

Матьяж Михель · Тадей Байд
Алеш Удэ · Ядран Ленарчич
Алеш Становник · Марко Муних
Юре Рейц · Себастьян Шлайпах

Робототехника

Второе издание

Робототехника

Матьяж Михель • Тадей Байд • Алеш Удэ
Ядран Ленарчич • Алеш Становник
Марко Муних • Юре Рейц • Себастьян Шлайпах

Робототехника

Второе издание

Матьяж Михель
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

Тадей Байд
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

Алеш Удэ
кафедра автоматики,
Биокибернетика и робототехника
Институт Йозефа Стефана
Любляна, Словения

Ядран Ленарчич
Институт Йозефа Стефана
Любляна, Словения

Алеш Становник
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

Марко Муних
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

Юре Рейц
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

Себастьян Шлайпах
Электротехнический факультет
Университет Любляны
Любляна, Словения

ISBN 978-3-319-72910-7 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72911-4>

ISBN 978-3-319-72911-4 (электронная книга)

Контрольный номер Библиотеки Конгресса: 2018946678

1-е издание: © Springer Science+Business Media BV, 2010 г. 2-е издание: © Springer International Publishing AG, часть Springer Nature, 2019 г. Эта работа защищена авторским правом. Все права сохраняются за Издателем, будь то весь материал или его часть, в частности права на перевод, перепечатку, повторное использование иллюстраций, декламацию, трансляцию, воспроизведение на микрофильмах или любым другим физическим способом, а также на передачу или хранение информации. Поиск, электронная адаптация, компьютерное программное обеспечение или аналогичная или отличающаяся методология, известная в настоящее время или разработанная в будущем.

Использование общих описательных наименований, зарегистрированных наименований, товарных знаков, знаков обслуживания и т. д. в этой публикации не означает, даже при отсутствии конкретного заявления, что такие наименования освобождаются от соответствующих законов и положений об охране и, следовательно, свободны для общего использования. использовать.

Издатель, авторы и редакторы могут с уверенностью предположить, что советы и информация, содержащиеся в этой книге, считаются верными и точными на дату публикации. Ни издатель, ни авторы, ни редакторы не дают гарантий, явных или подразумеваемых, в отношении материалов, содержащихся здесь, или в отношении любых ошибок или упущений, которые могли быть допущены. Издатель остается нейтральным в отношении юрисдикционных претензий в отношении опубликованных карт и институциональной принадлежности.

Напечатано на бескислотной бумаге.

Эти выходные данные Springer опубликованы зарегистрированной компанией Springer International Publishing AG, входящей в состав Springer Nature.

Зарегистрированный адрес компании: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Швейцария.

Предисловие

Возможно, трудно согласиться с тем, что такое робот, но большинство людей, работающих в области робототехники, вероятно, процитируют «отца робототехники» Джозефа Ф. Энгельбергера (1925–2015), пионера промышленной робототехники, заявившего: «Я не могу определить робота, но я узнаю его, когда увижу».

Слово «робот» не происходит из научного или инженерного словаря, но впервые было использовано в чешской драме «RUR» («Универсальные роботы Россума») Карела Чапека, которая впервые была сыграна в Праге в 1921 году. Само слово было изобретено его братом. Йозефом. Робот в драме — искусственный человек, блестящий работник, лишенный всех «ненужных качеств» — эмоций, творчества, способности чувствовать боль. В прологе драмы дается следующее определение роботов: «Роботы не люди (Roboti nejsou lidé). Они механически более совершенны, чем мы, у них поразительные интеллектуальные способности, но у них нет души. Творение инженера технически совершеннее, чем произведение природы».

Книга «Робототехника» создавалась на протяжении десятилетий преподавания робототехники на факультете электротехники Люблянского университета, Словения, где в 1980 г. был опубликован первый учебник по промышленной робототехнике (А. Краль и Т. Байд, «Промышленная робототехника»). Способ подачи этого достаточно сложного предмета был успешно опробован на нескольких поколениях студентов бакалавриата.

Второе издание книги продолжает наследие первого издания, получившего в 2011 году награду «Выдающееся академическое звание» от библиотечного журнала CHOICE. Главной особенностью книги остается ее простота. Вводная глава теперь всесторонне охватывает различные классы роботов, уделяя основное внимание промышленным роботам. Положение, ориентация и перемещение объекта описываются однородными матрицами преобразования. Эти матрицы, лежащие в основе любого анализа механизмов роботов, вводятся с помощью простых геометрических рассуждений. Геометрические модели механизма робота объясняются с помощью оригинального удобного векторного описания. Поскольку мир робототехники является шестимерным, в этом выпуске больше внимания уделялось ориентации концевых эффекторов роботов.

Кинематика и динамика робота реализуются через механизм с двумя вращательными степенями свободы, который, тем не менее, является важной частью наиболее популярных конструкций промышленных роботов. Представление динамики роботов основано только на знании закона Ньютона и дополнительно упрощено для облегчения понимания этого относительно сложного вопроса. Рабочее пространство играет важную роль при выборе робота, соответствующего запланированной задаче. Кинематика параллельных роботов существенно отличается от кинематики последовательных манипуляторов и заслуживает дополнительного внимания.

Сенсоры роботов, представленные в этом выпуске, актуальны не только для промышленных манипуляторов, но и для сложных систем, таких как человекоподобные роботы. Зрение роботов играет все более важную роль в промышленных приложениях, а планирование траектории робота является предпосылкой для успешного управления роботом. Объясняются основные схемы управления, приводящие либо к желаемой конечной траектории, либо к силе между роботом и его окружением. Среда роботов проиллюстрирована процессами сборки продукта, где роботы являются частью производственной линии или работают как полностью независимые единицы. Также описаны роботизированные захваты, инструменты и устройства подачи.

Поскольку производственный цех становится все более сложным, взаимодействие между людьми и роботами становится неизбежным. Коллаборативные роботы предназначены для безопасного взаимодействия человека и робота. Гибкость производства может быть дополнительно повышена за счет использования колесных мобильных роботов. Взгляд в будущее, когда люди и роботы станут компаньонами, представлен в главе о гуманоидной робототехнике, сложность которой требует более глубоких знаний математики. Глава о стандартизации и измерении точности и воспроизводимости представляет интерес для пользователей промышленных роботов.

Книга требует минимального углубленного знания математики и физики. Поэтому он подходит для вводных курсов по робототехнике на инженерных факультетах (электрических, механических, компьютерных, гражданских). Это также может быть интересно для инженеров, которые не изучали робототехнику, но столкнулись с роботами в рабочей среде и хотят получить некоторые базовые знания простым и быстрым способом.

Любляна, Словения
апрель 2018 г.

Матьяж Михель
Тадей Байд

Содержание

1 Введение	1
1.1 Робот-манипулятор	4
1.2 Промышленная робототехника	6
2 Однородные матрицы преобразования	11
2.1 Трансляционное преобразование 11	
2.2 Вращательное преобразование 12	
2.3 Поза и смещение	16
2.4 Геометрическая модель робота	19
3 Геометрическое описание механизма робота	27
3.1 Векторные параметры кинематической пары 27	
3.2 Векторные параметры механизма	31
4 Ориентация	39
5 Двухсегментный робот-манипулятор	49
5.1 Кинематика 5.2	49
Статика	54
5.3 Рабочее пространство	55
5.4 Динамика	60
6 Параллельные роботы	69
6.1 Характеристики параллельных роботов.....	69
6.2 Кинематические схемы параллельных роботов	73
6.3 Моделирование и проектирование параллельных роботов	78
7 Датчики робота	85
7.1 Принципы измерения	85
7.2 Датчики движения	86
7.2.1 Размещение датчиков	86
7.2.2 Потенциометр	87

7.2.3 Оптический энкодер	88
7.2.4 Магнитный энкодер	92
7.2.5 Тахометр	93
7.2.6 Инерциальная единица измерения.....	94
7.3 Контактные датчики	96
7.3.1 Тактильный датчик	96
7.3.2 Концевой выключатель и бампер	98
7.3.3 Датчик силы и крутящего момента	98
7.3.4 Датчик крутящего момента в соединении	101
7.4 Датчики приближения и дальности	102
7.4.1 Ультразвуковой дальномер	102
7.4.2 Лазерный дальномер и лазерный сканер	103
8 Обзор робота	107
8.1 Конфигурация системы	107
8.2 Проекция вперед	108
8.3 Обратная проекция	113
8.3.1 Одиночная камера	113
8.3.2 Стереовидение	115
8.4 Обработка изображений	118
8.5 Позиция объекта на изображении	118
8.5.1 Калибровка камеры	118
8.5.2 Позиция объекта	120
9 Планирование траектории	123
9.1 Интерполяция траектории между двумя точками	123
9.2 Интерполяция с использованием промежуточных точек	126
10 Управление роботом	133
10.1 Управление роботом во внутренних координатах	134
10.1.1 PD-управление положением	135
10.1.2 PD-управление положением с компенсацией силы тяжести ...	136
10.1.3 Управление роботом на основе обратной динамики	137
10.2 Управление роботом во внешних координатах	141
10.2.1 Управление на основе транспонированной матрицы Якоби	142
10.2.2 Управление на основе обратной матрицы Якоби	143
10.2.3 PD-управление положением с компенсацией силы тяжести ...	144
10.2.4 Управление роботом на основе обратной динамики	144
10.3 Управление контактной силой 10.3.1	147
Линеаризация роботизированной системы посредством обратной Динамика	148
10.3.2 Управление усилием	149

11 Окружающая среда робота.....	153
11.1 Безопасность робота	153
11.2 Периферийные устройства робота в сборочных процессах	158
11.2.1 Конфигурации сборочной производственной линии	158
11.3 Подающие устройства	160
11.4 Конвейеры	164
11.5 Роботизированные захваты и инструменты	165
12 Коллаборативные роботы.....	173
12.1 Коллективная система промышленных роботов	173
12.2 Коллаборативный робот	175
12.3 Совместная работа.....	177
12.3.1 Контролируемый останов с рейтингом безопасности	178
12.3.2 Ручное управление	178
12.3.3 Контроль скорости и эшелонирования	180
12.3.4 Ограничение мощности и усилия	181
12.4 Совместные роботизированные захваты	184
12.5 Применение коллаборативной роботизированной системы	185
13 Мобильные роботы.....	189
13.1 Кинематика мобильного робота	190
13.2 Навигация	197
13.2.1 Локализация	197
13.2.2 Планирование пути	201
13.2.3 Управление траекторией.....	202
14 Гуманоидная робототехника.....	209
14.1 Передвижение двуногих 21.1.....	
14.1.1 Точка нулевого момента 211.....	
14.1.2 Генерация шаблонов ходьбы	213
14.2 Имитационное обучение	216
14.2.1 Наблюдение за движением человека и его передача	
к движению робота-	217
гуманоида 14.2.2 Прimitives динамического движения	221
14.2.3 Свойства сходимости линейной динамики	
Системы	222
14.2.4 Прimitives динамического движения для двухточечного соединения	
Движения	223
14.2.5 Оценка параметров DMP по одному	
Демонстрация	225
14.2.6 Модуляция DMP	227
15 Точность и воспроизводимость промышленных манипуляторов	231
Вывод ускорения при движении по окружности	243
Указатель	247

Глава 1

Введение



Сегодняшнюю робототехнику можно охарактеризовать как науку, занимающуюся разумным движением различных механизмов роботов, которые можно разделить на следующие четыре группы: роботы-манипуляторы, роботизированные транспортные средства, системы человек-робот и биологически вдохновленные роботы (рис. 1.1). Наиболее часто встречающимися роботами-манипуляторами являются серийные механизмы роботов. Робот-манипулятор представлен последовательной цепью твердых тел, называемых сегментами робота, соединенных шарнирами. Более подробно серийные роботы-манипуляторы будут описаны в следующем разделе этой главы. Параллельные роботы представляют значительный интерес как в науке, так и в промышленности. При этом основание робота и платформа соединяются друг с другом параллельными сегментами, называемыми ногами. Сегменты снабжены поступательными актуаторами, а соединения в основании и платформе пассивными. Параллельные роботы в основном используются для задач захвата и размещения. Они характеризуются высокими ускорениями, повторяемостью и точностью. Поскольку роботы-манипуляторы заменяют человека-оператора на различных производственных работах, их размер часто подобен размеру руки человека. Производители также могут предоставить роботов-манипуляторов, которые в десять раз больше и способны манипулировать целыми кузовами автомобилей. Напротив, в областях биотехнологии и новых материалов используются микро- и нанороботы. Нанороботы позволяют толкать, тянуть, манипулировать захватом и размещением, ориентировать, изгибать и нарезать канавки в масштабе молекул и частиц. Наиболее распространенный наноманипулятор основан на принципе атомно-силового микроскопа. Приводом этого наноманипулятора является пьезоэлектрический кристалл, движение которого оценивается с помощью лазерного источника и фотоэлемента.

