом, в робототехнических и мехатронных системах наряду с датчиками состояния системы, характерными для любых систем управления, появляются датчики состояния внешнего мира.

Информация является одним из наиболее часто употребляемых понятий современной науки и техники. Однако до сегодняшнего дня не существует даже общепринятого определения этого понятия. В различных отраслях знания термин «информация» трактуют по-своему, причем даже в технике имеется много разных его формулировок. Согласно наиболее известным из них, информация — это обозначение содержания, полученного от внешнего мира в процессе приспособления к нему (Н. Винер), отрицание энтропии (Л. Бриллюэн), коммуникация и связь, в процессе которой устраняется неопределенность (К. Шеннон), передача разнообразия (У. Эшби), мера сложности структур (А. Моль), вероятность выбора (А. Яглом), совокупность некоторых данных, сведений о системе, переданных ею в виде сообщения другой системе в процессе связи (Энциклопедия кибернетики). Заметим, что последнее определение является практически дословным переводом латинского термина *informatio* (сведения).

В современной науке мысль о том, что информацию следует рассматривать как нечто самостоятельное, возникла в начале 50-х годов XX в. вместе с кибернетикой, изучающей процессы управления и развития любых систем. Родоначальник кибернетики — профессор Массачусетского технологического института (США) Н. Винер считал информацию ключевым понятием новой науки. Среди ученых, чьи идеи легли в основу новой науки, он называл Платона, А. Ампера и Д. Максвелла, отмечая особое значение работ советских математиков Н. Боголюбова и А. Колмогорова. По мнению А. Колмогорова, цель кибернетики заключалась в изучении систем любой природы, способных воспринимать, хранить и перерабатывать информацию и использовать ее для управления и регулирования. Информационное обеспечение подобных систем уже нельзя было рассматривать отдельно от их структуры и свойств. Система поглощает информацию из внешней среды и использует ее для выбора правильного поведения. Информационные потоки начинают циркулировать по цепям управления. Прибором, передающим информацию в контур управления, является датчик, от характеристик которого в значительной степени зависит качество управления.

Остановимся немного подробнее на истории вопроса, перечислив основные вехи, связанные со становлением теории и практики информационных систем. История активного использования информации для задач управления насчитывает не более 50 лет. Однако первые регуляторы и датчики появились гораздо раньше. Так, сведения о регуляторах содержались еще в материалах Александрийской библиотеки, сгоревшей в средние века. Первые промышленные датчики также появились давно. По-видимому, одним из первых был механический датчик, установленный в 1720 г. в «автоматическом суппорте» (токарно-копировальном станке) Нартова. Первый электрический датчик (электромагнитное реле Шеллинга) появился в 1830 г., а электромеханический (рельсовый индикатор) — в 1880 г.

В дальнейшем датчики систем автоматического регулирования развивались по пути измерения одного из параметров объекта регулирования (угла, давления, температуры и т. д.), что позволило создать следящие системы управления заданным параметром. В середине XX в. появились копирую-

щие манипуляторы, а в 1954 г. американцем Д. Деволом был получен патент на «программируемое шарнирное устройство для переноски» — первый программируемый манипулятор. В конце 50-х годов им же совместно с Д. Энгельбергером была организована фирма Unimation, которая в 1959 г. выпустила первый промышленный робот Unimate. Этот робот содержал контур обратной связи по положению, в котором перемещения звеньев манипулятора измеряли установленные в них датчики. Датчики углового и линейного перемещения и сегодня составляют основу информационного обеспечения робототехнических и мехатронных систем.

В середине 60-х годов стало очевидно, что гибкость программируемых роботов может быть повышена при использовании систем осязания, основанных на применении датчиков среды. Первая система такого типа — тактильная — была разработана Х. Эрнстом в рамках проекта «Mechanical Hand-1». Она позволяла роботу укладывать кирпичные блоки без помощи оператора. Наконец, в начале 70-х годов по проекту «Stanford Arm» группа Р. Пола создала мультимодальную информационную систему «глаз—ухо—рука», содержащую тактильные, локационные и визуальные датчики. Эти разработки заложили основы для использования информационных средств в автоматическом и роботизированном производствах.

В2. Основные понятия и определения

Рассмотрим некоторую активную систему, взаимодействующую с внешней средой. Предположим, что эта система имеет априорную информацию I_a о среде и в процессе функционирования получает текущую информацию I_p как о внешней среде, так и о собственном состоянии. Ее целью является принятие решений, связанных с преобразованием или анализом внешней среды. Как правило, информация, имеющаяся в распоряжении системы, является неполной, т. е. она функционирует в условиях неопределенности. Под адаптацией будем понимать способность активной системы достигать заданных целей в условиях неопределенности на основе использования текущей информации о собственном состоянии и состоянии среды. При этом могут изменяться параметры системы, ее структура и алгоритм функционирования.

Следовательно, адаптивной мы называем систему, которая может приспосабливаться к изменению внутренних и внешних условий. Простейшей адаптивной системой можно считать систему с обратной связью (следающую систему).

В настоящее время применительно к системам управления адаптацию часто рассматривают с двух позиций. С одной стороны, когда системы управления имеют в своем составе сенсорные устройства, обеспечивающие получение информации I_p о состоянии среды или свойствах объектов, причем эти данные используются для решения задач, связанных с формированием управления системой. С другой стороны, когда системы управления

используют адаптивные алгоритмы, способные изменяться под воздействием текущей I_p или обучающей I_a информации от сенсоров. В обоих случаях наличие сенсорной (информационной) системы является признаком адаптивной структуры.

В качестве примера активной адаптивной системы рассмотрим систему управления адаптивного робота (рис. В1). В состав информационной системы здесь входят подсистема восприятия окружающей среды и подсистема связи. Подсистема восприятия окружающей среды содержит датчики (измерительные преобразователи или информационные устройства), включающие не показанные на схеме первичные преобразователи (чувствительные элементы). Сигналы с датчиков поступают в блок обработки данных и далее в блок анализа рабочей сцены и находящихся на ней объектов. При этом используется априорная информация I_a о рабочей сцене в виде математической модели, которая уточняется с помощью подсистемы связи. Полученная информация применяется для планирования движений на исполнительном, тактическом и стратегическом уровнях. Эти движения реализуются рабочим механизмом. Для робота это обычно манипулятор, снабженный соответствующим инструментом. Рассмотренная схема сохраняется и в случае мобильного робота, у которого рабочий механизм включает также средства передвижения.

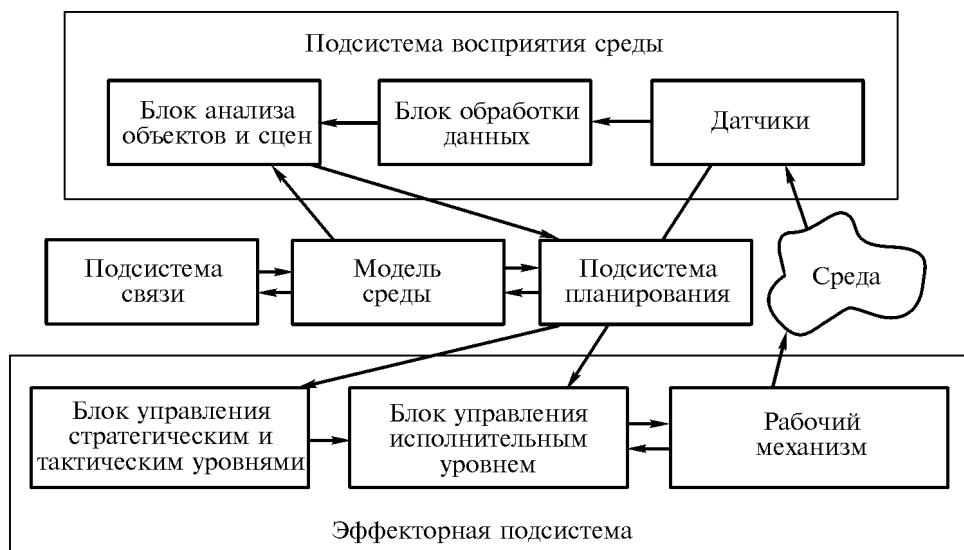


Рис. В1. Структурная схема адаптивного робота

Остановимся более подробно на основных терминах, связанных с информационной системой.

Первичным преобразователем, или *чувствительным элементом* (ЧЭ), называется простейший элемент информационной системы, изменяющий свое состояние под действием внешнего возмущения, например фотодиод или тензорезистор.

Датчик представляет собой устройство, которое под воздействием измеряемой физической величины выдает эквивалентный сигнал (обычно электрической природы — заряд, ток, напряжение или импеданс), являющийся однозначной функцией измеряемой величины. Простейший датчик состоит из одного или нескольких первичных преобразователей и измерительной цепи. Большинство датчиков имеет внешний источник питания, а в качестве нагрузки может быть использован усилитель, измерительный прибор, блок сопряжения с компьютером и т. п.

Классификационных признаков очень много, поэтому классификация датчиков представляет собой весьма сложную задачу. Для простоты выделим три признака: тип замещаемой сенсорной функции, радиус действия и способ преобразования. При этом сохраним принятую в биологии классификацию сенсорных функций. Тогда по типу замещаемой функции датчики можно подразделить на четыре группы: кинестетические, локационные, визуальные и тактильные. В зависимости от радиуса действия различают контактные датчики, датчики ближнего и дальнего действия. Наконец, по способу преобразования выделяют генераторные (активные) и параметрические (пассивные) датчики. Рассмотрим каждую группу более подробно.

Кинестетические датчики формируют информационный массив данных об обобщенных координатах и силах, т. е. о положении и относительных перемещениях отдельных рабочих органов и развиваемых ими усилиях. К кинестетическим относятся датчики положения, скорости, измерители сил и моментов в сочленениях многозвенного механизма.

Локационные датчики предназначены для определения и измерения физических параметров среды путем излучения и приема отраженных от объектов сигналов. По значениям этих параметров формируется локационный образ среды, который используется для идентификации ее объектов. Наиболее распространены электромагнитные, в том числе оптические, а также акустические устройства.

Визуальные датчики обеспечивают получение информации о геометрических и физических характеристиках внешней среды на основе анализа ее освещенности в оптическом диапазоне, включая ИК, СВЧ и рентгеновское излучения. Примером являются различные телевизионные системы.

Тактильные датчики позволяют определить характер контакта с объектами внешней среды в целях их распознавания. Это, например, тактильные матрицы и силомоментные датчики. Тактильные датчики относятся к датчикам контактного типа.

Контактными являются также кинестетические датчики. Сенсорные устройства ближнего действия получают информацию о среде вблизи объекта работы, дальнего — во всей рабочей зоне. Примерами являются визуальные и акустические преобразователи.

Генераторные датчики являются источником непосредственно выдаваемого электрического сигнала. Это — термоэлектрические преобразователи; устройства, в основе функционирования которых лежат пиро- и пьезоэлектрические эффекты, явление электромагнитной индукции, фотоэффект, эффект Холла и др.

В параметрических датчиках под воздействием измеряемой величины меняются некоторые параметры выходного импеданса. Импеданс датчика обусловлен его геометрией и размером элементов, а также электромагнитными свойствами материала: удельным электросопротивлением ρ , относительной магнитной проницаемостью μ , относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r . В преобразователях этого типа сигнал формируется *измерительной цепью* (потенциометрической или мостовой схемой, колебательным контуром, операционным усилителем). Параметрическими преобразователями являются большинство датчиков силы, давления, перемещения.

Несмотря на разнообразие датчиков, используемых в робототехнических и мехатронных системах, они должны быть унифицированы. Унифицированным преобразователем (трансмисмиттером) является датчик, имеющий нормированный диапазон сигнала на выходе. Согласно международному стандарту DIN/VDE 2600, нормированные сигналы должны находиться в диапазонах: сила тока $0 \dots \pm 5$ мА или $0 \dots \pm 20$ мА; напряжение $0 \dots \pm 1$ В или $0 \dots \pm 10$ В. В устройствах с нормированными токовыми сигналами допускается применение измерительных приборов с внутренним сопротивлением $R_{\text{н}} \leq 1$ кОм. В устройствах с нормированными сигналами напряжения сопротивление $R_{\text{н}}$ должно превышать 1 кОм.

Кроме того, к датчикам систем предъявляют следующие требования:

высокая надежность и помехоустойчивость в условиях электромагнитных помех, колебаний напряжения и частоты;

малогабаритность, простота конструкции, «размещаемость» на захватном устройстве и других частях манипулятора при ограниченной площади и объеме;

развязка выходных и входных цепей, простота юстировки и обслуживания; возможность абсолютного отсчета параметров и др.