Автономные роботизированные транспортные средства встречаются на суше, в воде и в воздухе. Наземные мобильные роботы чаще всего применяются в искусственных средах, таких как квартиры, больницы, универмаги или музеи, но их все чаще можно встретить на автомагистралях и даже бездорожье. Тем не менее, большинство мобильных роботов используются на ровной поверхности с движением за счет колес, причем три колеса обеспечивают необходимую устойчивость. Часто колеса специально сконструированы для обеспечения всенаправленного движения. Роботизированные транспортные средства можно найти в качестве пылесосов, автономных газонокосилок, интеллектуальных проводников по универмагам или музеям, обслуживаю

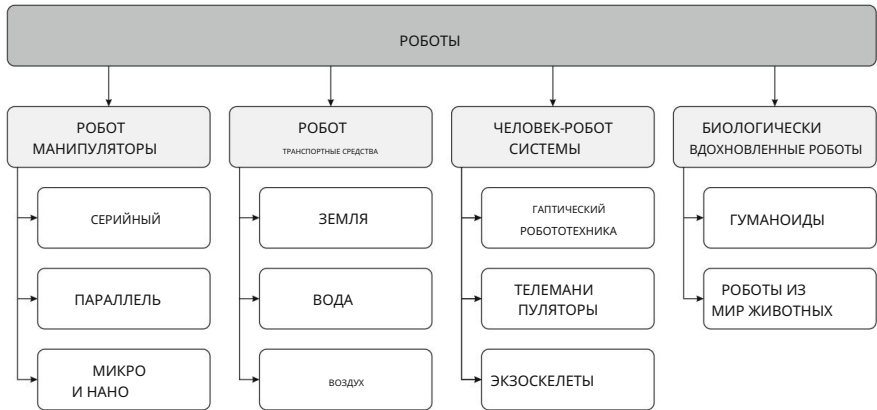


Рис. 1.1 Классификация роботов

в клинических центрах, космических вездеходах или автономных автомобилях. Студенты могут с удовольствием учиться на различных соревнованиях, например, в футболе или играх по спасению, основанных на использовании небольших мобильных роботов. Среди летательных аппаратов наибольшей популярностью пользуются небольшие квадрокоптеры. Они имеют очень простую механическую структуру, что делает их сравнительно недорогими. Квадрокоптеры летают с использованием четырех роторов и оснащены датчиками, такими как гироскопы, акселерометры и камеры, и в основном используются для целей наблюдения. Более крупные автономные версии используются для военных разведывательных миссий. Водные роботы либо плавают на поверхности, либо работают под водой. Подводные версии могут иметь форму небольших автономных подводных лодок. Их часто можно оснастить роботизированной рукой и использовать для исследования океана, наблюдения за морским дном или кораблекрушениями или в качестве обслуживающего персонала на нефтяных платформах. Автономные плавучие роботы используются для морской экологической оценки.

Новые знания в области управления роботами сильно влияют на разработку систем человек-робот, таких как тактильные роботы, телеманипуляторы и экзоскелеты. Использование тактильных роботов связано с виртуальными средами, которые обычно отображаются на экранах компьютеров. Ранние виртуальные среды предоставляли наблюдателю зрение и звук, но не осязание. Тактильные роботы обеспечивают пользователю ощущение прикосновения, ограниченное движение, соответствие, трение и текстуру в виртуальной среде. Тактильные роботы играют важную роль в реабилитационной робототехнике, где небольшие тактильные роботы используются для оценки движений верхних конечностей у парализованных людей. Более сильные тактильные системы могут удерживать запястье парализованного человека и направлять конечную точку руки по желаемому пути, который показывается субъекту в виртуальной среде, представленной на экране компьютера. Тактильный робот воздействует на запястье субъекта двумя видами сил. Когда пациент не может совершить движение по траектории, показанной ему в виртуальной среде, робот толкает запястье по необходимой траектории и помогает пациенту выполнить задание. Робот помогает только в той мере, в какой это необходимо для того, чтобы пациент достиг цели. Когда парализованная конечность пациента отклоняется от

запланированной кривой, робот толкает запястье в окрестности требуемой траектории.

Телеманипуляторы — это роботы, которыми управляет человек-оператор, когда между телеманипулятором и человеком-оператором существует барьер. Барьером между оператором и рабочей средой обычно является либо расстояние (например, космическое пространство), либо опасность (например, внутри атомной станции). Телеманипуляторы проникают и в медицинский мир, находя применение в хирургии (телемедицине). Экзоскелеты представляют собой активные механизмы, которые крепятся к верхним или нижним конечностям человека. В основном они используются в реабилитационных целях. Экзоскелеты нижних конечностей могут увеличить силу здоровых людей или позволить переобучить парализованных людей ходьбе. По сравнению с тактильными реабилитационными роботами, экзоскелеты для верхних конечностей воздействуют на все сегменты парализованной руки.

Биологически вдохновленных роботов можно разделить на роботов-гуманоидов и роботов из мира животных. Примерами из мира животных являются различные виды роботизированных змей, рыб, четвероногих, шести- или восьминогих шагающих роботов. Роботы-гуманоиды на сегодняшний день являются самыми передовыми робототехническими системами в группе биологически вдохновленных роботов. Они предназначены для жизни и работы в среде человека. Наиболее заметным свойством человекоподобных роботов является их способность ходить на двух ногах. Они ходят либо статически устойчивой, либо динамически устойчивой походкой, могут балансировать, стоя на одной ноге, двигаются в соответствии с человеческим шапником, могут даже бегать. Текущие проблемы гуманоидной робототехники связаны с искусственным зрением, восприятием и анализом окружающей среды, обработкой естественного языка, человеческим взаимодействием, когнитивными системами, машинным обучением и поведением. Некоторые роботы также учатся на опыте, воспроизводя естественные процессы, такие как метод проб и ошибок и обучение на практике, точно так же, как учится маленький ребенок. Таким образом, робот-гуманоид получает определенную степень автономии, что также означает, что роботы-гуманоиды могут вести себя в некоторых ситуациях непредсказуемым образом для их создателей-людей. Человекоподобные роботы приходят в наши дома и становятся нашими партнерами. Вскоре они могут стать компаньонами стариков и детей, помощниками медсестер, врачей, пожарных и рабочих. Возникает потребность воплотить этику в роботе, что называется робоэтикой. Робоэтика — это прикладная этика, целью которой является разработка научных/культурных/технических инструментов, которые могут быть общими для различных социальных групп и убеждений. Эти инструменты направлены на продвижение и поощрение развития робототехники для развития человеческого общества и отдельных лиц, а также на предотвращение ее неправомерного использования против человечества. В 1942 году выдающийся писатель Айзек Азимов сформулировал свои знаменитые три закона робототехники. Позже, в 1983 году, он добавил четвертый закон, известный как нулевой закон: ни один робот не может причинить вред человечеству или своим бездействием допустить, чтобы человечество причинило вред. Новое поколение роботов-гуманоидов будет партнерами, которые сосуществуют с людьми, помогая им как физически, так и психологически, и будут способствовать созданию безопасного и мирного общества. Они будут потенциально более этичны, чем люди.

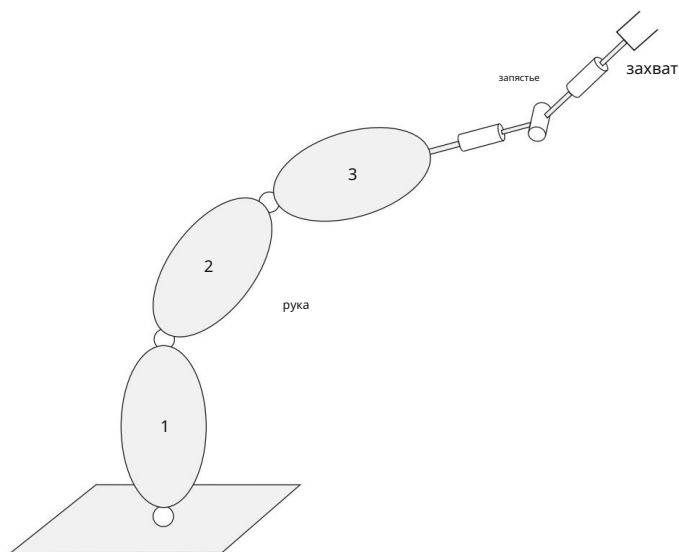


Рис. 1.2 Робот-манипулятор

1.1 Робот-манипулятор

На сегодняшний день наиболее полезными и эффективными робототехническими системами являются промышленные роботы-манипуляторы, которые могут заменить людей на сложных или монотонных работах или там, где человек в противном случае столкнулся бы с опасными условиями. Манипулятор робота состоит из руки робота, запястья и захвата (рис. 1.2). Манипулятор робота представляет собой последовательную цепь из трех жестких сегментов относительной длины, обеспечивающих позиционирование захвата в рабочем пространстве. Соседние сегменты манипулятора робота соединяются через шарнир робота, который бывает (рис. 1.3) либо поступательным (призматический), либо вращательным (вращательным). Вращательный сустав имеет форму шарнира и ограничивает движение двух соседних сегментов вращением вокруг оси сустава. Относительное положение определяется углом поворота вокруг оси сустава. В робототехнике углы суставов обозначаются греческой буквой ϑ . На упрощенных схемах вращательный узел представлен цилиндром. Поступательный сустав ограничивает поступательное движение двух соседних сегментов. Относительное положение между двумя сегментами измеряется как расстояние. Символом поступательного шарнира является призма, а расстояние обозначается буквой d . Соединения роботов приводятся в действие либо электрическими, либо гидравлическими двигателями. Датчики в суставах измеряют угол или расстояние, скорость и крутящий момент.

Запястье робота обычно состоит из трех вращательных шарниров. Задачей запястья робота является обеспечение необходимой ориентации объекта, захваченного захватом робота. Двух- или многопальцевый захват робота размещается в конечной точке робота. Различные инструменты для сверления, окраски распылением или сварки также могут быть прикреплены к конечной точке. Промышленные роботы-манипуляторы обычно допускают подвижность в шести градусах.

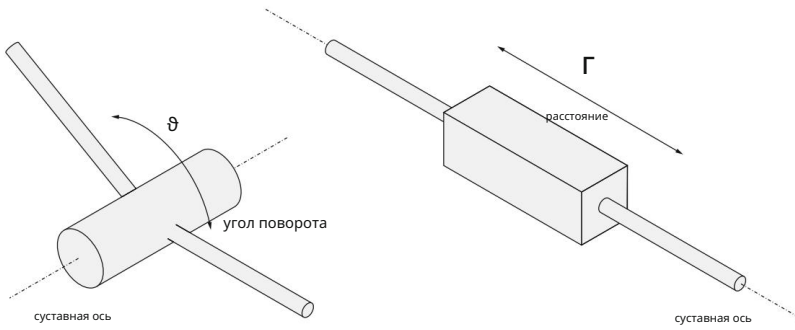


Рис. 1.3 Вращательный (слева) и поступательный (справа) шарнир робота

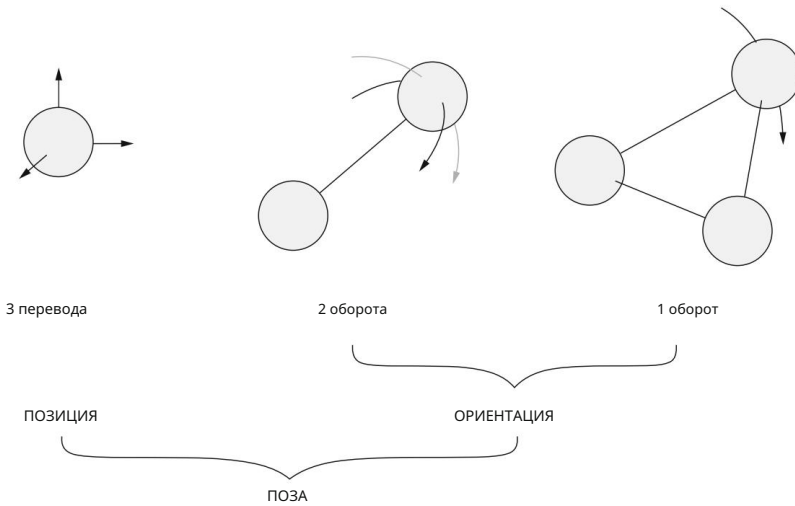


Рис. 1.4 Степени свободы твердого тела

свобода, а это означает, что роботизированный механизм имеет шесть шарниров, а также шесть приводов. Таким образом, манипулятор робота может расположить объект в произвольном месте рабочего пространства робота, в то время как захват может вращать объект вокруг всех трех осей прямоугольной системы координат.