Один или несколько датчиков в совокупности с усиливающими и преобразующими устройствами образуют *информационную систему* (рис. В2). Информационная (информационно-сенсорная) система предназначена для интегральной оценки наблюдаемого процесса или явления в целях определения его состояния и формирования соответствующего сообщения. В общем случае она представляет собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных средств для получения измерительной информации, ее преобразования и обработки для предоставления в требуемом виде. В информационной системе сигналы, поступающие с датчиков, после предварительного усиления и преобразования в цифровую форму поступают на микроЭВМ, где выполняется инте-

гральная оценка процесса. Далее формируется сообщение на верхний уровень информационной системы или в систему управления.

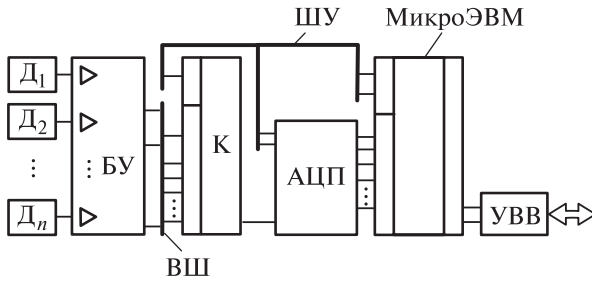


Рис. В2. Пример функциональной схемы информационной системы: $D_1 - D_n$ — датчики; БУ — блок усилителей; К — коммутатор; ШУ — шина управления; УВВ — устройство ввода-вывода; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ВШ — внутренняя шина

В робототехнике информационные системы используются на трех уровнях управления: исполнительном, тактическом и стратегическом. В табл. В1 приведены примеры задач, решаемых на каждом из этих уровней, и используемые для этого информационные средства.

Таблица В1

Примеры использования информационных систем в роботах

Уровень управления	Основные задачи, решаемые с помощью информационной системы	Информационные средства
Исполнительный	Обеспечение монотонности движения захвата. Устранение взаимовлияния звеньев манипулятора. Обеспечение стабильности динамических характеристик приводов	Датчики положения, скорости, ускорений; однокомпонентные датчики измерения момента на валу
Тактический	Обеспечение необходимой силы захвата. Самонаведение и торможение вблизи неизвестных препятствий	Тактильные матрицы и датчики проскальзывания; оптические, индуктивные и емкостные датчики; видеокамеры; ультразвуковые дальнометры
Стратегический	Нахождение маршрута движения в недетерминированной обстановке. Развитие необходимых усилий при работе со связанными объектами. Поиск и распознавание заданных объектов, определение их взаимного положения	Разнообразные дальнометры, системы технического зрения и силомоментного оцувствления

В3. Бионические аспекты информационных систем

В3.1. Общие сведения

Как уже было отмечено ранее, роботы создавали с целью заменить человека в тех случаях, когда он по тем или иным причинам не может принять непосредственное участие в выполнении достаточно сложных операций. Антропологический подход к терминологии в робототехнике основан на использовании принятых в биологии, биофизике и психологии терминов для обозначения соответствующих робототехнических категорий. В результате возникли такие понятия, как восприятие информации роботом, принятие им решений, искусственный интеллект робота и т. п. Заметим, что антропологический подход, который, поскольку речь идет о биологических и биофизических аналогах, можно назвать бионическим, был применен при классификации датчиков. В его основе лежит принцип замещения или усиления некоторой сенсорной функции человека. Бионические термины достаточно широко используются в теории и практике информационных систем, в связи с чем им необходимо дать определение.

Из всего множества воздействующих на организм факторов окружающей среды лишь некоторые улавливаются сенсорными органами. Эти факторы называются сенсорными стимулами. В ходе эволюции у всех организмов развились специализированные сенсорные органы, устроенные так, чтобы оптимальным образом отвечать на вполне определенные стимулы. Эти органы подразделяют на три группы. Экстероцепторы — это рецепторы, стимулируемые окружающей средой; они участвуют в реализации слуховой, визуальной и тактильной сенсорных функций. Проприоцепторы определяют вариации длины мышц, натяжения сухожилий и других параметров положения и движения. Эти рецепторы участвуют в формировании кинестетической и отчасти тактильной сенсорных функций. К группе проприоцепторов относится и вестибулярный аппарат. Интероцепторы регистрируют информацию, поступающую от внутренних органов тела. Это, в частности, датчики температуры, кровяного давления, состава крови и т. п. Большая часть информации, посылаемой в центральную нервную систему интеро- и проприоцепторами, не воспринимается сознанием.

Восприятие внешнего мира человеком осуществляется через шесть основных каналов сенсорной рецепции, образующих распределенную информационную сеть. Это каналы органов чувств — слух, зрение, осязание, терморепцепция, обоняние и вкус. В каждом из них возбуждение регистрируется системой ЧЭ (рецепторов), специфических для разных сенсорных модальностей, и передается по каналу связи (нервному волокну) в виде потенциалов действий. Система рецепторов каждой модальности связана с определенными отделами центральной нервной системы. Вид каналов связи основных сенсорных модальностей показан на рис. В3.

Распознавание сенсорного образа у человека является результатом совместной работы информационной системы и мозга. Значительная часть информации обрабатывается уже на уровне рецепторов. При этом возмож-

ности рецепторов по передаче информации существенно превышают возможности информационной системы по ее переработке, а следовательно, *пропускная способность* рецепторных нейронов определяет максимальный поток информации. Так, у человека только в зрительной системе сосредоточено более миллиона каналов передачи информации, способных пропустить до 10^7 импульсов в секунду. Если каждый импульс несет хотя бы 1 бит данных, то мозг ежесекундно будет получать от зрительной системы 10^7 бит информации. Это намного превосходит возможности нервной системы, которые ограничены десятками бит в секунду. Таким образом, количество информации избыточно и оно должно быть сокращено благодаря предварительной обработке в процессе передачи от рецепторов к мозгу.

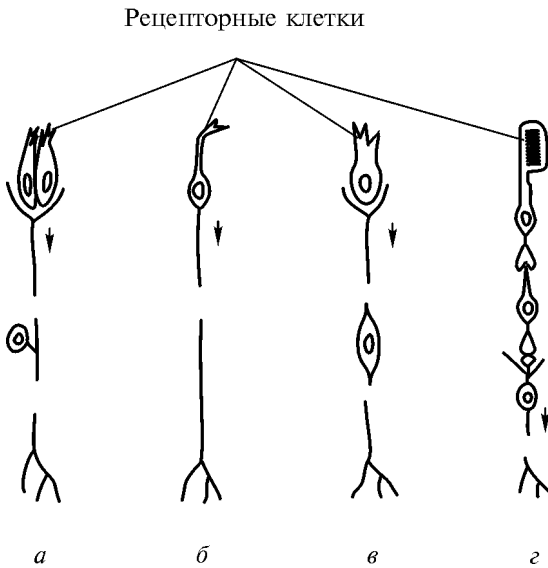


Рис. В3. Каналы связи сенсорных функций человека:
a — вкус; *б* — обоняние; *в* — слух; *г* — зрение

Главная функция обработки информации на уровне рецепторов заключается в выделении определенных важных сторон и свойств поступающих извне сигналов и устранении избыточности. Важнейшей задачей здесь является выделение контраста стимула. Информация о стимуле, который все длится и длится, мозгу нужна существенно меньше. Например, в зрении основное значение имеет контурная информация. Так, экспериментально показано, что образ спящей кошки идентифицируется по 38-точечному контурному представлению.

Во всех типах рецепции действуют общие принципы интегрального описания стимулов, основанные на анализе их признаков. Характерные признаки, соответствующие основным видам сенсорной рецепции, даны в табл. В2.

Признаки сенсорных функций бионической системы

Сенсорная функция	Признаки
Вкус	Сладкое, соленое, кислое и горькое
Обоняние (запах)	Мускусный, камфарный, цветочный, эфирный, мятный, острый и гнилостный
Слух	Объем, громкость, плотность, высота
Терморцепция	Степени тепла
Тактильная	Чувствительность, разрешающая способность
Зрение	Чувствительность, разрешающая способность, спектральная характеристика

Остановимся на этом более подробно, поскольку аналогичные принципы нередко применяют в искусственных информационных системах. Одним из основных принципов является использование нескольких типов ощущений для формирования всего их разнообразия. Всю гамму вкусовых ощущений представляют в виде суперпозиции четырех основных вкусовых качеств: сладкое, соленое, кислое и горькое. В этом легко убедиться при анализе органа вкуса. Так, кончик языка чувствителен к сладкому и соленому, боковые его поверхности — к кислому, а спинка — к горькому. Вкус любого вещества имитируется смешиванием двух-трех основных качеств вкуса. Примерно также обстоит дело и с обонянием. Человек способен распознать запах около сотни тысяч различных веществ, однако в отличие от вкуса, характеризующегося абстрактным представлением, например о кислом, представления о запахах конкретны и связаны с каким-либо веществом (миндалем, камфарой и др.). В соответствии с господствующей в настоящее время стереохимической теорией обоняния Монкриффа — Эймура, выделяют семь первичных запахов: мускусный, камфарный, цветочный, эфирный, мятный, острый и гнилостный. Выяснилось, что относящиеся к одной группе вещества имеют сходство в стереомодели. В частности, для молекул веществ, обладающих камфарным запахом, характерна округлая форма и размер около 1 нм. Предполагается, что существует от 4 до 12 типов рецепторов, отвечающих основным запахам.

В табл. В3 представлена сравнительная количественная характеристика сенсорных функций человека. Заметим, что по пропускной способности выделяется зрение, играющее основную роль в адаптации человека к окружающей среде. Можно предположить такую же роль искусственного зрения при адаптации робота в условиях неопределенности. В то же время слух и особенно осязание обладают значительно более высокой чувствительностью и используются для тонкой коррекции движений при взаимодействии с внешней средой.

Сравнительная характеристика сенсорных функций человека

Сенсорная функция	Число клеток	Число отходящих нервных волокон	Пропускная способность канала, бит/с	Относительная чувствительность
Слух	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	10^2
Зрение	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	1,0
Осязание	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	10^3
Терморепцепция	$3 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$	1,0
Обоняние	$7 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	10^2
Вкус	$3 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	1,0

В3.2. Кинестетическая рецепция

Важнейшую роль в очувствлении робота играют кинестетические сенсоры. Кинестетическая функция служит для обеспечения согласованных движений опорно-двигательного аппарата человека. Она реализуется нелокализованной системой рецепторов, в которой достаточно сложно выделить отдельные датчики параметров. С позиции бионики кинестетические рецепторы, содержащиеся в каждой мышце, являются информационными элементами исполнительного уровня управления (как бы датчиками соответствующих контуров регулирования). Они регистрируют изменения относительного положения отдельных элементов двигательной системы. Кинестетическая функция, связанная с обеспечением надлежащей ориентации в пространстве всего организма, реализуется вестибулярным аппаратом. В этом смысле он соответствует информационной системе тактического уровня управления. Его функционирование, как и работа собственно кинестетических сенсоров, осуществляется под управлением нервной системы.

Исполнительным механизмом организма является скелет, двигательная активность которого формируется посредством связок и суставов (кинематических пар), а также мышц (приводов). Масса скелета, состоящего из 233 костей, составляет в среднем 11 кг. Длина самой большой кости (бедренной) составляет 0,5 м, самой маленькой (стремечка в среднем ухе) — 3 мм.

Мышечная ткань представляет собой самый тяжелый и объемный орган. На скелете содержится 639 мышц, масса которых достигает 45 % общей массы тела. Мышцы потребляют до 60 % кислорода, поступающего в организм, и в состоянии максимального напряжения способны развить усилие до 25 т. Каждый грамм мышц содержит около 5000 нервных волокон, связывающих их с мозгом. Приводная система организма обладает достаточно высокой мощностью. Так, для мышцы руки мгновенное значение мощности,

определяемое как произведение развиваемой ею силы на скорость укорочения, достигает 200 Вт при скорости сокращения 2,5 м/с, а ее коэффициент полезного действия (КПД) составляет 30...40 %.

В физиологии кинестетическую сенсорную функцию связывают с рецепторами трех подсистем: мышечной и сухожильной (они контролируют характеристики перемещения, скорости и усилия), кожной (связанной с измерением параметров давления и проскальзывания) и вестибулярным аппаратом. Относя кожную подсистему к разделу тактильной рецепции, можно считать, что применительно к роботу кинестетическая функция описывается в терминах позы и движения. Чувство позы определяется углами между суставами, оно позволяет, например, синхронизировать движения обеих рук в тестах с завязанными глазами. Чувство движения связано с восприятием направления и скорости относительного перемещения суставов. Амплитудный порог этого восприятия зависит от угловой скорости. Так, для плечевого сустава при минимальной угловой скорости движения 0,06 рад/с он составляет 2—4°, а при угловой скорости 1,7 рад/с — около 30°. Чувство силы ощущается как степень мышечного усилия, необходимого для выполнения движения и поддержания позы. Благодаря ему человек может оценить, например, разницу масс предметов при их «взвешивании» обеими руками, которая не превышает 3...10 %.