Чтобы уточнить термин «степень свободы», давайте сначала рассмотрим твердое тело, которое обычно представляет собой объект, которым манипулирует промышленный робот. Простейшее твердое тело состоит из трех массовых частиц (рис. 1.4). Единичная массовая частица имеет три степени свободы, описываемые тремя перемещениями вдоль осей прямоугольной рамки. Перемещение вдоль линии называется переносом. Добавим к первой частицу другой массы так, чтобы между ними было постоянное расстояние.

Вторая частица ограничена в движении по поверхности сферы, окружающей первую частицу. Его положение на сфере можно описать двумя окружностями, напоминающими меридианы и широты на земном шаре. Перемещение по окружности равно

называется вращением. Третья массовая частица добавляется таким образом, что расстояния по отношению к первым двум частицам остаются постоянными. Таким образом, третья частица может двигаться по кругу, своего рода экватору, вокруг оси, определяемой первыми двумя частицами. Таким образом, твердое тело имеет шесть степеней свободы: три перемещения и три вращения. Первые три степени свободы описывают положение тела, а остальные три степени свободы определяют его ориентацию. Термин поза используется для обозначения как положения, так и ориентации. Часто говорят, что окружающий нас мир трехмерен, а мир робототехника шестимерен.

Современные промышленные роботы-манипуляторы являются перепрограммируемыми и многоцелевыми. В современном промышленном производстве уже неэкономично хранить большие запасы материалов или продуктов. Это известно как производство «точно в срок». Как следствие, может случиться так, что разные виды определенного продукта попадают на одну и ту же производственную линию в один и тот же день. Эта проблема, наиболее неудобная для стационарных устройств автоматизации, может быть эффективно решена за счет использования перепрограммируемых в промышленности роботов-манипуляторов. Перепрограммируемые роботы позволяют нам переключаться с производства одного типа продукта на другой, нажав кнопку. Кроме того, робот-манипулятор является универсальным механизмом. Механизм робота представляет собой грубую имитацию человеческой руки. Точно так же, как мы используем нашу руку как для точной, так и для тяжелой работы, мы можем применять один и тот же робот-манипулятор для различных задач. Это тем более важно, учитывая достаточно большой экономический срок службы промышленного робота (12–16 лет). Таким образом, может случиться так, что робот-манипулятор, приобретенный для сварочных целей, может быть переназначен для задачи захвата и размещения. У манипуляторов роботов есть еще одно важное свойство, а именно, оси двух соседних суставов либо параллельны, либо перпендикулярны. Поскольку рука робота имеет только три степени свободы, существует ограниченное количество возможных конструкций рук робота. Среди них наиболее часто используются антропоморфные и так называемые роботы-манипуляторы SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly). Антропоморфный тип руки робота (рис. 1.5), имеет все три шарнира вращательного типа и в этом качестве в наибольшей степени напоминает человеческую руку. Вторая ось сустава перпендикулярна первой, а третья ось сустава параллельна второй. Рабочее пространство антропоморфного робота-манипулятора, охватывающее все точки, до которых может дотянуться конечная точка робота, имеет сферическую форму. Манипулятор SCARA появился относительно поздно в развитии промышленной робототехники (рис. 1.6) и преимущественно используется для процессов промышленной сборки. Два шарнира вращательные, а один поступательный. Оси всех трех суставов параллельны. Рабочее пространство манипулятора SCARA имеет цилиндрическую форму. На рынке мы также можем найти три другие коммерчески доступные конструкции манипуляторов роботов: цилиндрическую, декартову и, в меньшей степени, сферическую.

1.2 Промышленная робототехника

Современную промышленность уже нельзя представить без промышленных роботов-манипуляторов, которые можно разделить на три разные группы. К первой группе мы относим промышленных роботов, выполняющих роль хозяина в робототехнической ячейке. Роботизированная ячейка обычно

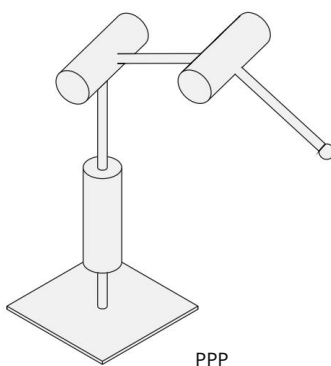


Рис. 1.5 Антропоморфный робот-манипулятор

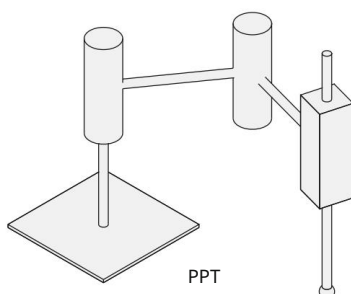


Рис. 1.6 Робот-манипулятор SCARA

компрометирует один или несколько роботов, рабочих станций, буферов хранения, транспортных систем и машин с числовым программным управлением. Во вторую группу входят роботы, являющиеся рабами внутри роботизированной ячейки. В третью группу мы включаем промышленных роботов, которые используются в специальных приложениях (рис. 1.7).

Роботы-мастера в роботизированной ячейке участвуют в следующих производственных процессах: сварка, покраска, нанесение покрытий и герметизация, механическая обработка и сборка.

Роботизированная сварка (точечная, дуговая, лазерная) представляет собой наиболее частое

применение роботов. Он характеризуется скоростью, точностью и аккуратностью. Роботизированная

сварка особенно экономична при выполнении в три смены. Сегодня мы сталкиваемся с самым

большим количеством сварочных роботов в автомобильной промышленности. Там соотношение

людей-работников и роботов составляет 6:1. Промышленные роботы часто используются в

агрессивных или опасных средах, например, при окраске распылением. Роботизированная окраска

распылением представляет собой экономию материала при более высоком качестве окрашенных

поверхностей. Там, где существует токсичная среда, социальная мотивация внедрения роботов может

перевешивать экономические факторы. При механической обработке робот обычно держит либо

заготовку, либо приводной шпиндель и выполняет сверление, шлифование, удаление заусенцев или

другие подобные операции. Роботы-манипуляторы все больше входят в область промышленной

сборки, где составные части собираются в функциональные системы. Электронная и электромеханическая промышлен

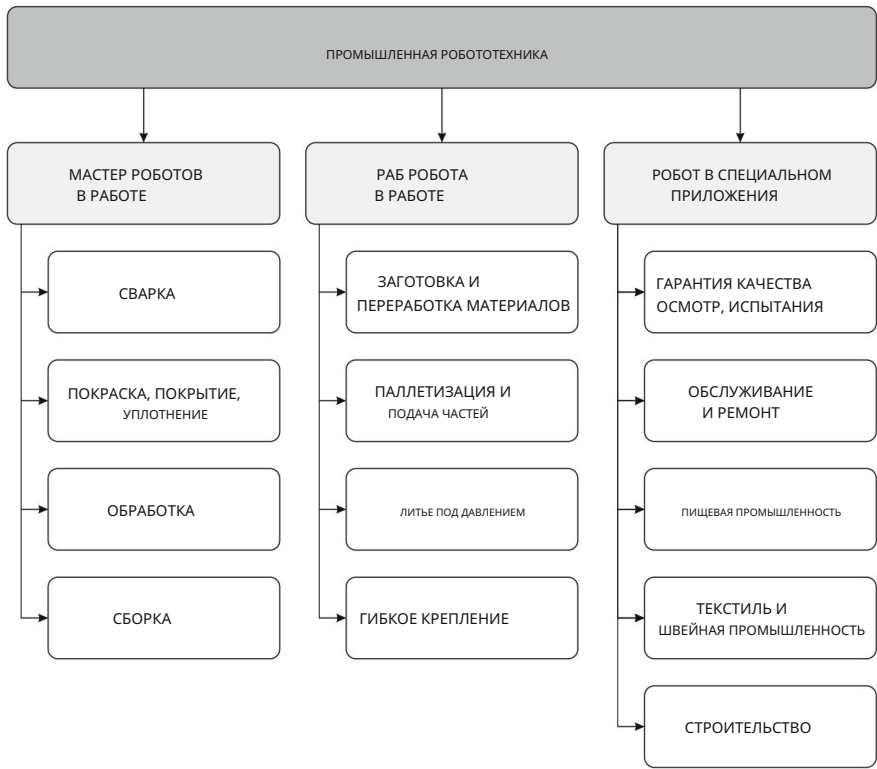


Рис. 1.7 Классификация промышленных роботов

важная область применения сборочных роботов. Есть также интересные сборочные операции в автомобильной промышленности, когда один робот наносит клей на ветровое стекло, а другой робот держит ветровое стекло и вставляет его в отверстие на кузове автомобиля.

Робот играет роль ведомого в следующих промышленных приложениях: обработка заготовок и материалов, укладка на поддоны и подача деталей, литье под давлением и гибкое крепление. В этой ситуации роль мастера может быть отдана станку с числовым программным управлением в роботизированной ячейке. Роботы захвата и размещения представляют собой наиболее распространенное использование роботов при обработке материалов, где задачи часто утомительны или повторяются и потенциально опасны (например, загрузка прессы). Часто промышленные роботы используются в задачах, когда они выполняют точечные перемещения. Такие примеры встречаются при укладке на поддоны, т.е. размещении заготовок или продуктов с целью упаковки или передачи их машине. Роботизированная укладка на поддоны особенно уместна и приветствуется, когда рассматриваются тяжелые предметы (например, бочки на пивоварне). Операции литья под давлением жаркие, грязные и опасные, создавая неприятные условия для людей. С помощью робота литые детали точно ориентируются в машине для литья под давлением. Эффективность роботизированной ячейки может быть по

использование гибких крепежных систем. Гибкость роботизированной ячейки достигается за счет программируемых позиционеров с сервоприводом, что позволяет выполнять производственный процесс быстрее и более ловко.

Специальные области применения промышленных роботов: обеспечение качества, контроль и испытания, техническое обслуживание и ремонт, роботы в пищевой, текстильной и швейной промышленности, а также в строительстве. Обеспечение качества, проверка и тестирование часто применяются в электронной промышленности, где электрические параметры (например, напряжение, ток, сопротивление) проверяются во время сборки электронных схем. В этой ситуации робот выполняет необходимые измерения на объекте (габаритные, электрические), одновременно захватывая и помещая его в новое положение. При обслуживании и ремонте роботов телеуправляемые и автономные роботы используются для различных применений в атомной промышленности, автомобильных и железных дорогах, обслуживании линий электропередач и обслуживании самолетов. Роботы также проникают в пищевую промышленность, где в дополнение к обработке и упаковке в пищевой промышленности они используются для таких задач, как приготовление пищи или даже украшение шоколада. Текстильная и швейная промышленность представляет уникальные проблемы из-за мягкого характера заготовок, что делает работу с текстилем или подобными материалами чрезвычайно сложной. Во всем мире было разработано множество различных типов строительных роботов, однако очень немногие из них были коммерциализированы.