Важнейшую роль в кинестетической функции играют мышечные веретена, представляющие собой рецепторы растяжения. При активации мышцы ее длина уменьшается примерно на 1 %, что и определяет динамический диапазон этих рецепторов. Их размеры варьируются в широких пределах: диаметр 15...100 мкм, длина 4...500 мм. Мышечные веретена есть практически во всех мышцах; их количество изменяется от 40 (в мелких мышцах) до 500 (в трехглавой мышце плеча), а общее количество достигает 20 000. Другая многочисленная группа рецепторов — сухожильные органы (или рецепторы Гольджи). Как следует из названия, располагаются они в сухожилиях всех мышц и также представляют собой рецепторы растяжения. По приблизительным подсчетам их приходится от 50 до 80 шт. на каждые 100 мышечных веретен.

Передача информации в кинестетической системе осуществляется путем частотно-импульсной модуляции: во время растяжения рецепторов частота импульсации увеличивается. При этом мышечные веретена возбуждаются главным образом при изменении длины мышцы, а сухожильные органы — при ее напряжении. Следовательно, у каждой мышцы есть две системы обратной связи: регуляция длины с мышечными веретенами в качестве датчиков положения и регуляция напряжения, датчиками в которой служат сухожильные органы. С позиций теории управления наличие двух таких контуров позволяет контролировать изменение нагрузки на мышцу изменением либо ее длины при конечном напряжении (изотонически), либо напряжения при постоянной длине (изометрически) мышцы. Возможно, что таким образом поддерживается постоянство жесткости мышцы, определяемое как отношение изменения напряжения к изменению длины.

Вестибулярный орган, отвечающий за чувство равновесия, филогенетически близок органу слуха. Они не только находятся рядом, образуя внутреннее ухо, но и произошли в ходе эволюции из одной структуры. Вестибулярный аппарат состоит из заполненных жидкостью (эндолимфой) отолитового аппарата и полукружных каналов, а также системы волосковых рецепторов — ресничек. В отолитовом аппарате находится желеобразная структура с включениями каменистых образований, получившая название отолитовой мембраны. Перемещение мембраны (ее плотность составляет около $2,5 \text{ г/см}^3$) в эндолимфе под действием силы тяжести воспринимается ресничками. Рецепторы формируют импульсные послышки в любом положении вестибулярного органа. Поворот головы в одном направлении увеличивает частоту импульсации, поворот в другом — уменьшает. Таким образом, при любой ориентации головы возникает специфическая картина возбуждения нервных волокон. Данная система может определить положение организма в поле действия сил. Поскольку в повседневной жизни ускорение силы тяжести намного превышает другие ускорения (например, возникающие при разгоне автомобиля), последние играют для вестибулярной системы подчиненную роль. Полукружные каналы, расположенные в трех взаимно перпендикулярных плоскостях и также заполненные эндолимфой, содержат желеобразную структуру — купулу, плотность которой равна плотности эндолимфы. Каналы действуют как замкнутые круговые трубки. Вследствие равенства плотностей купулы и эндолимфы линейные ускорения, включая гравитационные, на этот орган не влияют. При поворотах же головы (и полукружных каналов) в результате инерционности возникает разность давлений по обе стороны купулы, она отклоняется в сторону, противоположную движению, возбуждая тем самым соответствующие реснички. При вращении головы относительно любой диагональной оси мозг, выполняя векторный анализ информации, определяет истинную ось вращения. Купулярная система весьма точна (фиксируется поворот на угол, равный $0,005^\circ$), но инерционна (ее постоянная времени $\tau \approx 10...30 \text{ с}$).

В3.3. Слуховая рецепция

Для звукового восприятия характерно четыре измерения: объем, громкость, плотность и высота. Эти субъективные свойства звука определяются двумя физическими переменными сигнала: его амплитудой и частотой.

Первые исторические сведения об исследованиях в области звука связаны с именем Пифагора, которого считают родоначальником науки о звуке — акустике. Аристотель в IV в. до н. э. обнаружил, что распространение звука сопровождается сжатием и растяжением среды, а эхо является результатом его отражения. После средневекового научного застоя лишь в XVII в. Г. Галилей и М. Мерсенн установили связь высоты тона с частотой колебаний звучащих тел, а М. Мерсенн вычислил также скорость распространения звука в воздухе. По его оценкам она составила 414 м/с . В XVIII в. Л. Эйлер определил пределы частот слышимых звуков. Согласно его исследованиям, диапазон воспринимаемых частот составил $20...4000$ колебаний в секунду. Позже эти значения неоднократно уточнялись. В XIX в. Вебер обнаружил стоячие волны, что позволило открыть явление интерференции. Сейчас акустика представляет собой весьма обширную область, имеющую большое прикладное значение.

Слуховой аппарат животных и человека состоит из трех основных частей: наружного, среднего и внутреннего уха. Наружное ухо представляет собой резонатор; у человека он имеет собственную резонансную частоту около 3 кГц. Среднее ухо содержит систему мелких косточек — молоточек, наковаленка и стремечко, отделенную от наружного уха барабанной перепонкой. Абсолютная чувствительность уха весьма велика. Человек, например, способен слышать удары молекул воздуха о барабанную перепонку. Диапазон амплитуд колебаний барабанной перепонки составляет $10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-5}$ см. Внутреннее ухо — улитка — представляет собой спирально закрученный костный канал (у человека он имеет 2,5 витка, у животных до 5). В улитке находится основной орган слуха — базилярная мембрана с расположенными на ней волосковыми рецепторами. Для объяснения эффекта слуха используют теорию «бегущей волны» Д. Бекеша, в соответствии с которой при восприятии звука на базилярной мембране возникает волна, движущаяся от основания улитки к ее вершине. Амплитуда бегущей волны зависит от жесткости мембраны в конкретной точке. Таким образом, базилярная мембрана представляет собой своеобразный фильтр, в котором высокочастотные колебания распространяются лишь в области, где жесткость мембраны высока, а низкочастотные проходят всю мембрану, вплоть до ее вершины.

Порог слышимости (минимальный уровень звукового давления) зависит от частоты звука. Человеческое ухо наиболее чувствительно в диапазоне частот 2000...5000 Гц. Громкость звука (уровень звукового давления) является амплитудной характеристикой. Звуки равной громкости слышатся по-разному в зависимости от их частоты. Для учета этого факта в физиологии используют кривые равной слышимости, приведенные к частоте 1 кГц. Громкость звука на этой частоте получила название «фон». На этой частоте 1 фон равен 1 дБ. Средний порог слышимости составляет 4 фон, а предельное значение громкости достигает 130 фон (при этой громкости возникает звуковая травма). В частотной области пределы слышимости человека находятся в диапазоне 20...16 000 Гц. Частоты и громкости звука, характерные для речи, образуют речевую зону. По частоте это в среднем 300...3500 Гц. Порог различения частот весьма субъективен и зависит от частоты сигнала. При оптимальной частоте 1000 Гц он составляет 0,3 % или 3 Гц. Заметим, что для музыкальных звуков частоты определяются принципами построения звукоряда. Так, для темперированной октавы, содержащей 12 базовых звуков, каждая частота отличается от предыдущей в $\sqrt[12]{2}$ или в 1,06 раза. Это вдвое выше указанного порога различения частот.

Слуховая ориентация в пространстве определяется бинауральным эффектом. Он основан на том, что расстояния от каждого уха до источника звука различны, а следовательно, различны уровни звуковых давлений в барабанных перепонках. Слуховая система способна воспринять эту разницу уже на уровне 1 дБ. Вычисленная временная задержка составит всего около $3 \cdot 10^{-5}$ с,

что соответствует смещению источника относительно центральной линии на 3° . При определенном навыке точность ориентации можно удвоить.

В3.4. Зрительная рецепция

Визуальные анализаторные системы человека — это сложные многоуровневые образования, служащие для анализа оптических сигналов. То, что воспринимается зрением, есть результат взаимодействия сенсорных и двигательных механизмов глаза и центральной нервной системы, поскольку как произвольные, так и произвольные движения глаз и головы заставляют изображение смещаться каждые 200...600 мс. Мозг создает целостную картину из последовательности дискретных изображений. Движения, изменяющие направления взгляда, устанавливают глаз в такое положение, при котором изображение попадает в ту точку сетчатки, где острота зрения максимальна. Крупный объект сканируется глазом вследствие резких скачков — саккад с амплитудой от нескольких угловых минут до 90° и угловой скоростью до 9 рад/с. Применительно к мелким объектам характерны микросаккады с частотой 20...150 Гц и амплитудой в несколько угловых минут. В то же время при сканировании быстродвижущихся объектов (со скоростью более 1,5 рад/с) глаз отстает и изображение «размывается», т. е. не попадает в область максимальной остроты зрения. В этом случае происходит движение головы, что характерно, например, для зрителей на автогонках.

Зрительная система организована по явно выраженному иерархическому принципу. Ее основными уровнями являются: фоторецепторы сетчатки глаза, зрительный нерв, область пересечения зрительных нервов (хиазма), зрительный канатик (место выхода зрительного пути из области хиазмы), а также нервные пути к зрительной коре головного мозга.

Сетчатка глаза представляет собой очень сложный орган. Ее рецепторный слой содержит два типа рецепторов: около $6 \cdot 10^6$ колбочек (образующих аппарат дневного, фотопического зрения) и около $120 \cdot 10^6$ палочек (относящихся к аппарату сумеречного, скотопического зрения). Колбочки и палочки неравномерно распределены в различных областях сетчатки. Колбочек значительно больше в ее центральной части — центральной ямке и желтом пятне, т. е. в зоне максимально ясного зрения. Палочки здесь отсутствуют, они распределены вокруг ямки. Желтое пятно несколько сдвинуто в сторону от места выхода зрительного нерва. Эта зона, где рецепторов нет, называется слепым пятном. Геометрические особенности распределения цветового зрения по элементам сетчатки были впервые описаны в 1894 г. в работе А. Кенига. Он установил, что различение цвета зависит от углового размера объекта: при угле $> 10'$ объект представляется полноцветным, при угле $4,5...10'$ — двухцветным (оранжево-голубым), а при угле $< 4,5'$ — ахроматическим (черно-белым).

Человек относится к числу так называемых фронтальных млекопитающих, у которых зрительные поля (области, воспринимаемые каждой сетчаткой отдельно) перекрываются. Это позволяет человеку выполнять точные манипуляции руками под контролем зрения, а также обеспечивает точность и глубину видения (стереоскопическое, или бинокулярное зрение). Бинокулярное зрение характеризует возможность совмещения образов объекта, возникающих в каждой сетчатке. Зона перекрытия зрительных полей обоих глаз около 120° , в то время как зона монокулярного видения составляет около 30° для каждого глаза (именно такой угол зрения имеет глаз относительно его центральной точки).

Визуальная информация передается в головной мозг по зрительному нерву, состоящему из 10^6 аксонов. Зрительные волокна, идущие от носовых половин сетчаток, пересекаются в хиазме и переходят на противоположную часть зрительной коры, волокна же височных областей не пересекаются. Следовательно, расположенные к носу от средней линии (нозальные отделы) участки сетчатки участвуют в механизмах бинокулярного, а расположенные в височных отделах (темпоральные отделы) участки — в механизмах монокулярного зрения.

Одно время считалось, что механизмы стереоскопии обусловлены исключительно параллаксом, т. е. разностью углов зрения левого и правого глаза. Однако, хотя действительно расстояние одним глазом оценивается менее точно, чем двумя, утрата этой способности не так существенна, как в случае пространственного слуха. В настоящее время полагают, что восприятие глубины пространства зависит также от ряда дополнительных факторов, в том числе зрительного опыта. Изображение объекта проецируется на сетчатку справа от центральной ямки в левом глазу и слева от нее в правом. Это позволяет при бинокулярном зрении создать неперекрывающиеся двойные изображения. Их наложение осуществляется в так называемом циклопическом глазе — воображаемом органе, в который проецируются сетчатки правого и левого глаз (рис. В4). Установлено, что изображение не будет двоиться, если объект находится в области гороптера — криволинейной поверхности, на которой лежат узловые точки обоих глаз и точка фиксации. Бинокулярное зрение у людей не является врожденным и формируется в возрасте 8—27 недель.

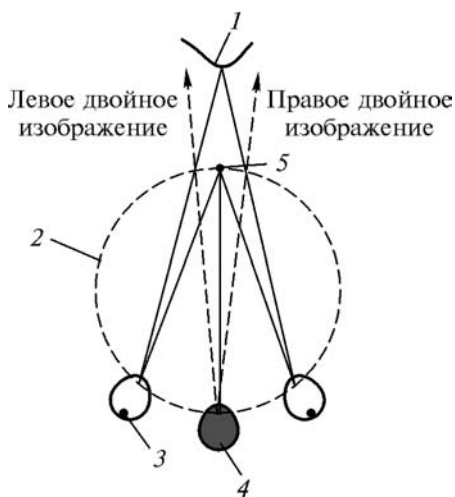


Рис. В4. Схема бинокулярного зрения: 1 — объект; 2 — гороптерный круг; 3 — центральная ямка; 4 — «циклопический» глаз; 5 — точка фиксации

В3.5. Особенности тактильной рецепции

Биологическая значимость тактильной сенсорной функции, пожалуй, наиболее высока. Если отсутствие специальных видов чувствительности — зрения, слуха, обоняния и т. д. не приводит к гибели организма, то отсутствие тактильной (кожной) рецепции несовместимо с жизнью. Существо, лишенное возможности воспринимать тактильную информацию, не могло бы уберечься от опасных внешних воздействий, о которых сигнализируют болевые ощущения; сохранять стабильность ориентации и движения в пространстве, поддерживаемые мышечным тонусом и т. д. Тактильная рецепция и в филогенетическом смысле является самой древней. Она объединяет несколько видов чувствительности, которые можно разделить на две категории: чувствительность, связанная с кожными рецепторами, и виды чувствительности, связанные с рецепторами, которые находятся в мышцах, суставах и сухожилиях.

Кожа является предохранительной оболочкой организма. Ее общая площадь достигает в среднем $2,5 \text{ м}^2$. В коже, мышцах, суставах и сухожилиях находится огромное количество рецепторов. Внутри кожи, например, можно выделить по крайней мере четыре самостоятельных вида рецепции: температурная (тепловая и холодовая), тактильная, болевая и вибрационная (иногда ее характеризуют как зависимую от трех других). Этим четырем видам кожной чувствительности соответствуют различные рецепторные аппараты. К числу основных относятся:

- колбочки Краузе, раздражение которых дает ощущение холода;
- цилиндрические рецепторы Руффини, формирующие тепловые ощущения;
- корзинчатые сплетения и тельца Меснера, ответственные за возникновение ощущений прикосновения и давления;
- так называемые свободные нервные окончания, связанные с болевыми функциями.

Кроме кожных рецепторов существуют рассмотренные выше рецепторы мышц, суставов и сухожилий, связанные с проприоцептивной (кинестетической) чувствительностью. Они вырабатывают сигналы в тот момент, когда происходит изменение силовых факторов в опорно-двигательном аппарате, являясь таким образом носителями информации о расположении и движении мышечно-суставного комплекса. Существует и ряд других рецепторов, назначение которых пока неизвестно.

В целом кожа и опорно-мышечный аппарат представляют собой как бы огромный распределенный рецептор, который вынесен наружу для первичной обработки контактных воздействий. Кожа неоднородна по количеству и характеру представленных в ней рецепторов. Есть места очень чувствительные к прикосновению, температурным и болевым воздействиям, есть менее чувствительные. Например, у человека наиболее чувствительны ладонь руки и язык, наименее — средняя зона спины. Различное количество рецепторов отражает неодинаковую значимость соответствующих участков тела. Рецепторы кожи в физиологии принято делить на три группы: медленно

адаптирующиеся, быстро адаптирующиеся и тельца Пачини. Первые формируют непрерывный поток импульсов при постоянном механическом стимуле (например, действии веса человека на стопу). Вторые регистрируют изменяющиеся во времени механические стимулы, при этом величина реакции будет пропорциональна скорости стимула. Третьи представляют собой очень быстро адаптирующиеся рецепторы. В этом смысле уместны следующие бионические аналогии. Медленно адаптирующиеся рецепторы можно рассматривать как ЧЭ датчиков силы (давления) или деформации кожи; быстро адаптирующиеся рецепторы, время адаптации которых 50...500 мс, подобны датчикам скорости, а тельца Пачини являются аналогами ЧЭ датчиков ускорения или вибрации кожи. В тактильных системах их функцию выполняют датчики проскальзывания.

Для передачи раздражений от рецепторов кожи и опорно-двигательного аппарата в организме существует три типа волокон: *A*, *B* и *C*. Эти каналы связи передают различную информацию и отличаются диаметром и степенью миелинизации, и тем самым скоростью проведения нервного импульса. Волокна типа *A* имеют наибольший диаметр (8...12 мкм) и сильно миелинизированы, что позволяет передавать возбуждение со скоростью до 120 м/с. Эти волокна являются каналами передачи сигналов тактильной и кинестетической природы, идущих от мышц, сухожилий и суставов. Волокна типа *B*, снабженные тонкой миелиновой оболочкой, имеют диаметр 4...8 мкм, проводят раздражение со скоростью 15...40 м/с и связаны в основном с температурной и болевой рецепцией. Наконец, волокна типа *C* вообще не содержат миелиновую оболочку, имеют диаметр < 4 мкм и скорость передачи возбуждения 0,5...15 м/с. Они связаны с болевыми и частично температурными ощущениями. В тактильной рецепции наряду с определенной специализацией наблюдается также перекрытие рецепторных каналов, отвечающих за различные функции. Так, болевая и температурная чувствительности преимущественно связаны с самыми тонкими волокнами *C*, а тактильные ощущения проводятся по более крупным волокнам *A* и *B*.

Мы рассмотрели вкратце важнейшие биологические механизмы сенсорных функций, которые являются прототипом информационной (сенсорной) системы робота. Заметим, что во многих случаях одна и та же поведенческая задача может быть решена путем объединения нескольких сенсорных модальностей. Хорошим примером такого взаимодействия является движение. При ходьбе человек использует зрение, тактильную, кинестетическую, а также слуховую сенсорные функции. Однако, как правило, поставляемая этими системами информация оказывается избыточной. Например, чтобы пройти по улице, достаточно использовать всего три информационных канала. Замещение одной сенсорной функции другой получило название сенсорной компенсации. В частности, тактильная рецепция слепого частично замещает зрение. Принцип замещения широко используют в робототехнике.

В4. Понятие об информационном подходе

Введенное выше понятие информационной системы (см. В2) нуждается в уточнении. Можно независимо от функционального назначения говорить об уровнях информационной структуры. Действительно, в зависимости от

масштаба анализируемых явлений каждую информационную структуру можно рассматривать соответственно в терминах информационного устройства, информационной системы и информационной сети. Так, молекула в масштабе вещества является «элементарным кирпичиком», в масштабе собственных размеров — некоей системой, в масштабе атома — сложной сетью взаимодействий. Данный подход позволяет информационную структуру различного уровня и различной природы рассматривать с системных позиций и использовать принципы системного проектирования. Представление информационных устройств в виде некоторых технических систем (описываемых как совокупность взаимосвязанных аппаратно-программных средств, имеющих общую функциональную схему и предназначенных для выполнения единой технической задачи) позволяет применять современные методы синтеза сложных систем (например, метод целевых функций).

В качестве примера рассмотрим информационную систему, в которой происходит последовательное *преобразование информации*. Для простоты ограничимся двумя преобразователями R и Q . При анализе этой модели воспользуемся известным подходом Шеннона — фон Неймана, определяющим информацию I как меру случайного выбора. Согласно этому подходу, в альтернативной ситуации любое событие оценивается не содержанием, а вероятностью или «редкостью» его наступления. В результате при осуществлении случайного выбора полученной информации оказывается тем больше, чем меньше ожидается совершившееся событие. Тогда при числе возможных вариантов событий n количество информации I , получаемой в ходе реализации выбора, пропорционально $\ln n$:

$$I = \ln n, \text{ или } I = \ln \left(\frac{1}{P} \right),$$

где P — вероятность события.

Из этой формулы следует, что если сообщение очевидно (или событие обязательно произойдет), то $P = 1$ и $I = 0$. Интересно, что это выражение оказалось с точностью до константы тождественным знаменитому соотношению Больцмана для энтропии H термодинамической системы: $H = k \ln n$, где k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹; n — число состояний, которые может принимать система. В интерпретации Больцмана энтропия равна нулю в случае полностью упорядоченной структуры. Заметим, что рост информации приводит к уменьшению энтропии системы.

Если сообщения (или события) неравновероятны, то формула Шеннона принимает вид

$$I = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i.$$

Здесь P_i — вероятность того, что система находится в i -м состоянии ($i = 1, 2, \dots, N$), а основание логарифма определяет единицу измерения величины I .

Таким образом, информация является вероятностной (статистической) характеристикой процесса, а ее количественной мерой служит величина устраненной неопределенности в результате совершения системой некоторых действий в этом процессе (например, при получении сообщения). Тогда под полной информацией будем понимать то ее количество, которое приобретается одной системой (назовем ее приемником) при полном выяснении состояния другой системы (назовем ее источником). Этот процесс можно интерпретировать как дешифрацию полученного сообщения. Полная информация численно равна энтропии источника. *Полезная* (ценная) *информация* — это количество содержащейся в отдельном сообщении информации, уменьшающее неопределенность сведений о системе-источнике. В этом смысле отрицательное значение полезной информации есть дезинформация.

Количественная оценка эффективности передачи информации от одной системы к другой представляет собой трудную задачу. Более простое решение основано на применении негэнтропийного принципа Бриллюэна, согласно которому носителем информации в измерительной системе является энергия. Получение данных о каком-либо событии или процессе связано с затратой энергии. Для иллюстрации этого подхода вернемся к обобщенной информационной системе, состоящей из двух преобразователей R и Q . Эти преобразователи описываются соответственно функциональными операторами $\Phi(R)$ и $\Phi(Q)$, переводящими их из одного состояния в другое. Для однозначной системы операторы могут быть заменены функциями преобразования. Применительно к рассматриваемому примеру x, y — сигналы; $F(x, t, T)$ и $F(y, t, T)$ — функции преобразования информационных элементов R и Q соответственно; t и T — влияющие факторы (время и температура). При этом каждый из преобразователей системы, удовлетворяя единой целевой функции, может оптимизироваться по собственному частному критерию качества, учитывающему назначение и структуру отдельного преобразователя.

Процесс измерения, выполненный некоторым устройством, представляет собой соответствующее преобразование содержащейся в сигналах x и y информации. Это преобразование сопровождается определенной потерей полезной информации ΔI , которая, например для устройства R , равна

$$\Delta I_R = I_{\text{ввых}R} - I_{\text{вх}R}.$$

Потеря полезной информации в устройстве соответствует его «энтропийному вкладу» в процесс измерения. Л. Бриллюэн предложил оценивать эффективность преобразования информации с помощью информационного КПД η_I . По Бриллюэну количество информации на выходе устройства $I_{\text{ввых}R}$ зависит от характеристик последнего, а также внешних влияющих факторов (наводок, помех и т. д.). Следовательно, потеря полезной информации в преобразователе характеризуется его собственной погрешностью ϵ_0 и дополнительной «флюктуационной погрешностью» в измерение ϵ_ϕ , которую вносят влияющие факторы.

Информационный КПД $\eta_I = 1/k_\varepsilon$, где k_ε — коэффициент потери точности. С одной стороны, k_ε показывает, насколько собственный вклад в потерю точности превышает дополнительный:

$$k_\varepsilon = \varepsilon_0 / \varepsilon_\Phi = \sqrt{W_\Sigma / W_0},$$

где W_Σ и W_0 — полная (потребляемая) и полезная (использованная) энергия соответственно.

С другой стороны, он однозначно определяется величиной потерь полезной информации ΔI :

$$\lg \eta_I^2 = -2\Delta I.$$

Поскольку энергетический КПД устройства $\eta_W = W_0 / W_\Sigma$, то

$$\eta_W = 1/k_\varepsilon^2 = \eta_I^2,$$

а следовательно,

$$\eta_W = 1/10^{2\Delta I}.$$

Данное выражение указывает на связь информационных и энергетических процессов в измерительном устройстве. Рассмотренный подход, описывающий информационно-энергетические процессы в системе, получил название информационного. В последние годы жизни К. Шеннон также развивал этот подход. Им была получена важная формула, связывающая информационную пропускную способность I/t с полосой частот Δf , используемых при передаче информации:

$$\frac{I}{t} = \Delta f \log(1 + P_c / P_{\text{ш}}),$$

где P_c , $P_{\text{ш}}$ — мощность сигнала, переносящего информацию, и шумов соответственно.

Контрольные вопросы

1. Являются ли электронные часы датчиком?
2. Как изменяется энтропия воды при фазовых превращениях?
3. Почему единицей информации выбран бит?
4. Чему равно информационное сообщение при выпадении сообщения «6» на игральной кости?
5. Зависит ли выходной сигнал датчика от его импеданса?

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Практика измерений в России имеет тысячелетнюю историю. Еще во времена Киевской Руси в ходу были «антропометрические» единицы — вершок, пядь, локоть. Первая попытка стандартизации измерений датируется 1070 г., когда великий князь Святослав Ярославович ввел в качестве меры длины свой «золотой пояс». Весовые меры (осьмины) появились во времена Ивана Грозного и были узаконены Двинской грамотой. Петр I допустил к хождению в России английские меры (футы, дюймы). В XIX в. Россия делала попытки ввести единые стандарты на все основные физические величины. По инициативе Петербургской Академии наук в 1875 г. была собрана Парижская конференция, на которой было учреждено Международное бюро мер и весов. Эта организация оказалась не слишком эффективной. Только через 85 лет, в начале 60-х годов XX в. под руководством проф. Г. Бурбона создается Международная комиссия по разработке единой системы проведения измерений. С 1963 г. существует международное соглашение по предпочтительной системе метрологических единиц (СИ).