Ключевыми проблемами современной робототехники являются взаимодействие человека и робота и сотрудничество человека и робота. Развитие так называемой мягкой робототехники позволяет людям и роботам взаимодействовать и сотрудничать в промышленных условиях, в сфере обслуживания и в повседневных условиях. При разработке коллаборативных роботов или, короче, коботов должна быть обеспечена безопасность взаимодействия человека и робота. Поэтому анализ человеческих травм, вызванных ударами тупыми или острыми инструментами, был необходим в качестве первого шага в исследованиях совместных роботов. На основе многочисленных исследований столкновений человека и робота были определены безопасные скорости робота при заданных инерционных свойствах робота. Безопасное взаимодействие человека и робота дополнительно гарантируется новыми схемами управления, которые измеряют крутящий момент в каждом суставе робота, обнаруживая малейшие контакты между роботом и человеком-оператором и мгновенно останавливая робота. Предпосылкой для эффективного управления крутящим моментом является чрезвычайно подробная модель динамики. Чтобы сделать робота-манипулятора совместимым при контакте с человеком-оператором, также используется биологический подход. Сохранение энергии в пружинных элементах в шарнирах манипулятора робота делает управление движением эффективным и естественным. Сложные коботы, часто применяемые в качестве робототехнических систем с несколькими руками, нельзя запрограммировать так же, как обычные промышленные роботы-манипуляторы. Необходимо внедрить подходы к когнитивной робототехнике, основанные на методах искусственного интеллекта, таких как имитационное обучение, обучение на демонстрациях, обучение с подкреплением или обучение на вознаграждениях. Таким образом, коботы могут выполнять задачи в неизвестной и неструктурированной среде. Особое внимание также следует уделить рукам роботов. При взаимодействии с оператором-человеком рука робота должна быть гуманоидной, чтобы иметь возможность работать с инструментами и оборудованием, предназначенными для руки человека. Кроме того, рука робота должна измерять силы, прилагаемые для обеспечения мягкого захвата. Современные промышленные роботы из соображений безопасности все еще работают за заборами. Беззащитная промышленная мягкая робототехника может открыть новые непредвиденные области применения, что приведет к более гибкой и рентабельной автоматизации.

Глава 2

Однородные матрицы преобразования



2.1 Трансляционное преобразование

Как указывалось ранее, у роботов есть либо поступательные, либо вращательные суставы. Для описания степени смещения в суставе необходимо единое математическое описание поступательных и вращательных смещений. Поступательное смещение d , заданное вектором

$$d = ai + bj + ck, \quad (2.1)$$

также может быть описана следующей однородной матрицей преобразования H

$$H = \text{Транс}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

При использовании однородных матриц преобразования произвольный вектор имеет следующий вид 4×1

$$d = \begin{matrix} \text{Икс} \\ y \\ g \\ 1 \end{matrix} = xyz \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix}^T. \quad (2.3)$$

Поступательное смещение вектора q на расстояние d получается путем умножения вектора q на матрицу H

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Икс} \\ y \\ g \\ 1 \end{matrix} = \begin{matrix} x + a \\ y + b \\ g + c \\ 1 \end{matrix}. \quad (2.4)$$

Трансляция, представленная умножением на однородную матрицу, эквивалентна сумме векторов q и d

$$v = q + d = (xi + yj + zk) + (ai + bj + ck) = (x + a)i + (y + b)j + (z + c)k. \quad (2.5)$$

В простом примере вектор $1i + 2j + 3k$ трансляционно смещен на расстояние $2i - 5j + 4k$

$$v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -5 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ -3 \\ 7 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Тот же результат получается при сложении двух векторов.

2.2 Вращательное преобразование

Вращательные смещения будем описывать в правосторонней прямоугольной системе координат, где повороты вокруг трех осей, как показано на рис. 2.1, считаются положительными. Положительные повороты вокруг выбранной оси выполняются против часовой стрелки, если смотреть с положительного конца оси в начало координат O кадра $x-y-z$. Положительное вращение можно описать также так называемым правилом правой руки, где большой палец направлен вдоль оси к ее положительному концу, а остальные пальцы показывают

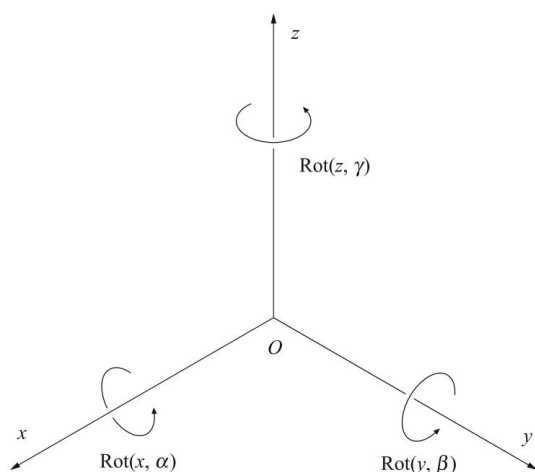
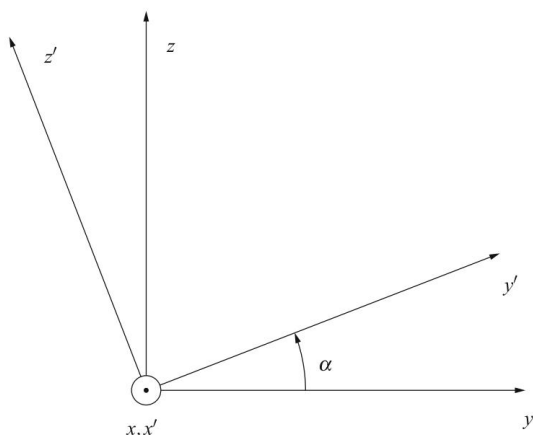


Рис. 2.1 Правосторонняя прямоугольная рамка с положительным вращением



Угол между точкой $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ а по оси x $\begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}$, поэтому мы имеем $\cos \theta$ в пересечения x $\begin{bmatrix} x \\ 0 \end{bmatrix}$ столбец и строку x . Угол между $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ и оси Y

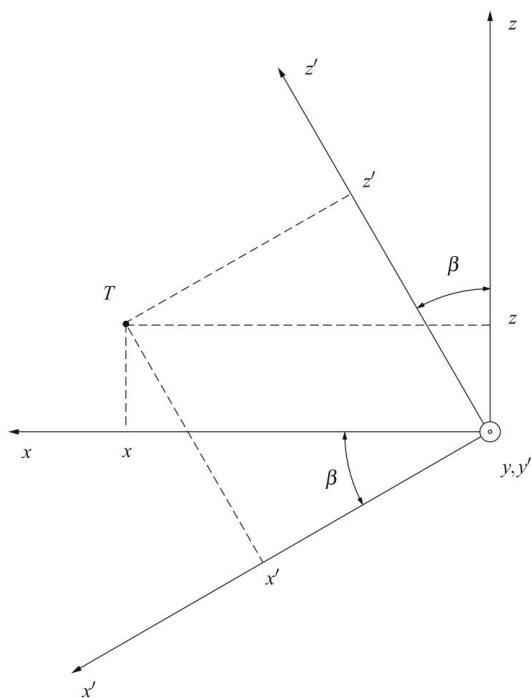


Рис. 2.3 Вращение вокруг оси Y

равен α , мы положили $\cos 90^\circ$ в соответствующем пересечении. Угол между y и y' равен $90^\circ - \alpha$, а оси y — y' , соответствующий матричный элемент равен $\cos \alpha$.

Чтобы лучше познакомиться с матрицами вращения, мы получим матрицу, описывающую вращение вокруг оси y , используя рис. 2.3. Коллинеарные оси y и y'

$$y = y' \quad (2.7)$$

Учитывая подобие треугольников на рис. 2.3, нетрудно вывести следующие два уравнения

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \beta + z \sin \beta && \text{потому что } \beta + \gamma = 90^\circ \text{ грех } \beta \\ z' &= -x \sin \beta + z \cos \beta && \text{грех } \beta + \gamma = 90^\circ \text{ потому что } \beta. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Все три уравнения. (2.7) и (2.8) можно переписать в матричной форме

$$\text{Вращение } (y, \beta) = \begin{pmatrix} y \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Вращение вокруг оси z описывается следующим однородным транс матрица пласта

$$\text{Rot}(z,y) = \begin{pmatrix} \cos y & \sin y & 0 & 0 \\ \sin y & \cos y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

В простом численном примере мы хотим определить вектор w , который получается путем поворота вектора $u = 14i + 6j + 0k$ на 90° против часовой стрелки (т. е. в положительном направлении) вокруг оси z . Так как $\cos 90^\circ = 0$, а $\sin 90^\circ = 1$, несложно определить матрицу, описывающую $\text{Rot}(z, 90^\circ)$, и умножить ее на вектор u

$\Psi =$	0	100	14	6
	1	0 00	6	14
	0	0 10	0	0
	0	0 01	1	1

Графическое представление вращения вектора u вокруг оси z показано на рис. 2.4.

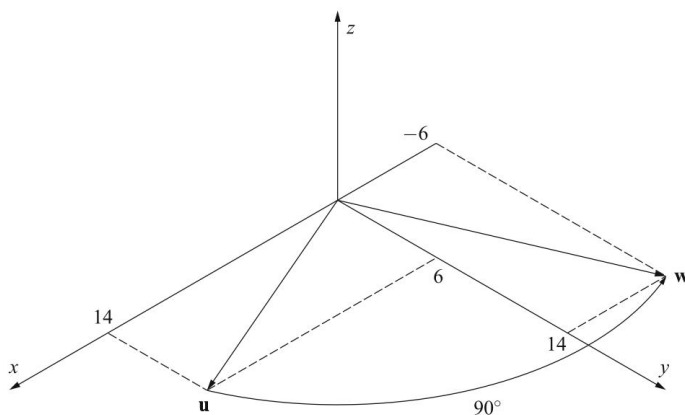


Рис. 2.4 Пример преобразования вращения

2.3 Поза и смещение

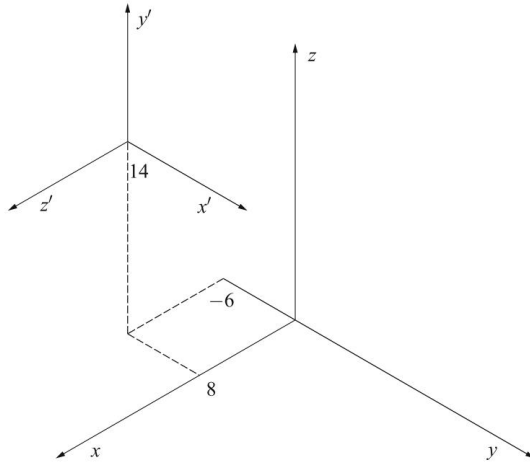
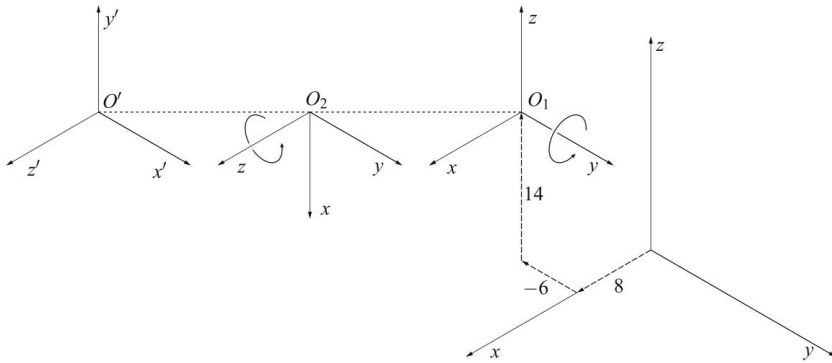
В предыдущем разделе мы узнали, как точка перемещается или вращается вокруг осей декартовой системы координат. В дальнейшем нас будут интересовать перемещения объектов. Мы всегда можем привязать систему координат к рассматриваемому жесткому объекту. В этом разделе мы будем иметь дело с позой и смещением прямоугольных кадров. Здесь мы видим, что матрица однородного преобразования описывает либо положение кадра относительно системы отсчета, либо представляет собой смещение кадра в новое положение. В первом случае верхняя левая матрица 3×3 представляет ориентацию объекта, а правый столбец 3×1 описывает его положение (например, положение его центра масс). Последняя строка матрицы гомотетического преобразования всегда будет представлена как $[0001]$. В случае смещения объекта верхняя левая матрица соответствует повороту, а правый столбец — перемещению объекта. Мы рассмотрим оба случая на простых примерах. Сначала проясним смысл матрицы однородного преобразования, описывающей положение произвольной системы отсчета. Рассмотрим следующее произведение однородных матриц, которое дает новую однородную матрицу преобразования H

$$\begin{aligned}
 H &= \text{Trans}(8, 6, 14) \text{Rot}(y, 90^\circ) \text{Rot}(z, 90^\circ) \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 1 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & 14 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 8 \\ 1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

При определении однородной матрицы, представляющей вращение, мы узнали, что первые три столбца описывают вращение системы отсчета $x'-y'-z'$ относительно системы отсчета $x-y-z$

$$\begin{aligned}
 &\begin{matrix} x' & y' & z' \\ \text{Икс} & & & \end{matrix} \\
 &\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 8 \\ 1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{Икс} \\ y \\ z \end{matrix}
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

Четвертый столбец представляет положение начала системы отсчета $x'-y'-z'$ относительно системы отсчета $x-y-z$. Зная это, мы можем графически представить систему отсчета $x'-y'-z'$, описываемую матрицей однородного преобразования (2.11), относительно системы отсчета $x-y-z$ (рис. 2.5). Ось x указывает на

Рис. 2.5 Положение произвольной системы отсчета $x'-y'-z'$ относительно системы отсчета $x-y-z$ Рис. 2.6 Смещение системы отсчета в новую позу (справа налево). Происхождение O_1 , O_2 и O' находятся в одной точке

направление оси y системы отсчета, y и z . Чтобы ось находилась в направлении оси z , убедиться ось находится в направлении x .