1.1. Датчики и их характеристики

Датчик (*измерительный преобразователь*) — это устройство, обеспечивающее функциональное преобразование одной величины в другую величину, участвующую в некотором информационном процессе. Рассматривая физические процессы в преобразователях, можно установить связь между выходным y и входным x сигналами (рис. 1.1, *a*), изменяющимися во времени:

$$y = f(x).$$

Математическое (или графическое) описание этой связи называется *функцией преобразования* датчика (рис. 1.1, *б*). В большинстве случаев информационные характеристики датчиков, в том числе их функцию преобразования, определяют на основании анализа преобразования сигналов в системе.

Для датчиков с линейной функцией преобразования используют *коэффициент преобразования*:

$$K = y_i / x_i,$$

где x_i , y_i — текущие значения x и y .

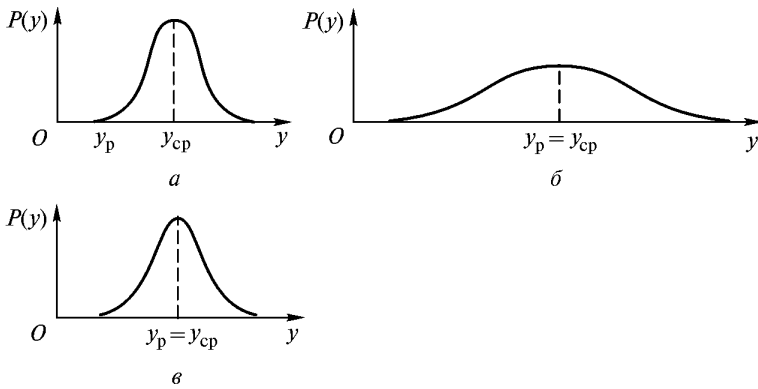


Рис. 1.9. Кривые распределения выходной величины, характеризующие постоянство (а), правильность (б) и точность (в) датчика

1. Выделить измеряемый параметр и выбрать методику его измерения.
2. Разработать структуру информационных модулей, максимально используя симметричные и дифференциальные схемы.
3. Определить влияющие факторы и сформировать рабочие условия функционирования датчика.
4. Провести градуировку датчика и определить его функцию преобразования.
5. Вычислить относительную систематическую погрешность датчика.
6. Провести серию испытаний и установить закон распределения случайной погрешности: вычислить математическое ожидание и дисперсию случайной погрешности; определить относительную случайную погрешность датчика.
7. Рассчитать полную погрешность датчика и указать доверительный интервал.
8. Составить паспорт на датчик.

Контрольные вопросы

1. Как определить полосу пропускания датчика?
2. Можно ли установить реальную функцию преобразования датчика?
3. Зависит ли динамическая чувствительность датчика от статической?
4. Обладает ли датчик первого порядка собственной частотой?
5. Какой параметр характеризует быстродействие датчика?
6. От каких параметров зависит собственная частота датчика второго порядка?
7. Какую погрешность — аддитивную или мультипликативную — вызывают климатические факторы?
8. Можно ли случайную погрешность сделать систематической?
9. В чем основное достоинство дисперсионных оценок?
10. Как связаны между собой средние квадратические погрешности при единичном измерении и при нескольких измерениях?

2. ЭЛЕМЕНТЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Основой любой информационной системы является первичный преобразователь, или ЧЭ, изменяющий свое состояние под действием разнообразных факторов. В общем случае каждый ЧЭ реагирует на различные воздействия, не являясь таким образом датчиком определенного параметра. Именно это обстоятельство привело к появлению погрешностей измерения. Предварительная обработка, в том числе и компенсация погрешностей, осуществляется измерительной цепью. В нее кроме основных ЧЭ, предназначенных для измерения параметров сигналов, включают дополнительные компенсационные ЧЭ, служащие для устранения погрешностей.

2.1. Чувствительные элементы датчиков

Среди ЧЭ, используемых в технике, будем рассматривать лишь те, которые используются при формировании кинестетической, локационной, визуальной и тактильной сенсорных функций — основных функций робототехнических и мехатронных систем.

В соответствии с физическим принципом, положенным в основу преобразования информации, различают следующие основные типы ЧЭ:

- резистивные (в том числе тензо- и фоторезисторы);
- электромагнитные (индуктивные, индукционные и др.);
- преобразователи Холла;
- оптические;
- пьезоэлектрические.

2.1.1. Резистивные чувствительные элементы

Резистивные ЧЭ нашли широкое применение во всех областях измерительной техники. Принцип их действия основан на измерении вариаций электросопротивления (далее — просто сопротивления) резистора R , определяемого по формуле

$$R = \rho l / s,$$

где ρ , l и s — удельное электросопротивление, длина и сечение проводника соответственно.

Промышленно выпускают аналоговые и цифровые резистивные ЧЭ.

Аналоговые резистивные ЧЭ изготавливают из проводников, полупроводников и проводящих жидкостей. Они имеют сопротивление в диапазоне $1 \dots 10^6$ Ом. Сопротивление цифровых ЧЭ, представляющих собой разные

Контрольные вопросы

1. Какой тип тензорезисторов обладает наибольшей чувствительностью?
2. Как обеспечить инвариантность чувствительности пьезоэлектрического элемента к его размерам?
3. Что такое сечение Кюри?
4. Какой из преобразователей является генераторным — лампа накаливания, фотодиод или тензорезистор?
5. Что такое диаграмма направленности светодиода?
6. Зачем используется дифференциальное включение преобразователей?
7. Линейна ли потенциометрическая схема?
8. Каково условие равновесия мостовой схемы?
9. Сколько корректирующих звеньев содержит трехкаскадный усилитель?
10. Что такое синфазная помеха?

3. КИНЕСТЕТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

В робототехнике и мехатронике наибольшее распространение получили кинестетические датчики. Решение любых задач, связанных с контролем линейных и угловых параметров перемещения, обеспечением заданной скорости движения, невозможно без датчиков этого типа. В настоящее время свыше 70 % информационных устройств промышленного производства реализуют кинестетические функции. Кинестетические сенсоры по типу входного воздействия подразделяют на три группы: 1) датчики положения и перемещения; 2) датчики скорости; 3) датчики усилий и акселерометры.

3.1. Датчики положения и перемещения

Датчиком положения и перемещения (ДПП) называется устройство, воспринимающее контролируемое положение и (или) перемещение объекта и преобразующее его в выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки, хранения или передачи по каналу связи. Существует два основных метода определения положения и измерения перемещения. В первом случае датчик вырабатывает сигнал, который является функцией положения одной из его частей, связанной с подвижным объектом, а изменение этого сигнала характеризует перемещение объекта. Во втором случае перемещение объекта рассматривается как совокупность элементарных перемещений, причем датчик формирует импульс, соответствующий каждому элементарному перемещению. Таким образом, перемещение объекта определяется суммой импульсов датчика.

Датчики первой группы получили название абсолютных (или датчиков с абсолютным отсчетом), второй — относительных (или датчиков последовательных приращений).

К ДПП робототехнических и мехатронных систем предъявляют следующие требования:

- полная погрешность не более 1 %;
- время установления не более 0,01 с;
- надежность не менее 0,9;
- высокая помехоустойчивость;
- хорошая технологичность;
- низкая стоимость.

ДПП по пяти основным признакам подразделяют на следующие группы:

- 1) по измеряемому параметру — линейные и угловые (поворотные);
- 2) по принципу действия — резистивные, электромагнитные, фотоэлектрические (оптоэлектронные) и электростатические (емкостные);

Сравнительная характеристика промышленных прецизионных ОДП

Модель	Тип	Размерность выходного кода	ε , %	Скорость преобразова- ния, отсч./с	Размеры		m , кг
					d	l	
ФПУ-16 (Россия)	Одно- шкальный	16	0,0015	20 000	70	140	0,9
SpecialRI (Германия)	»	27	0,00002	10 000	310	85	2,1
ДПК-1 (Россия)	Двушкаль- ный	15	0,001	7000	75	170	0,95

Контрольные вопросы

1. Зависит ли линейность резистивного датчика положения или резольвера от нагрузки?
2. В чем отличие индуктивного и индукционного датчиков?
3. Как ориентированы силовые линии магнитного поля резольвера?
4. Что такое электрическая редуция?
5. Зачем в электромагнитных датчиках положения используют многополюсные обмотки?
6. Почему обмотки ротора индуктосинов смещены между собой на $(1/4)w$?
7. Для чего в растровых датчиках используют интерполяцию?
8. Позволяет ли код Грея увеличить точность кодового датчика положения?
9. В чем отличие унитарного и прямого двоичного кодов?
10. Чему равна погрешность импульсного датчика, диск которого содержит 5000 штрихов?

4. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И ДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

При разработке современных систем управления недостаточно контролировать только параметры положения исполнительного механизма. Во многих случаях требуется управлять скоростью и ускорением исполнительного механизма, а также моментом или силой на его валу. Кроме того, в последние годы резко возросла необходимость контроля качества быстропротекающих процессов, особенно в металлургии, энергетике, атомной технике. Появившиеся в конце XX в. высокопроизводительные интегральные вычислительные устройства позволили строить такие системы управления.

В данной главе рассмотрены принципы построения измерителей скорости, а также моментов и сил. В соответствии с приведенной в гл. 3 классификацией эти устройства относятся к классу кинестетических датчиков.

4.1. Датчики скорости

В мехатронных и робототехнических системах в большинстве случаев приходится определять скорости вращающихся деталей или узлов, поэтому под тахометрическими датчиками обычно понимают датчики угловой скорости. Они служат для измерения и стабилизации скорости привода в заданных пределах. Контроль скоростных показателей существенно повышает плавность хода и точностные характеристики приводов, является необходимым условием при построении систем управления позиционно-контурного типа.

Принцип действия большинства промышленных *датчиков скорости* основан на законе Фарадея $\mathcal{E} = - d\Phi/dt$, в соответствии с которым ЭДС индукции \mathcal{E} прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ . Конечно, не во всех датчиках скорости используется электромагнитный метод преобразования. Например, для обеспечения необходимой точности при измерении очень малых или очень больших скоростей лучше применять оптические (лазерные, интерферометрические и др.) способы преобразования. В то же время именно электромагнитный метод позволяет создавать измерители скорости, не нуждающиеся в источниках питания, например использующие принцип генерации ЭДС индукции в обмотках датчика при взаимодействии его магнитной системы с ферромагнитными деталями вращающегося объекта.

Наиболее известным типом углового датчика скорости является *тахогенератор* (ТГ). Среди основных задач, решаемых с помощью ТГ, необходимо

«парных» витках ЭДС взаимно компенсируются, уменьшая тем самым суммарную ЭДС.

Еще одним способом повышения точности датчика является ограничение диапазона его рабочих частот. Верхняя граничная частота определяется длительностью скачков Баркгаузена и составляет $10^2 \dots 10^5$ Гц (для ферритов до 10^7 Гц), нижняя зависит от частоты источника питания $f_{\text{ип}}$ и составляет не менее $3 f_{\text{ип}}$.

В табл. 4.6 приведена сравнительная характеристика различных электромагнитных ДДВ.

Таблица 4.6

Примеры промышленных электромагнитных ДДВ

Модель	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	$T, ^\circ\text{C}$	$\epsilon, \%$	Размеры, мм				$m, \text{кг}$
					d	l	b	h	
ВК-5 (Россия)	Вибрация	2...5000 Гц	-30...+100	5	20	30	-	-	0,12
BES-150 (Германия)	Дальность	0,5...150 мм	Н.д.	1	33	76	-	-	0,27
С-041 (Россия)	Давление	$10 \dots 10^6$ Па	-50... +100	1,3	-	68	53	88	0,6
NBB-5 (Германия)	Перемещение	0...25 мм	-25... +70	1	20	80	-	-	0,3
RC-15 (Германия)	Скорость	0...10 м/с	-25... +70	1	-	15	41	65	0,4

По своим эксплуатационным характеристикам электромагнитные ДДВ во многом подобны электростатическим. Их достоинства — простота конструкции и эксплуатации (питание от сети переменного тока 50 или 400 Гц), низкая стоимость, температурная стабильность, а также высокий уровень и мощность выходного сигнала, недостатки — невысокая линейность и низкая по сравнению с пьезоэлектрическими и магнитоупругими датчиками жесткость.

Контрольные вопросы

1. Зависит ли частота выходного напряжения асинхронного ТГ от скорости вращения?
2. В каких единицах измеряется магнитодвижущая сила?
3. От каких параметров зависит мультипликативная погрешность ТГ постоянного тока?
4. Можно ли в конструкции ТГ постоянного тока исключить щеточный узел?
5. Какой тип пьезоэффекта используется в пьезогенераторах?

6. Какой ДДВ обладает большей линейностью — электромагнитный или емкостной?
7. Какие ДДВ наиболее чувствительны к условиям внешней среды?
8. Для каких ДДВ характерна большая выходная мощность — пьезоэлектрических или магнитострикционных?
9. Можно ли использовать пьезоэлектрические ДДВ для измерения статических сил?
10. Зависит ли вид эквивалентной электрической схемы ДДВ от частотного диапазона?

5. ЛОКАЦИОННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Локационные информационные системы (ЛС) относятся к устройствам бесконтактного действия и реализуют бионическую функцию слуха. Информативным параметром этих систем является модулированная волна различной физической природы, характеристики которой определяются интегральными свойствами среды распространения. В робототехнике и мехатронике ЛС используют для определения координат и скорости объектов в задачах управления и навигации, для обеспечения необходимой траектории движения исполнительного механизма вблизи границы раздела сред, а также в качестве средств безопасности. Отдельной областью их применения является определение свойств среды распространения. Во всех случаях преобразователи ЛС являются датчиками среды. Поскольку и система, и объект находятся в некотором физическом поле, результаты измерения существенно зависят от его свойств. В зависимости от пространственно-временных свойств среды различают потенциальные (например, электростатические) и вихревые (электромагнитные и акустические) поля. Как правило, вихревые поля содержат больше параметров, пригодных для измерения, и поэтому более информативны. Тем не менее иногда (например, при работе на малых расстояниях) целесообразно использовать ЛС, принцип действия которых основан на свойствах потенциальных полей. Однако в любом случае необходимые данные получают из переносимой полем информации об объекте.

ЛС подразделяют по трем основным признакам:

по физической природе носителя информации — электромагнитные, акустические, оптические, пневматические, электрические и магнитные;

по способу локации — активные и пассивные;

по типу модулирующей функции — непрерывные и импульсные.

Активные ЛС регистрируют отраженный эхо-сигнал, в то время как пассивные воспринимают собственное излучение объекта. Примером активной ЛС является акустический дальномер, пассивной — вихретоковая система.

5.1. Теоретические основы локации

5.1.1. Общие сведения

Движение волны, представляющее собой колебательный процесс распространения возмущения в некоторой среде, происходит с конечной скоростью c и описывается волновым уравнением вида

В заключение отметим основные достоинства оптронных и лазерных ОЛС: малая постоянная времени (до 50 нс), широкий диапазон и высокая точность измерений, возможность измерения геометрических характеристик движущихся объектов, а также их скоростей, высокая надежность и прочность конструкции. В то же время эти системы не лишены недостатков, наиболее существенные из которых — низкая помехозащищенность и чувствительность к отражающим свойствам объектов, температурная зависимость светового потока; для оптронных ОЛС также характерна малая оптическая мощность.

В табл. 5.10 дана сравнительная характеристика ОЛС.

Таблица 5.10

Основные параметры ОЛС

Модель	Тип	Дальность, м	Быстродействие, мс	ϵ , %	Размеры, мм				m , кг
					d	l	b	h	
РФ8422 (Россия)	Оптронный, видимого диапазона	6	1	1	53	112	–	–	0,2
ДОБЦ-15 (Россия)	Оптронный, инфракрасного диапазона	0,05...8	2	1	8	28	–	–	0,3
LS05 (Германия)	То же	1	1	0,5	8	20	–	–	0,1
МН-10 (Израиль)	»	20	Н.д.	5	–	80	60	43	0,4
NRT-390 (Япония)	Лазерный, инфракрасного диапазона	500	Н.д.	0,01	2,5	8	–	–	Н.д.
Гранат (Россия)	То же	20 000	Н.д.	10^{-4}	–	410	330	330	15

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами описывается волновое уравнение?
2. Какой тип модуляции колебаний имеет самый узкий спектр?
3. Можно ли использовать вихретоковый датчик для контроля ферромагнитных материалов и диэлектриков?
4. Какой локационный прибор обладает бóльшей разрешающей способностью — ультразвуковой локатор или электромагнитный радар?
5. Какое колебание имеет линейчатый спектр?
6. От каких параметров зависит расхождение и затухание ультразвуковой волны?

7. В каких единицах измеряются яркость и освещенность?
8. Для чего используется конденсор?
9. Какой тип лазерного излучателя обладает наибольшей мощностью?
10. Что такое диафрагма и для чего ее применяют?

6. СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Человек по визуальному каналу получает более 60 % всей информации, регулирующей его взаимодействие с внешней средой. От глаз к мозгу передаются сигналы по двум из трех миллионов нервных волокон. Это же справедливо и для искусственных сенсорных систем: те из них, которые используют визуальную информацию, обладают наибольшей информативностью. В классе оптических ЛС особое место занимают СТЗ, относящиеся к группе бесконтактных пассивных информационных средств. Для большей части СТЗ характерно отсутствие излучателя. Однако в некоторых случаях, например в рентгеновских телевизионных системах, излучатель используют. Функционируют СТЗ в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения — от 10^{-12} до 10^{-1} м, но наибольшее распространение получили СТЗ, работающие в видимом диапазоне длин волн (0,38...0,78 мкм).

Сейчас в промышленности СТЗ применяют для контроля качества продукции, отслеживания контуров при механической обработке и дуговой сварке, а также в задачах сборки и монтажа деталей, конвейерной сортировки, видеонаблюдения и др.

Рынок СТЗ быстро растет. Так, если в 1994 г. в США было выпущено около 60 тыс. систем со средней стоимостью 20 тыс. долларов, то к началу XXI в. их производство увеличилось в 3,4 раза. Доля США в мировом производстве СТЗ составляет около 40 %, Японии и Франции — по 15 %, Великобритании и Германии — по 8 %. Выпуском СТЗ занимаются более 200 крупных фирм.

6.1. Общие сведения

Существенной особенностью СТЗ является необходимость формирования *изображения* объекта, которое представляет собой распределение амплитуды его двумерной функции яркости $Y(x, y)$.

Все окружающие предметы поглощают и отражают разное количество излучения в зависимости от его длины волны, поэтому спектральная отражательная способность каждого объекта распределяется в видимом диапазоне длин волн неравномерно. Это приводит к тому, что поверхность объекта воспринимается разноцветной. Неодинаковой будет и амплитуда отраженного от него сигнала, т. е. его яркость. Разница в средней яркости соседних структур воспринимается как их контраст. Средняя яркость окружающей среды варьируется в широких пределах: от 10^{-6} кд/м² пасмурной

7. СИСТЕМЫ ТАКТИЛЬНОГО ТИПА

Во введении было отмечено, что тактильная чувствительность организма связана с проприорецепторами, которые вырабатывают сигналы в тот момент, когда происходят изменения статических и динамических силовых факторов в опорно-двигательном аппарате. Поэтому тактильная система человека тесно связана с его кинестетической системой. В робототехнике эти два вида рецепции принято разделять. При этом отдельно рассматривают тактильные датчики, служащие для определения вариаций давления на рабочих поверхностях исполнительного механизма, и силомоментную информационную систему, предназначенную для измерения динамических напряжений в сочленениях и захватном устройстве манипулятора. Учитывая общность функций рассмотренных информационных средств, отнесем их к классу систем тактильного типа.

Системы тактильного типа наиболее часто используют в задачах механической обработки и сборки, абразивной зачистки, шлифовки поверхностей, упаковке, разборе деталей из навала и т. д. Представляют интерес процессы контроля сил при обработке резанием и сборке деталей, при регулировании давления в гидравлических системах станочного и специального оборудования и во всех других случаях, когда необходимо обеспечить заданные силовые показатели.

7.1. Общие сведения

Тактильная рецепция роботов в отличие от других сенсорных функций реализуется не локализованной в пространстве системой анализаторов, а большим количеством разнотипных датчиков, распределенных по всей поверхности исполнительного механизма. Обычно для силового (тактильного) очувствления манипулятора используют определенные зоны, расположенные либо на исполнительном механизме, т. е. на манипуляторе робота или его захватном устройстве (схвате), либо непосредственно на объекте работы (например, на опорах стола, на котором установлена деталь). В соответствии с этим будем рассматривать две структуры информационной системы: открытую (объект) и связанную (захватное устройство и манипулятор робота, рис. 7.1). На рисунке выделены шесть зон очувствления, а также обозначены следующие силовые факторы: $F_{об}$ и $M_{шi}$ — сила и момент, возникающие на объекте манипулирования и в i -м шарнире манипулятора соот-

ния образов в СТЗ. Сложность обработки данных возрастает при наличии шумовых факторов. Поэтому большинство успешных экспериментов в этой области проводили с предметами простой геометрической формы — шарами, кубами, цилиндрами и т. д. Некоторые обнадеживающие результаты достигнуты в ортопедии французами М. Брио и М. Рено при разработке протезов конечностей, а также в задачах определения трехмерной формы отпечатков стопы и ладони.

Контрольные вопросы

1. Какой тип упругих элементов обладает наибольшей чувствительностью?
2. Зависит ли точность СМД от его матрицы жесткости?
3. Компенсирует ли устройство с вынесенным центром податливости действие крутящих моментов?
4. От каких параметров СМД зависит уровень перекрестных связей?
5. Каково минимальное число тензорезисторов в шестикомпонентном СМД?
6. Зависит ли вид матрицы чувствительности от типа первичных преобразователей?
7. В чем сущность ситуационного управления?
8. Зависит ли устойчивость системы управления робота от параметров СМД?
9. В чем разница между одноточечным и двухточечным контактом при сборке?
10. Зависит ли линейность функции преобразования тактильной матрицы от приложенной силы?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом издании автор стремился показать, что преобразование информации в сенсорных системах роботов и в живых организмах имеет общие корни. Применение бионического подхода к проектированию информационных систем в робототехнике оказывается эффективным как на аппаратном, так и на программном уровне.

Преобразование информации в робототехнике выполняется на нескольких иерархических уровнях: в чувствительном элементе, датчике, информационной системе и информационной сети. При этом, не дискутируя о терминах, предлагается использовать понятие «полезная информация», связав его с назначением информационного устройства — измерением параметров внутренней и внешней среды робота. Такой подход, в свою очередь, позволяет, используя функции преобразования, с помощью единого математического аппарата описывать информационные процессы в системах разной модальности. Для этого систему аппроксимируют цепью информационных элементов, для каждого из которых определяют собственную функцию преобразования. В книге приведены примеры анализа систем, состоящих из последовательной цепи информационных преобразователей.

В последние годы на рынке стали появляться информационные устройства нового поколения, получившие название «интеллектуальные датчики», в которых объединены функции измерения, обработки информации и принятия решения. Несмотря на перспективность таких разработок они пока еще достаточно дороги и имеют весьма ограниченную область применения, как правило, не связанную с робототехникой. Поэтому в книге приводятся только некоторые общие сведения о принципах построения таких датчиков. Тем не менее автор отдает себе отчет о том, что в книге рассмотрены далеко не все датчики и алгоритмы обработки информации, применяемые в робототехнике и мехатронике, а лишь наиболее распространенные типы информационных систем и соответствующие им схмотехнические решения. Некоторые известные решения сведены в таблицы, где дана их сравнительная характеристика. Такое представление поможет читателю выбрать конкретное устройство для своей задачи и послужит отправной точкой для создания более совершенных информационных устройств и систем.

Автор надеется, что, изучив книгу, читатель сможет самостоятельно проектировать датчики с требуемыми характеристиками или обоснованно выбирать необходимые технические решения из числа известных моделей, а также разрабатывать алгоритмическое обеспечение информационных систем для конкретного применения.

Элементы информационных систем роботов

Датчики робототехнических и мехатронных систем имеют различные модификации, однако их конструктивное исполнение однотипно. В приложении приведены наиболее известные кинестетические (рис. П1 – П3), локационные (рис. П4 – П6), визуальные (рис. П7) и силомоментные (рис. П8) датчики, а также показано их включение в кинематическую цепь манипулятора (рис. П9 – П11).