в правильности системы отсчета, нарисованной на рис. 2.6, проверим смещения, включенные в формулу. (2.11). Система отсчета сначала переводится в точку (8, -6, 14), затем поворачивается на 90° вокруг новой оси y и, наконец, на 90° вокруг новой оси z (рис. 2.6). Три смещения системы отсчета приводят к тому же конечному положению, как показано на рис. 2.5.

В продолжение этой главы мы хотим разъяснить второе значение матрицы однородного преобразования, т. е. смещение объекта или системы координат в новую позу (рис. 2.7). Во-первых, мы хотим повернуть систему координат $x-y-z$ на 90° против часовой стрелки вокруг оси z . Это может быть достигнуто следующим пост-умножением матрицы H , описывающей начальное положение

система координат $x-y-z$

$$H1 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ). \quad (2.13)$$

Результатом смещения стало новое положение объекта и новая система отсчета $x'-y'-z'$, показанная на рис. 2.7. Мы сместим эту новую систему отсчета на 1 единицу вдоль оси x' и 3 единицы вдоль оси z' .

$$H2 = H1 \cdot \text{Trans}(1, 3, 3). \quad (2.14)$$

После перевода получается новая поза объекта вместе с новым кадром $x''-y''-z''$. Этот кадр будет окончательно повернут на 90° вокруг оси y в положительном направлении.

$$H3 = H2 \cdot \text{Rot}(y, 90^\circ). \quad (2.15)$$

Уравнения (2.13), (2.14) и (2.15) можно последовательно вставлять одно в другое

$$H3 = H \cdot \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(1, 3, 3) \cdot \text{Rot}(y, 90^\circ) = H \cdot D. \quad (2.16)$$

В уравнении (2.16), матрица H представляет начальное положение кадра, $H3$ — конечное положение, а D — смещение

$$D = \text{Rot}(z, 90^\circ) \cdot \text{Trans}(1, 3, 3) \cdot \text{Rot}(y, 90^\circ)$$

0	100	100	1	0	010
1	000	010	3	0	100
0	010	001	3	1	000
0	001	000	1	0	001

$$\cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 100 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
(2.17)

Наконец, мы выполним пост-умножение, описывающее новое относительное положение объекта.

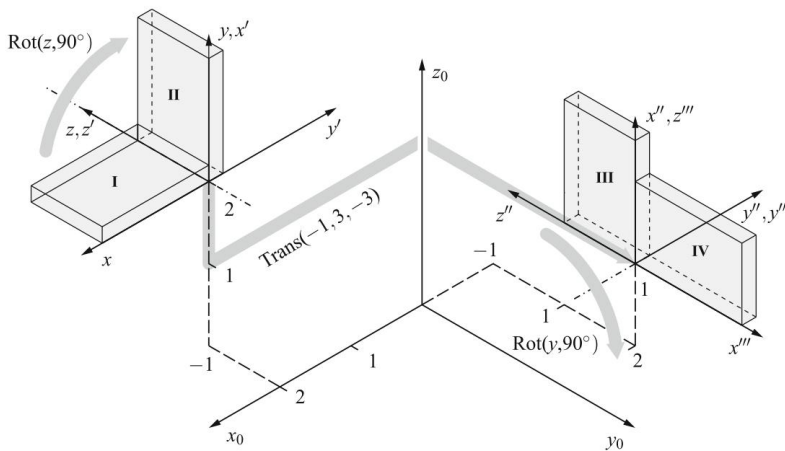


Рис. 2.7 Перемещение объекта в новую позу

$$\begin{aligned}
 H_3 &= H \cdot D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Как и в предыдущем примере, графически проверим правильность матрицы (2.18). Три смещения системы координат $x-y-z$: поворот на 90 против часовой стрелки вокруг оси z , перенос на 1 по оси x , 3 единицы по оси y и 3 вдоль оси z ось и поворот на 90 вокруг оси y ось в плюсе направлению y показаны на рис. 2.7. Результатом является окончательная поза объекта $x''-y''-z''$. Оси указывают в положительном направлении оси x_0 , y_0 и z_0 системы отсчета. Направления осей итогового кадра соответствуют первым трем столбцам матрицы H_3 . Также имеется соответствие между положением начала координат конечного кадра на рис. 2.7 и четвертым столбцом матрицы H_3 .

2.4 Геометрическая модель робота

Нашей конечной целью является геометрическая модель робота-манипулятора. Геометрическая модель робота задается описанием положения последнего сегмента робота (конечного эффектора), выраженного в опорной (базовой) системе координат. Знание того, как описать

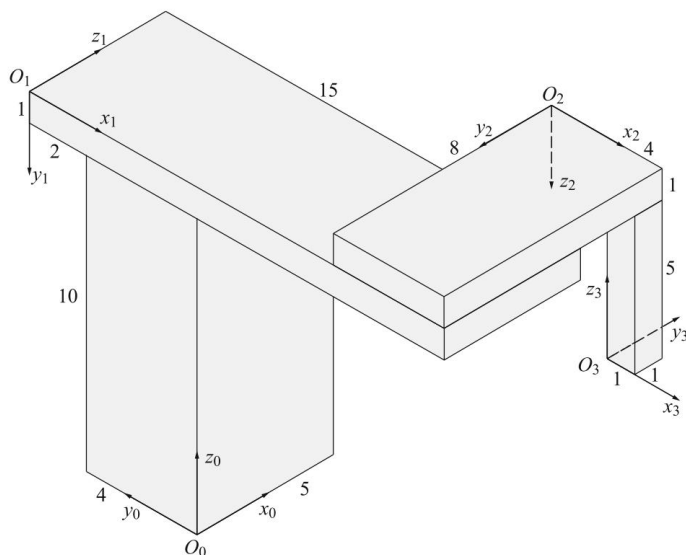


Рис. 2.8 Механическая сборка

поза объекта с использованием однородных матриц преобразования будет сначала применена к процессу сборки. Для этого будет рассмотрен механический узел, состоящий из четырех блоков, такой как представлен на рис. 2.8. Пластина размером $(5 \times 15 \times 1)$ размещена над бруском $(5 \times 4 \times 10)$. Другая пластина $(8 \times 4 \times 1)$ расположена перпендикулярно первой, удерживая другой небольшой блок $(1 \times 1 \times 5)$.

К каждому из четырех блоков прикреплена рама, как показано на рис. 2.8. Нашей задачей будет вычислить положение системы отсчета $x_3-y_3-z_3$ относительно системы отсчета $x_0-y_0-z_0$. В предыдущей главе мы узнали, что положение смещенной системы отсчета может быть выражено относительно системы отсчета с помощью однородной матрицы преобразования H . Положение кадра $x_1-y_1-z_1$ относительно кадра $x_0-y_0-z_0$ обозначим через ${}^{0}H_1$. Точно так же ${}^{1}H_2$ представляет положение системы координат $x_2-y_2-z_2$ относительно системы координат $x_1-y_1-z_1$, а ${}^{2}H_3$ представляет собой позицию системы координат $x_3-y_3-z_3$ относительно системы координат $x_2-y_2-z_2$. Мы также узнали, что последовательные смещения выражаются пост-умножениями (последовательными умножениями слева направо) однородных матриц преобразования. Процесс сборки можно описать постумножением соответствующих матриц. Положение четвертого блока можно записать по отношению к первому следующей матрицей

$${}^{0}H_3 = {}^{0}H_1 {}^{1}H_2 {}^{2}H_3. \quad (2.19)$$

Блоки располагались перпендикулярно друг другу. Таким образом, нет необходимости вычислять синусы и косинусы углов поворота. Матрицы можно определить непосредственно из рис. 2.8. Ось x кадра $x_1-y_1-z_1$ указывает в отрицательном направлении оси y в кадре $x_0-y_0-z_0$. Ось Y кадра $x_1-y_1-z_1$ указывает на

отрицательное направление оси z в системе координат $x_0-y_0-z_0$. Ось z системы $x_1-y_1-z_1$ имеет то же направление, что и ось x системы $x_0-y_0-z_0$. Описанные геометрические свойства структуры сборки записываются в первые три столбца однородной матрицы. Положение начала системы отсчета $x_1-y_1-z_1$ относительно системы $x_0-y_0-z_0$ записывается в четвертый столбец

$${}^{0H1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} O1 \\ - & - \end{matrix} \\ & xyz \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 10 \\ 1 & 0 & 06 \\ 0 & 1 & 011 \\ 0 & 0 & 01 \end{matrix} & \begin{matrix} \\ \\ y \\ \Gamma \end{matrix} & \begin{matrix} \\ \\ O0 \\ \end{matrix} \end{matrix} \quad (2.20)$$

Аналогично определяются две другие матрицы

$${}^{1H2} = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 11 \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 10 & 8 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.21)$$

$${}^{2H3} = \begin{matrix} 10 & 03 \\ 0 & 101 \\ 0 & 0 & 1 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.22)$$

Положение и ориентация четвертого блока относительно первого задается матрицей 0H3 , которая получается последовательным перемножением матриц (2.20), (2.21) и (2.22)

$${}^{0H3} = \begin{matrix} 0 & 10 & 7 \\ & 100 & 8 \\ 0 & 01 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (2.23)$$

Четвертый столбец матрицы 0H3 [7, 8, 6, 1]^T представляет собой положение начала координат системы $x_3-y_3-z_3$ относительно системы отсчета $x_0-y_0-z_0$. Точность четвертого столбца можно проверить по рис. 2.8. Вращательная часть матрицы 0H3 представляет собой ориентацию системы отсчета $x_3-y_3-z_3$ относительно системы отсчета $x_0-y_0-z_0$.

Теперь представим, что первая горизонтальная пластина поворачивается относительно первого вертикального блока вокруг оси 1 на угол ϑ_1 . Вторая пластина также поворачивается вокруг вертикальной оси 2 на угол ϑ_2 . Последний блок вытянут на расстояние d_3 по третьему

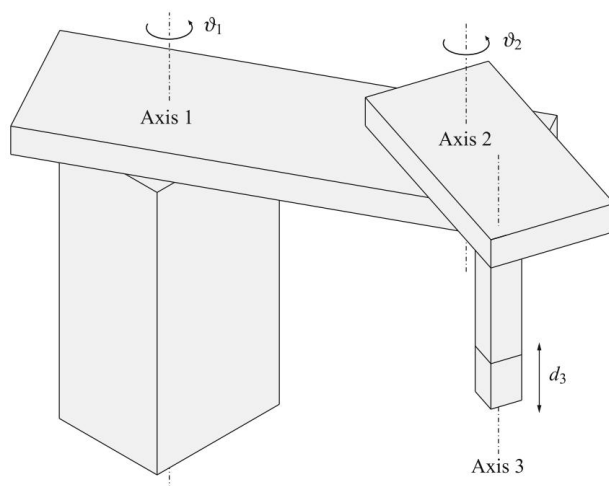


Рис. 2.9 Перемещения механического узла

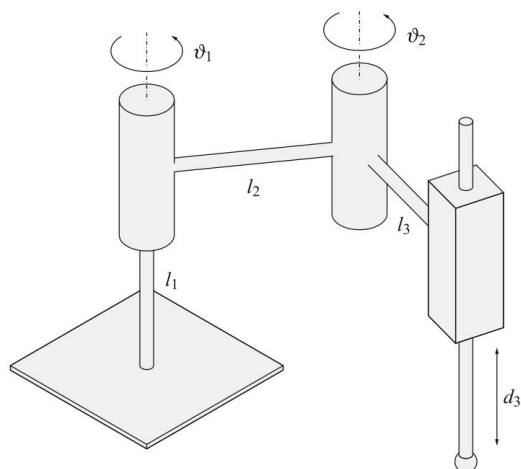


Рис. 2.10 Робот-манипулятор SCARA в произвольной позе

ось. Таким образом, мы получили робота-манипулятора типа SCARA, как упоминалось во вводной главе.