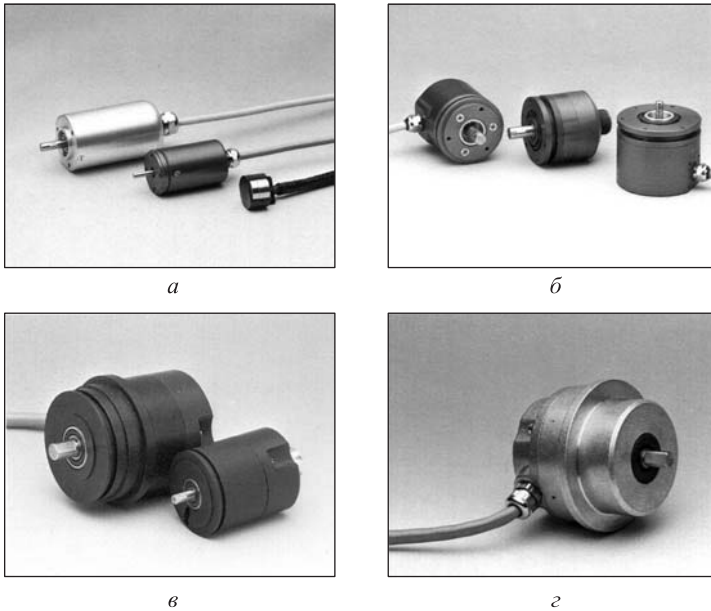


Рис. П1. Электромагнитные (а) и оптические импульсные (б) датчики положения, датчики скорости (в), кодовый оптический датчик положения (г)

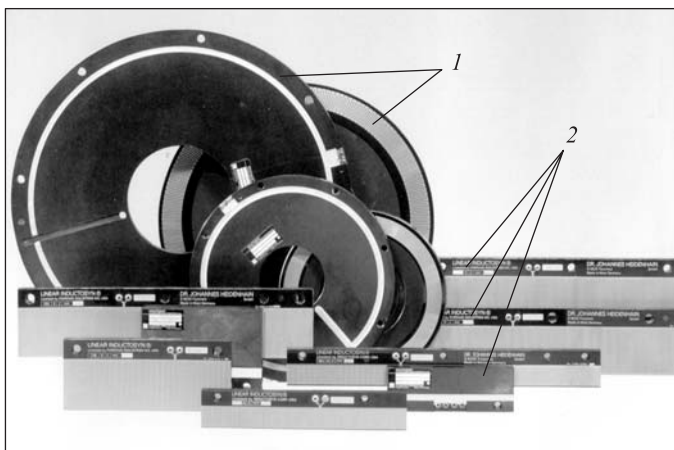
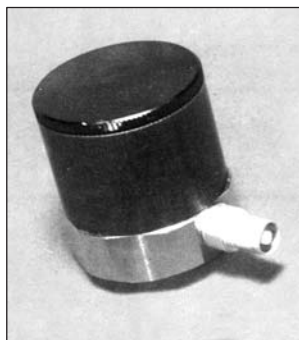
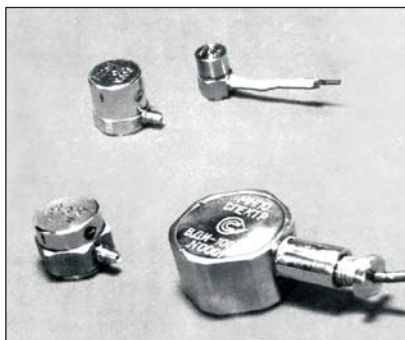


Рис. П2. Поворотные (1) и линейные (2) индуктоины



a



б

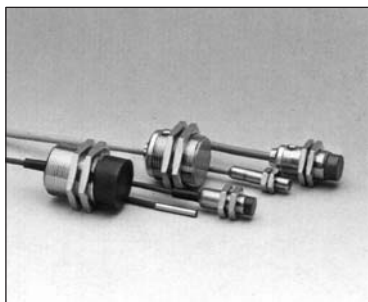
Рис. П3. Магнитоупругий (*a*) и пьезоэлектрические (*б*) датчики динамических величин



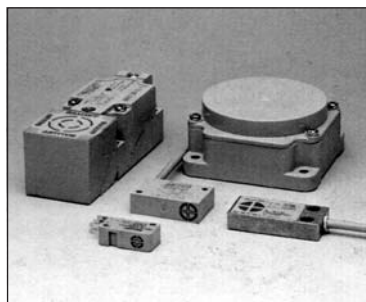
a



б



в



г

Рис. П4. Индуктивные датчики для измерения малых расстояний:
a – б – с регулируемым диапазоном переключений; *в* – с дискретным выходом;
г – специального исполнения

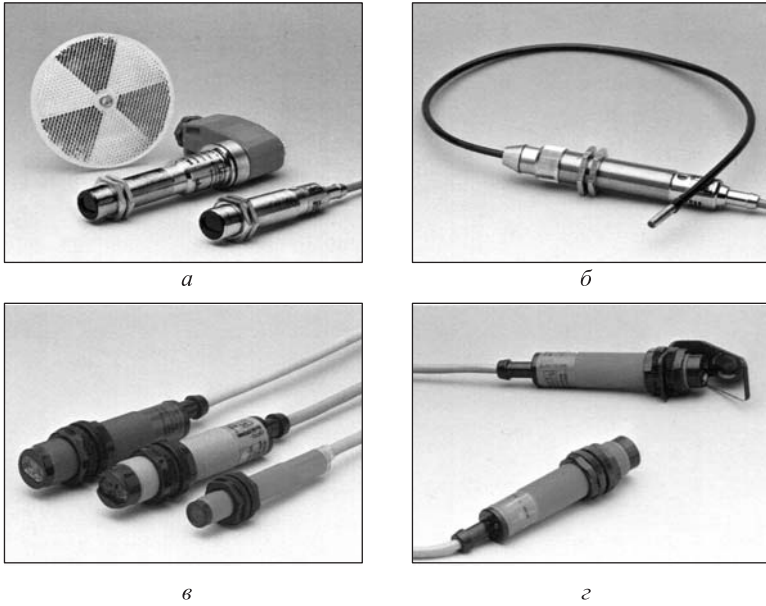


Рис. П5. Оптронные датчики для измерения расстояния:

а – с диффузным отражением, дальность действия до 400 мм; *б* – бесконтактный переключатель, дальность действия до 2 м; *в* – *г* – то же, повышенной (до 16 м) дальности

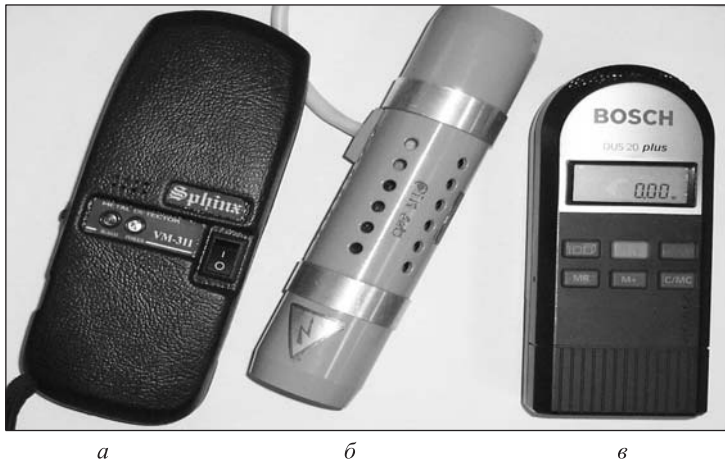


Рис. П6. Элементы локационной системы:

а – вихрегоковый датчик; *б* – лазерный излучатель; *в* – акустический дальномер

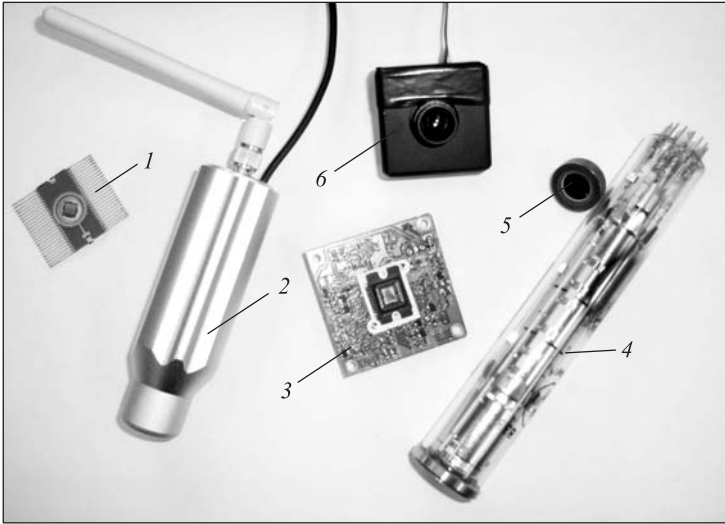


Рис. П7. Датчики и элементы СТЗ:

1 – фотодиодная матрица; 2 – беспроводная телекамера; 3 – матрица на ПЗС; 4 – вакуумная трубка видикона; 5 – фотодиод; 6 – телекамера на ПЗС

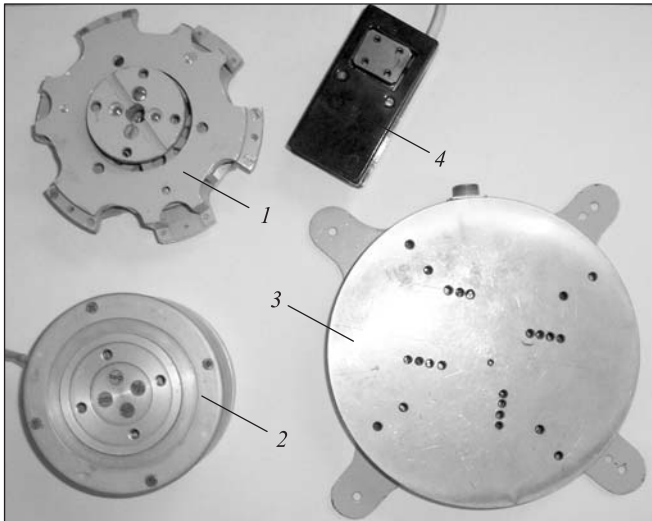


Рис. П8. Устройства и датчики системы силомоментного очувствления:

1 – устройство с вынесенным центром податливости; 2 – «интеллектуальный» силомоментный датчик; 3 – сборочный столик; 4 – датчик силы

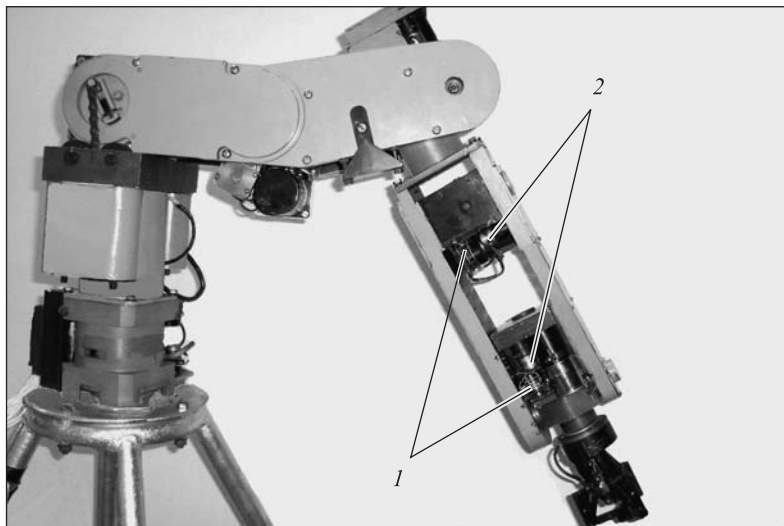


Рис. П9. Манипулятор УЭМ-5 и его кинестетическая система:
1 – датчики положения; 2 – датчики скорости

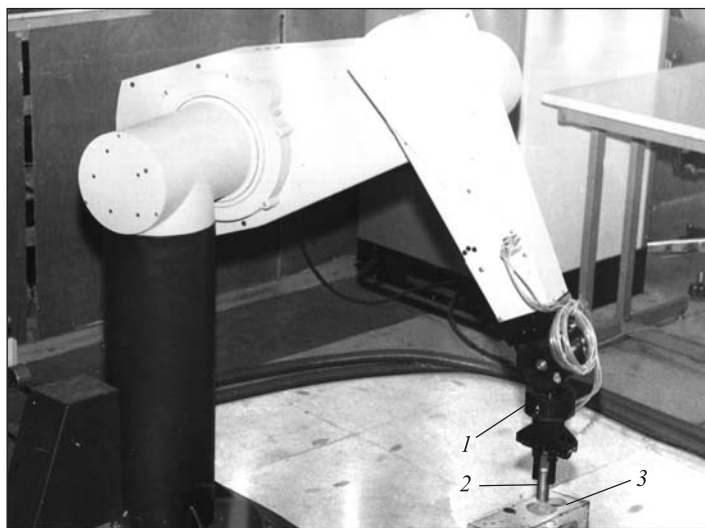


Рис. П10. Адаптивный сборочный робот РМ-01 с силомоментным очувствлением:
1 – «интеллектуальный» силомоментный датчик; 2 – устанавливаемая деталь;
3 – сборочный узел