Наша цель — разработать геометрическую модель робота SCARA. Блоки и пластины с рис. 2.9 заменим обозначениями вращательных и поступательных соединений, которые мы знаем из введения (рис. 2.10).

Первый вертикальный отрезок длиной l_1 начинается от основания (где робот крепится к земле) и заканчивается первым вращательным сочленением. Второй отрезок длиной l_2 горизонтален и вращается вокруг первого отрезка. Поворот в первом суставе обозначим углом ϑ_1 . Третий отрезок длиной l_3 также

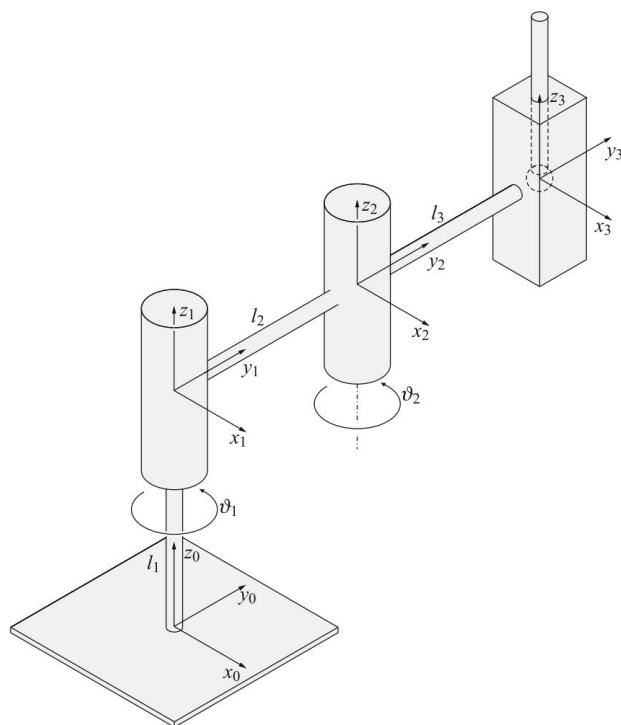


Рис. 2.11 Робот-манипулятор SCARA в исходной позе

горизонтально и вращается вокруг вертикальной оси в конце второго сегмента. Угол обозначается как ϑ_2 . В конце третьего сегмента имеется поступательный сустав. Это позволяет исполнительному органу робота приближаться к рабочей плоскости, где выполняется задача робота. Поступательный шарнир смещается от нулевой начальной длины до длины, описываемой переменной d_3 .

Механизм робота сначала приводится в исходное положение, которое также называют «исходным положением». В исходной позе два соседних сегмента должны быть либо параллельны, либо перпендикулярны. Поступательные шарниры находятся в исходном положении $d_i = 0$. Исходное положение манипулятора SCARA показано на рис. 2.11.

Во-первых, системы координат должны быть нарисованы в роботе SCARA, представленном на рис. 2.11. Первая (опорная) система координат $x_0-y_0-z_0$ размещается на основании робота. В последней главе мы узнаем, что стандарты роботов требуют, чтобы ось z_0 была направлена перпендикулярно основанию. В этом случае он выравнивается с первым сегментом. Две другие оси выбираются таким образом, чтобы сегменты робота были параллельны одной из осей системы отсчета, когда робот находится в исходном исходном положении. В этом случае мы совмещаем ось y_0 с отрезками l_2 и l_3 .

Система координат должна быть правосторонней. Остальные рамы помещаются в шарниры робота. Истоки кадров рисуются в центре каждого сустава. Один

осей рамы должны быть выровнены с осью шарнира. Простейший способ расчета геометрической модели робота — сделать все кадры в узлах робота параллельными системе отсчета (рис. 2.11).

Геометрическая модель робота описывает положение рамы, прикрепленной к рабочему органу, относительно системы отсчета на основании робота. Аналогично, как и в случае механической сборки, получим геометрическую модель путем последовательного умножения (пост-умножения) однородных матриц преобразования. Основное отличие механической сборки от робота-манипулятора заключается в смещениях шарниров робота. С этой целью за каждой матрицей $i-1H_i$, описывающей положение сегмента, будет следовать матрица D_i , представляющая смещение либо поступательного, либо вращательного сустава. Наш робот SCARA имеет три шарнира. Положение конечного кадра $x_3-y_3-z_3$ по отношению к базовому кадру $x_0-y_0-z_0$ выражается следующим постумножением трех пар однородных матриц преобразования

$${}^0H_3 = ({}^0H_1D_1) \cdot ({}^1H_2D_2) \cdot ({}^2H_3D_3). \quad (2.24)$$

В уравнении **В формуле (2.24)** матрицы 0H_1 , 1H_2 и 2H_3 описывают положение каждой совместной рамы по отношению к предыдущей так же, как и в случае сборки блоков. Из рис. 2.11 видно, что матрица D_1 представляет собой поворот вокруг положительной оси z_1 . Следующее произведение двух матриц описывает положение и смещение в первом суставе.

$${}^0H_1D_1 = \begin{matrix} 1000 & c1 & s100 & c1 & s100 \\ 0100 & c1 & c1\ 00 & c1 & c1\ 00 \\ 001\ l1 & 0 & 0\ 10 & 0 & 01\ l1 \\ 0001 & 0 & 0\ 01 & 0 & 0\ 01 \end{matrix} \cdot$$

В приведенных выше матрицах использовались более короткие обозначения $\sin \theta_1 = s1$ и $\cos \theta_1 = c1$.

Во втором суставе происходит вращение вокруг оси z_2

$${}^1H_2D_2 = \begin{matrix} 1000 & c2 & s200 & c2 & s200 \\ 010\ l2 & c2 & c2\ 00 & s2 & c2\ 0\ l2 \\ 0010 & 0 & 0\ 10 & 0 & 0\ 10 \\ 0001 & 0 & 0\ 01 & 0 & 0\ 01 \end{matrix} \cdot$$

В последнем суставе происходит перемещение по оси z_3

$${}^2H_3D_3 = \begin{matrix} 1000 & 100\ 0 & 100\ 0 \\ 010\ l3 & 010\ 0 & 010\ l3 \\ 0010 & 001\ d3 & 001\ d3 \\ 0001 & 000\ 1 & 000\ 1 \end{matrix} \cdot$$

Геометрическая модель робота-манипулятора SCARA получается путем постумножения трех полученных выше матриц.

$${}^0H_3 = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 & l_3 s_{12} & l_2 s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3 c_{12} + l_2 c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

При перемножении трех матриц было введено следующее сокращение $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2) = c_1 c_2$ $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) = s_1 c_2 + c_1 s_2$.

Глава 3

Геометрическое описание робота

Механизм



Геометрическое описание механизма робота основано на использовании поступательных и вращательных матриц однородных преобразований. К основанию робота и к каждому сегменту механизма прикреплена координатная рамка, как показано на рис. 3.1.

Затем определяются соответствующие матрицы преобразования между последовательными кадрами. Вектор, выраженный в одном из фреймов, может быть преобразован в другой фрейм путем последовательного умножения промежуточных матриц преобразования.

Вектор a на рис. 3.1 выражен относительно системы координат $x_3-y_3-z_3$, а вектор b задан в системе координат $x_0-y_0-z_0$, принадлежащей базе робота. Математическая связь между двумя векторами получается с помощью следующего гомогенного преобразования

$$\begin{pmatrix} b \\ 1 \end{pmatrix} = {}^{0H1} {}^{1H2} {}^{2H3} \begin{pmatrix} a \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

3.1. Векторные параметры кинематической пары.

Векторные параметры будут использоваться для геометрического описания механизма робота. Для простоты ограничимся рассмотрением механизмов либо с параллельными, либо с перпендикулярными последовательными шарнирными осями. Такие механизмы на сегодняшний день наиболее распространены в промышленной робототехнике.

На рис. 3.2 показана кинематическая пара, состоящая из двух последовательных сегментов механизма робота, сегмента $i-1$ и сегмента i . Два сегмента соединены суставом i , включающим как перемещение, так и вращение. Относительное положение сустава определяется вектором сегмента b_{i-1} и единичным вектором сустава e_i , как показано на рис. 3.2.

Отрезок i можно перенести относительно отрезка $i-1$ вдоль вектора e_i на расстояние d_i и повернуть вокруг e_i на угол θ_i . Координата

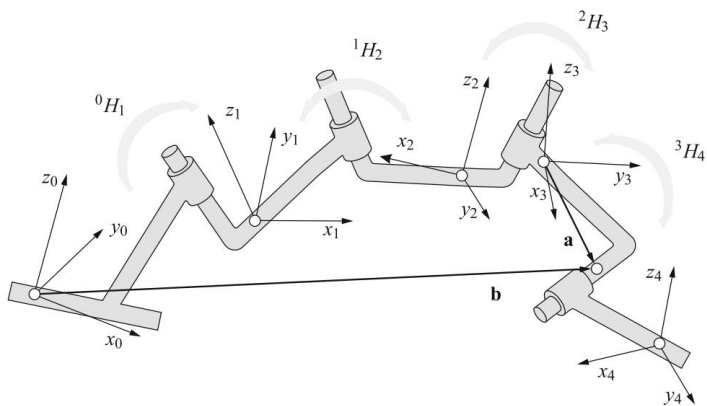


Рис. 3.1 Механизм робота с прикрепленными к его сегментам координатными рамками

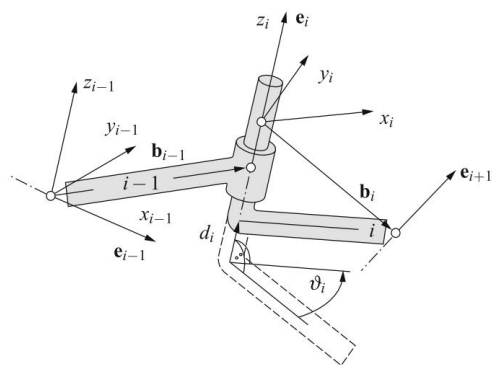


Рис. 3.2 Векторные параметры кинематической пары

фрейм $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ присоединен к отрезку i , а фрейм $x_i-y_i-z_i$ принадлежит отрезку $i+1$.

Система координат $x_i-y_i-z_i$ помещается на ось шарнира i таким образом, что она параллельна предыдущей системе координат $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$, когда кинематическая пара находится в исходном положении (обе совместные переменные равны нулю ($\theta_i = 0$ и $d_i = 0$)).

Геометрические соотношения и относительное смещение двух соседних сегментов
Характеристики механизма робота определяются следующими параметрами:

e_i — единичный вектор, описывающий либо ось вращения, либо направление поступательного движения в суставе i и выражается как одна из осей системы отсчета $x_i-y_i-z_i$.
Его составляющие следующие

$$e_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ;$$

$\mathbf{b}_{i-1}$ — вектор сегмента, описывающий сегмент $i-1$, выраженный в кадре $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. Его составляющие следующие

$$\mathbf{b}_{i-1} = \begin{pmatrix} b_{i-1,x} \\ b_{i-1,y} \\ b_{i-1,z} \end{pmatrix};$$

θ_i — вращательная переменная, представляющая собой угол, измеряемый вокруг оси e_i в плоскости, перпендикулярной e_i (угол равен нулю, когда кинематическая пара находится в начальном положении);

d_i — поступательная переменная, представляющая расстояние, измеренное вдоль направления e_i (расстояние равно нулю, когда кинематическая пара находится в начальном положении).

Если шарнир только вращательный (рис. 3.3 выше), переменная шарнира представлена углом θ_i , а $d_i = 0$. Когда механизм робота находится в исходном положении, угол шарнира равен нулю $\theta_i = 0$, а системы координат $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ и $x_i-y_i-z_i$ параллельны. Если соединение только поступательное (рис. 3.3 ниже), переменная соединения равна d_i ,

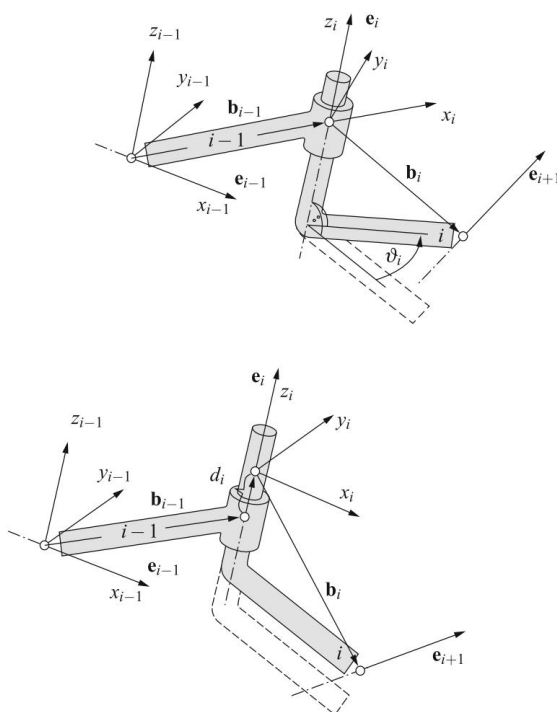


Рис. 3.3 Векторные параметры кинематической пары

при этом $\vartheta_i = 0$. Когда шарнир находится в исходном положении, то $d_i = 0$. В этом случае системы координат $x_i-y_i-z_i$ и $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ параллельны независимо от значения поступательная переменная d_i .

При изменении значения вращательной переменной ϑ_i система координат $x_i-y_i-z_i$ поворачивается вместе с сегментом i относительно предыдущего сегмента $i-1$ и соответствующей системы координат $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$. При изменении поступательной переменной d_i смещение становится поступательным, при этом меняется только расстояние между двумя соседними кадрами.

Преобразование между системами координат $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ и $x_i-y_i-z_i$ определяется однородной матрицей преобразования, принимающей один из трех возможных видов относительно направления вектора соединения e_i . Когда единичный вектор e_i параллелен оси x_i , существует

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_i + b_i & 1, x \\ 0 & \sin \vartheta_i & b_i & 1, y \\ 0 & \cos \vartheta_i & b_i & 1, z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

когда e_i параллелен оси y_i , мы имеем следующую матрицу преобразования

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i & 0 & \sin \vartheta_i & b_i & 1, x \\ 0 & 1 & 0 & d_i + b_i & 1, y \\ \vartheta_i & 0 & \cos \vartheta_i & b_i & 1, z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Когда e_i параллелен оси z_i , матрица имеет следующий вид

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} \cos \vartheta_i & \sin \vartheta_i & 0 & b_i & 1, x \\ \sin \vartheta_i & \cos \vartheta_i & 0 & b_i & 1, y \\ 0 & 0 & 1 & d_i + b_i & 1, z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

В исходной позе системы координат $x_{i-1}-y_{i-1}-z_{i-1}$ и $x_i-y_i-z_i$ параллельны ($\vartheta_i = 0$ и $d_i = 0$) и смещены только для вектора b_i

$${}_{i-1}H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_i & 1, x \\ 0 & 1 & 0 & b_i & 1, y \\ 0 & 0 & 1 & b_i & 1, z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

3.2 Векторные параметры механизма

Векторные параметры механизма робота определяются в следующие четыре этапа:

шаг 1 — механизм робота устанавливается в желаемую начальную (эталонную) позу.

Оси шарниров должны быть параллельны одной из осей системы отсчета $x_0-y_0-z_0$, прикрепленной к основанию робота. В эталонной позе все значения совместных переменных равны нулю, $\theta_i = 0$ и $d_i = 0$, $i = 1, 2, \dots, n$;

шаг 2 — выбираются центры стыков $i = 1, 2, \dots, n$. Центр сустава i может находиться в любом месте вдоль соответствующей оси сустава. Локальная система координат $x_i-y_i-z_i$ помещена в центр стыка так, что ее оси параллельны осям системы отсчета $x_0-y_0-z_0$. Локальная система координат $x_i-y_i-z_i$ смещается вместе с отрезком i ;

шаг 3 — каждой оси шарнира $i = 1, 2, \dots, n$ присваивается единичный вектор сустава e_i .

Она направлена вдоль одной из осей системы координат $x_i-y_i-z_i$. В направлении этого вектора измеряется поступательная переменная d_i , а вращательная переменная θ_i оценивается вокруг вектора

соединения e_i ; шаг 4 — проводятся отрезки векторов b_i между началом координат i -зи, $x_i-y_i-z_i$, $i = 1, 2, \dots, n$. Вектор сегмента b_n соединяет начало координат $x_n-y_n-z_n$ с конечной точкой робота.

Иногда в опорной точке захвата размещают дополнительную систему координат, обозначаемую как $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$. Между фреймами $x_n-y_n-z_n$ и $x_{n+1}-y_{n+1}-z_{n+1}$ не существует степени свободы, так как оба фрейма привязаны к одному и тому же сегменту. Таким образом, преобразование между ними является постоянным.

Подход к геометрическому моделированию механизмов робота проиллюстрируем на примере механизма робота с четырьмя степенями свободы, показанного на рис. 3.4. Выбранное начальное положение механизма вместе с отмеченными положениями центров шарниров представлено на рис. 3.5. Соответствующие векторные параметры и совместные переменные собраны в таблице 3.1.

Вращательные переменные θ_1 , θ_2 и θ_4 измеряются в плоскостях, перпендикулярных осям суставов e_1 , e_2 и e_4 , а поступательная переменная d_i измеряется вдоль оси e_3 . Их значения равны нулю, когда механизм робота находится в исходном положении. На рис. 3.6 робот-манипулятор показан в позе, в которой все четыре переменные положительны и отличны от нуля. Переменная θ_1 представляет собой угол между начальной и мгновенной осью y_1 , переменная θ_2 представляет собой угол между начальной и мгновенной осью z_2 , переменная d_3 представляет собой расстояние между начальным и фактическим положением оси x_3 , а θ_4 представляет собой угол между начальной и мгновенной осью x_4 .

Выбранные векторные параметры механизма робота подставляются в однородные матрицы преобразования (3.2)–(3.4)

$${}^{0H_1} = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

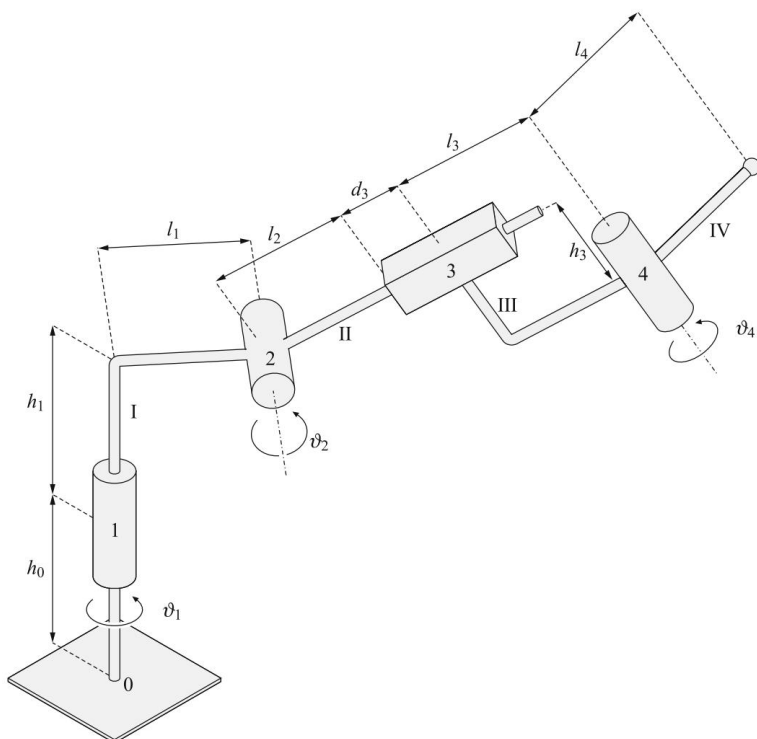


Рис. 3.4 Механизм робота с четырьмя степенями свободы

$${}^1H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 & l_1 \\ 0 & c_2 & c_2 & \vartheta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$${}^2H_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 + l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$${}^3H_4 = \begin{pmatrix} c_4 & s_4 & 0 & 0 \\ c_4 & c_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & h_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

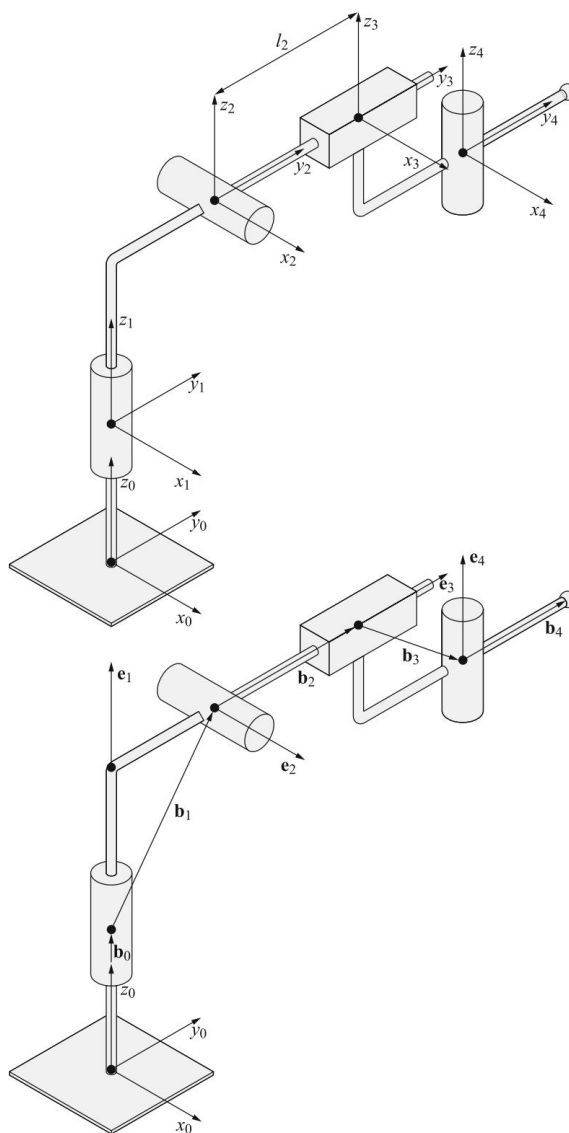


Рис. 3.5 Позиционирование системы координат механизма робота с четырьмя степенями свободы

Дополнительная однородная матрица описывает положение эталона захвата. точка, в которой может быть размещена система координат $x_5-y_5-z_5$

$${}^4H_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Таблица 3.1 Векторные параметры и совместные переменные для механизма робота на рис. 3.5

я 1234	
θi θ1 θ2 0 θ4	
ди 0 0 d3 0	
я 1234	
0100	
эй	0010
	1001
я 1 2 3 4 5	
0 0 0 0 0	
bi	1 0 l1 l2 l3 l4
	h0 h1 0 h3 0

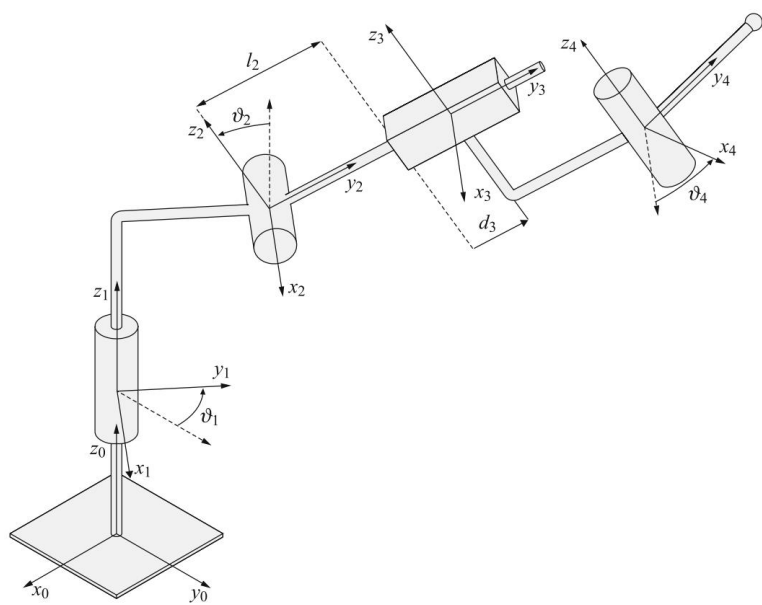


Рис. 3.6 Определение вращательных и поступательных переменных для механизма робота с четырьмя степенями свободы

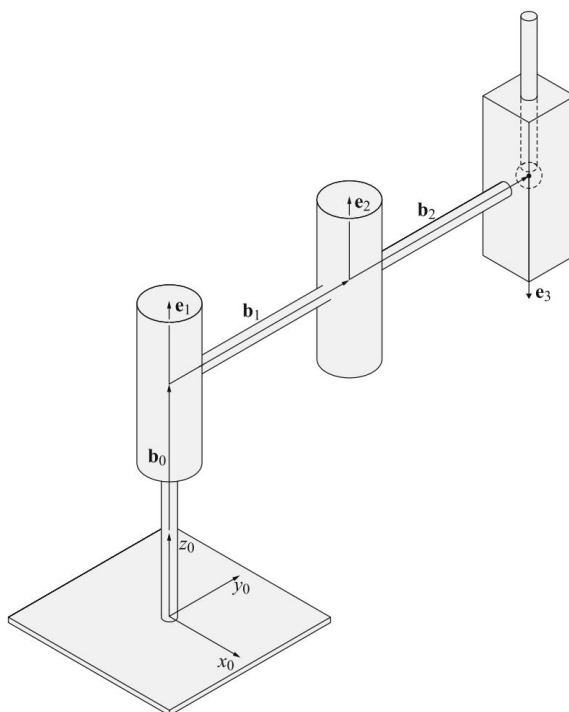


Рис. 3.7 Робот-манипулятор SCARA в исходной позе

Эта последняя матрица постоянна, так как системы координат x_4 – y_4 – z_4 и x_5 – y_5 – z_5 параллельны и смещены на расстояние l_4 . Обычно эта дополнительная рама даже не прикрепляется к механизму робота, так как положение и ориентация захвата могут быть описаны в рамке x_4 – y_4 – z_4 .