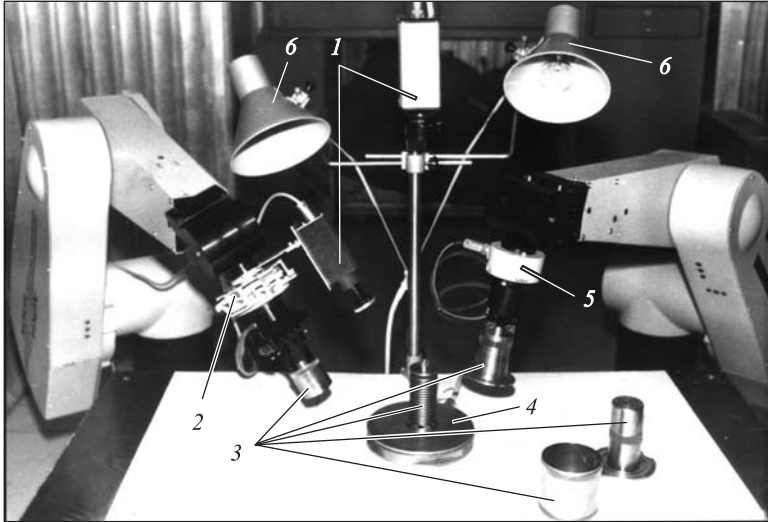


Рис. П11. Адаптивный сборочный комплекс с роботами РМ-01:

1 – телевизионные камеры; 2 – устройство с вынесенным центром податливости; 3 – детали;
4 – силомоментный датчик типа «сборочный столик»; 5 – «интеллектуальный» силомоментный датчик;
6 – светильники

Список рекомендуемой литературы

- Аш Ж., Андре П., Бофрон Ж.* Датчики измерительных систем. В 2 т.: Пер. с фр. М.: Мир, 1992.
- Бауман Э.* Измерение сил электрическими методами: Пер. с нем. М.: Мир, 1978.
- Блиндер Е.М., Фурман С.Л.* Телевидение. М.: Радио и связь, 1984.
- Бриндли К.* Измерительные преобразователи: Справ. пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- Брускин Д.Е., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.* Электрические машины. В 2 т. М.: Высш. шк., 1987.
- Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине: Пер. с англ. М.: Наука, 1983.
- Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. А.А. Ахметжанова.* М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Вульвет Дж.* Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1991.
- Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю.* Управление манипуляционными системами на основе информации об усилиях. М.: Изд. фирма «Физико-математическая литература», 1994.
- Дудель Й., Рюэгг И., Шмидт Р.* Физиология человека: В 3 т. Т. 1 / Пер. с англ.; Под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса. М.: Мир, 1996.
- Исии Т., Симояма И., Иноуэ Х.* Мехатроника / Пер. с яп.; Под ред. В.В. Василькова. М.: Мир, 1988.
- Куафе Ф.* Взаимодействие робота с внешней средой: Пер. с фр. М.: Мир, 1985.
- Марр Д.* Зрение: информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов / Пер. с англ.; Под ред. И.Б. Гуревича. М.: Радио и связь, 1987.
- Неразрушающий контроль и диагностика систем / Под ред. В.В. Клюева.* М.: Машиностроение, 1995.
- Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
- Письменный Г.В., Михайлов Б.Б., Корнеев А.Ю.* Системы технического зрения в робототехнике. М.: Машиностроение, 1991.
- Письменный Г.В., Солнцев В.И., Воронников С.А.* Системы силомоментного оучувствления роботов. М.: Машиностроение, 1990.
- Системы оучувствления промышленных роботов и гибких производственных систем / Под ред. И.М. Макарова, Е.П. Попова.* М.: Наука, 1989.
- Тиль Р.* Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- Техническое зрение роботов / Под общ. ред. Ю.Г. Якушенкова.* М.: Машиностроение, 1990.
- Физический энциклопедический словарь.* В 5 т. / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энцикл., 1991.
- Фу К., Гонсалес Р., Ли К.* Робототехника / Пер. с англ.; Под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989.

Чернавский Д.С. Синергетика и информация (динамическая теория информации). М.: Едиториал УРСС, 2004.

Шеннон К. Математическая теория связи: Пер. с англ. М.: Иностранная литература, 1963.

Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений: Пер. с нем. М.: ЭКОМ, 1997.

Электроника. Энциклопедический словарь / Под ред. В.Г. Колесникова. М.: Сов. энцикл., 1991.

Энциклопедия кибернетики. В 2 т. / Под ред. В.М. Глушкова., Киев: Гл. ред. укр. сов. энцикл., 1974.

Ющенко А.С., Подураев Ю.В. Адаптивные робототехнологические комплексы для механической обработки и сборки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.

Предметный указатель

- Апертура 306
– оптической системы 228, 232
– фильтра 306, 309
- Быстродействие 38, 41, 244, 279, 337
- Видикон 263, 266, 268
- Георадар 193
Главный вектор сил и моментов 329
Глубина резкости объектива 232, 239
- Дальномер 18
– акустический 38, 167, 205, 215
– лазерный 238
- Датчик 16
– визуальный 16
– второго порядка 36, 149
– генераторный 17
– динамических величин 145, 369
– – – магнитоупругий 153, 208
– – – пьезоэлектрический 146, 152, 212
– – – электромагнитный 162, 165
– – – электростатический 157, 208
– изображения 263, 267, 276
– кинестетический 16, 89
– локационный 16
– параметрический 17
– оптический 18
– первого порядка 36
– положения и перемещения 89
– – – импульсный 126
– – – кодовый 129
– – – оптический 120
– – – растровый 113, 121
– – – резистивный 90
– – – электромагнитный 97
– силомоментный 16, 34, 328
– – с матрицей жесткости общего вида 339
– – с механическим разделением компонент 340
– скорости 16, 137
– тактильный 16, 328, 363
– – касания 365
– – давления 365
– – проскальзывания 368
Демодуляция сигналов 180
Диафрагма 228
Динамический диапазон 218
Диод полупроводниковый 180
– – лазерный 63
– – светоизлучающий 63, 344
– фотопринимающий 16, 64, 126, 344
- Избирательность 34, 337
Излучатель когерентный 221
Измерительная схема 71
– – генераторная 79
– – мостовая 46, 75, 350
– – параметрическая 72
– – потенциометрическая 72
– цепь 17, 336
Изображение 26, 243
– алгоритмы бинаризации 304
– – кодирования 290, 315
– – предварительной обработки 302
– – сегментации 302, 314
– – описания 302, 316
– – пространственного дифференцирования 310
– – – Лапласа 313
– – – Робертса 311
– – – Собеля 312
– – распознавания 319, 321, 361
– – фильтрации 305

- анизотропной 307
- высокочастотной 305
- медианной 309
- методом порогового сглаживания 307
- сжатия-расширения 309
- низкочастотной 305
- рекуррентной 308
- векторное 286
- монохромное 285
- палитровое 285
- растровое 286
- трехмерное 323
- формирование 303
- Импеданс 71, 97, 198
- Индуктосин 100, 117, 120
- Информационная система 17, 19, 330
- Информация 13, 14, 173, 221, 260, 355
- преобразование 30, 315, 336

Камера

- видео 263
- телевизионная 263
- на ПЗС 272
- с фотодиодной матрицей 275
- Код Грея 131,
- длин серий 315
- унитарный 126
- Фримана 315
- Кодирование адаптивное 291
- без потерь информации 291, 315
- групповое 292
- компонентное 256, 284
- межфреймовое 299
- методом субдискретизации 295, 298
- неадаптивное 291
- по Хаффману 291
- с потерей информации 292
- фрактальное 297
- Конденсор 233
- Коэффициент видности 223
- влияния 34, 337, 345, 351
- затухания 36, 168
- концентрации 172
- нагрузки 92
- ослабления 201
- синфазного сигнала 82

- преобразования 33, 43, 140, 158
- пьезосопротивления 53
- температурный 53
- трансформации 102
- усиления 82

Локационные системы 167

- акустические 195
- вихретоковые 186
- магнитные 183
- оптические 220
- оптронные 229, 235
- лазерные 229, 236

Магнитная запись изображений 280

- Матрица жесткости 336, 339, 342
- ПЗС 271, 279
- фотодиодная 279
- чувствительности 336, 341, 344, 346
- Якоби 336, 362

Металлоискатель 191

- Микрофон 209, 212
- конденсаторный 209
- пьезоэлектрический 209
- электродинамический 209
- Модуляция сигналов 173
- амплитудная 175, 254, 261
- импульсная 179, 205
- кодовая 219
- частотная 177, 205, 262
- фазовая 178, 205, 215

Направленность излучения 63, 170

- диаграмма 63, 171, 203, 210
- ширина главного максимума 172

Объектив 230

- телевизионный 230
- широкоугольный 230
- Оптическая сила 225

Погрешность 242

- абсолютная 43
- аддитивная 43
- дополнительная 45
- закон распределения 48
- мультипликативная 44
- нелинейности 93, 106, 142, 163, 337

- основная 45
- относительная 43
- приведенная 43
- прогрессирующая 45
- систематическая 44
- случайная 45
- Полоса пропускания 38, 157, 205, 254
- Постоянная времени 39, 70, 148
- Поток магнитный 56, 103, 114, 137
 - поперечный 103, 105, 140
 - продольный 101, 139
- световой 64, 112, 122
- Преобразование дискретно-косинусное 289, 293, 298
 - информации 30, 41, 210, 336
- Преобразователь
 - измерительный 33
 - обратимый 158, 212
 - первичный 16
 - электроакустический 208
 - Холла 59
- Признаки 244, 302, 316
 - геометрические 317
 - глобальные 316
 - локальные 317
- Пропускная способность 20, 32, 219, 283
- Пьезоэффект обратный 66, 146, 208
 - поперечный 68
 - продольный 67, 147
 - прямой 66, 146, 208
- Разрешающая способность датчика** 44, 93
 - объектива 228
 - телекамеры 264
- Разрешение 264
 - по амплитуде 280
 - пространственное 279
- Распознавание образов 244, 250, 316
- Растр магнитный 113
 - оптический 121
 - телевизионного кадра 251
- Резольвер 100, 106, 110
 - линейный 106
 - многополюсный 101
 - симметрирование 104
 - синусно-косинусный 102
- Редуктосин 100, 115
- Светосила оптической системы 227, 231
- Сигнал изображения 251
 - композитный 260, 283
 - цветности 251, 259
 - цветоразностный 260
 - яркости 251, 259
- Скорость колебательная 198
 - линейная 52, 93
 - угловая 23, 52, 109, 137
- Спектр сигнала 81, 175, 177, 205, 253
- Схема дроссельная 56
 - трансформаторная 56, 98
 - эквивалентная 149, 159, 164
- Тахогенератор** 137
 - асинхронный 138
 - постоянного тока 142
- Тензорезистор 16, 52, 332, 349
 - полупроводниковый 54, 342
 - проволочный 54
 - фольговый 54
- Усилитель дифференциальный** 82
 - измерительный 81
 - операционный 81
 - прецизионный 87
 - с буферными каскадами 86
- Устройство с вынесенным центром податливости 333
- Фазовращатель** 107
- Фреймграббер 246, 276
- Фокус 222
- Функция преобразования 31, 33, 74, 92, 103, 154, 301, 336
- Характеристика датчика** градуировочная 35, 38
 - спектральная 21, 63, 65, 266
 - частотная 35
- Цветовая модель аддитивного синтеза** 255
 - аппаратно-независимая 256
 - субтрактивного синтеза 256
- Частота дискретизации** 179, 218, 278, 284

- сигнала верхняя 197, 253
- – круговая 35, 102, 160
- – модулирующая 173, 178
- – несущая 80, 108, 173, 254, 343
- – нижняя 197, 253
- – поднесущая 80, 260
- системы резонансная 25, 79, 148, 208
- – собственная 36, 337
- – среза 84, 93, 109
- Чувствительность датчика 35
- порог 44
- спектральная 64, 222, 259
- Чувствительный элемент 16, 29, 97, 364
- оптический 62, 66
- пьезоэлектрический 67
- резистивный 51
- совмещенный 351
- электромагнитный 56

- Шкала** грубого отсчета 109, 133
- точного отсчета 109, 133

- ЭДС** вращения 140
- индукции 56, 97, 100, 184
- самоиндукции 100

- Яркость** 223, 231, 250
- гистограмма распределения 304
- градиент 310
- порог 304

Учебное издание

Сергей Анатольевич Воротников

Информационные устройства робототехнических систем

Редактор Е.Н. Ставицкая

Корректор О.Ю. Соколова

Художник Н.Г. Столярова

Компьютерная верстка О.В. Беляевой

Компьютерная графика М.А. Белявской

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

Санитарно-эпидемиологическое заключение

№ 77.99.02.953.Д.005683.09 от 13.09.2004 г.

Подписано в печать 14.04.2005. Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Печ. л. 24. Уч.-изд. л. 30,5. Усл. печ. л. 31,2.

Тираж 2000 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Отпечатано с готового оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука»

121099, Москва, Шубинский пер., 6