При определении начального (исходного) положения механизма робота необходимо следить за тем, чтобы оси сочленений были параллельны одной из осей системы координат. Исходная поза должна быть выбрана таким образом, чтобы ее было легко и просто исследовать, чтобы она хорошо соответствовала предполагаемым задачам робота и чтобы она сводила к минимуму количество необходимых математических операций, включенных в матрицы преобразования.

В качестве другого примера рассмотрим робота-манипулятора SCARA, геометрическая модель которого была разработана еще в предыдущей главе и показана на рис. 2.10.

Механизм робота необходимо предварительно установить в исходное положение таким образом, чтобы оси сочленений были параллельны одной из осей системы отсчета x_0 – y_0 – z_0 .

Таким образом, два соседних сегмента либо параллельны, либо перпендикулярны. Поступательный шарнир должен находиться в исходном положении ($d_3 = 0$). Робот SCARA в выбранной начальной позе показан на рис. 3.7.

Все совместные системы координат x_i – y_i – z_i параллельны системе отсчета. Поэтому мы нарисуем только систему отсчета, а точками укажем центры стыков. В центрах обоих шарниров размещены орты e_1 и e_2 .

Таблица 3.2 Векторные параметры и совместные переменные для робота-манипулятора SCARA

я 1234	
θi θ1 θ2 0 θ4	
ди 0 0 d3 0	
я 1234	
0100	
эй 0010	
1001	
я	1 23 4 5
0 00 0 0	
bi	1 0 l1 l2 l3 l4
h0 h1 0 h3 0	

по осям суставов. Вращение вокруг вектора e1 описывается переменной θ1, а θ2 представляет собой угол вокруг вектора e2 . Вектор e3 расположен вдоль поступательной оси третьего сустава. Его трансляционная переменная описывается d3. Первый сустав соединен с базой робота вектором b0. Вектор b1 соединяет первый и второй шарнир, а вектор b2 — второй и третий шарнир. Переменные и векторы собраны в трех таблицах (таблица 3.2).

В нашем случае все векторы ei параллельны оси z0 , поэтому однородные матрицы преобразования записываются в соответствии с уравнением (3.4). Аналогичные матрицы получаются для обоих шарниров.

$${}^0H_1 = \begin{pmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ c_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} .$$

$${}^1H_2 = \begin{pmatrix} c_2 & s_2 & 0 & 0 \\ c_2 & c_2 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} .$$

Для поступательного шарнира в уравнение необходимо подставить $\theta_3 = 0$. (3.4), давая

$${}^2H_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_3 \\ d_3 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

При постумножении всех трех матриц получается геометрическая модель робота SCARA.

$${}^0H_3 = {}^0H_1 {}^1H_2 {}^2H_3 = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 & l_3 s_{12} & l_2 s_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_3 c_{12} + l_2 c_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Мы получили тот же результат, что и в предыдущей главе, но гораздо проще и нагляднее.

Глава 4

Ориентация



Мы часто описываем нашу среду как трехмерный мир. Однако мир робототехника шестимерен. Он должен учитывать не только положение объекта, но и его ориентацию. Когда захват робота или рабочий орган приближается к объекту, который нужно захватить, пространственные углы между захватом и объектом имеют первостепенное значение.

Для полного описания положения и ориентации объекта в пространстве требуется шесть параметров. Три параметра относятся к положению, а остальные три к ориентации объекта. Есть три возможных способа математического описания ориентации объекта. Первая возможность — это матрица поворота/ориентации, состоящая из девяти элементов. Матрица представляет собой избыточное описание ориентации. Неизбыточное описание дается углами RPY или Эйлера. В обоих случаях у нас есть три угла. Углы RPY определяются относительно осей фиксированной системы координат, а углы Эйлера описывают ориентацию относительно относительной системы координат. Третье возможное описание ориентации обеспечивается четырьмя параметрами кватерниона.

Во второй главе мы уже познакомились с матрицами вращения вокруг осей x , y и z прямоугольной рамки. Мы нашли их полезными при разработке геометрической модели механизма робота. Нетрудно понять, что существует и матрица, описывающая вращение вокруг произвольной оси. Это может быть выражено в следующем виде

$$OR1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Матрица размерности 3×3 представляет собой не только поворот, но и ориентацию системы отсчета $x_1-y_1-z_1$ относительно системы отсчета $x_0-y_0-z_0$, как это видно из рис. 4.1. Система отсчета $x_0-y_0-z_0$ описывается единичными векторами

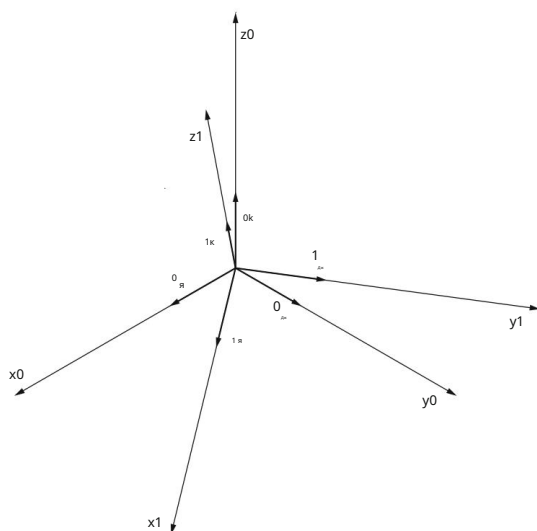


Рис. 4.1 Ориентация системы координат $x_1-y_1-z_1$ относительно базовой системы координат $x_0-y_0-z_0$

$0j, 0k$ и повернутой системы отсчета $x_1-y_1-z_1$ с осями j, k . $1j, 1k$

Обе системы координат совпадают в одном начале координат. Поскольку мы имеем дело с единичными векторами, элементы матрицы поворота/ориентации — это просто косинусы углов, относящихся к каждой паре осей.

Рассмотрим пример из рис. 4.2 и вычислим матрицу, представляющую ориентацию системы координат $x_1-y_1-z_1$, повернутой на угол ϑ относительно системы координат $x_0-y_0-z_0$.

Мы имеем дело со следующими ненулевыми произведениями единичных векторов

$$\begin{aligned}
 0j \cdot 1j &= 1, \\
 0j \cdot 1k &= \cos \vartheta, \quad 0k \cdot 1j = \cos \vartheta, \\
 0k \cdot 1k &= \sin \vartheta, \\
 0j \cdot 1j &= \sin \vartheta.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Таким образом, матрица, описывающая ориентацию системы отсчета $x_1-y_1-z_1$ относительно $x_0-y_0-z_0$, имеет вид

$$P_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

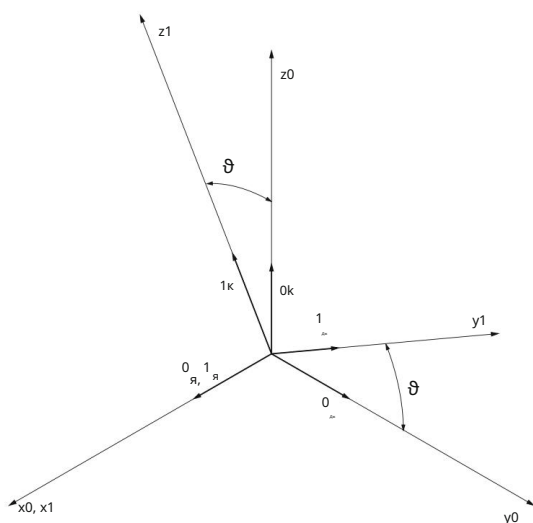
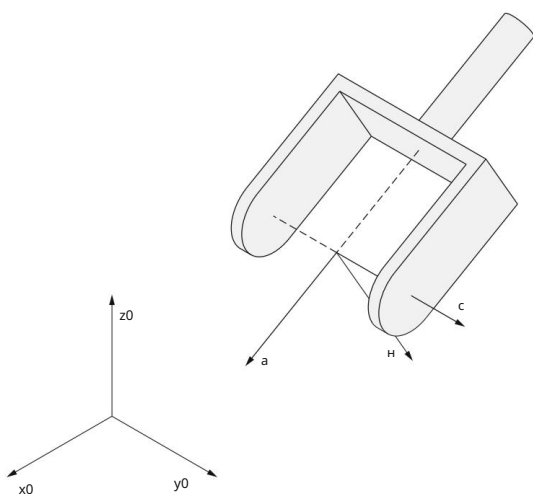
Рис. 4.2 Две системы координат, вращающиеся вокруг оси x_0 

Рис. 4.3 Ориентация захвата робота

Матрицу (4.3) можно интерпретировать и как матрицу вращения вокруг оси x , уже известную нам как часть однородной матрицы (2.6) из второй главы.

Понятие ориентации в робототехнике в основном связано с ориентацией захвата робота. Система координат с тремя осями n , s и a , описывающими ориентацию захвата, помещается между двумя пальцами простого захвата робота (рис. 4.3).

Вектор оси z лежит в направлении приближения захвата к объекту. Поэтому он обозначается вектором a (подход). Вектор, совмещенный с осью y , описывает направление скольжения пальцев и обозначается как s (скольжение). Третий вектор завершает правую систему координат и называется нормальным. Это можно показать как $n = s \times a$. Матрица, описывающая ориентацию захвата относительно системы отсчета $x_0-y_0-z_0$, имеет следующий вид

$$P = \begin{pmatrix} n_x & s_x & t_{опор} \\ n_y & s_y & a_{й} \\ n_z & s_z & a_z \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Элемент n_x матрицы (4.3) обозначает проекцию единичного вектора n на ось x_0 системы отсчета. Она равна косинусу угла между осями i поворота/ имеет тот же смысл, что и матрица элементов ориентации x и x_0 и (4.1). То же самое верно для восьми других элементов матрицы ориентации R (4.3).

Для описания ориентации объекта нам не нужны девять элементов матрицы. Вектор левого столбца представляет собой векторное произведение векторов s и a . Векторы s и a являются единичными векторами, перпендикулярными друг другу, так что мы имеем

$$\begin{aligned} s \cdot s &= 1, \\ a \cdot a &= 1, \\ s \cdot a &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Таким образом, для описания ориентации достаточно трех элементов. Эта ориентация часто описывается следующей последовательностью вращений

R - крен - вокруг оси z ,
 P - шаг - вокруг оси y , Y -
рыскание - вокруг оси x .

Это описание в основном используется при описании ориентации корабля или воздушного самолета. Представим, что самолет летит по оси z , а система координат расположена в центре самолета. Тогда R представляет собой вращение ϕ вокруг оси z , P относится к вращению θ вокруг оси y , а Y — к вращению ψ вокруг оси x , как показано на рис. 4.4.

Использование углов RPY для захвата робота показано на рис. 4.5. Как можно понять из рис. 4.4 и 4.5 ориентация RPY определяется относительно фиксированной системы координат. При разработке геометрической модели робота-манипулятора SCARA во второй главе мы поэлементно умножали однородные матрицы преобразования, описывающие вращение (или поступательное движение) каждого конкретного сустава. Положение и ориентация каждого суставного кадра определялись по отношению к предыдущему кадру, относящемуся к оси сустава, которая не является фиксированной. В этом случае, как

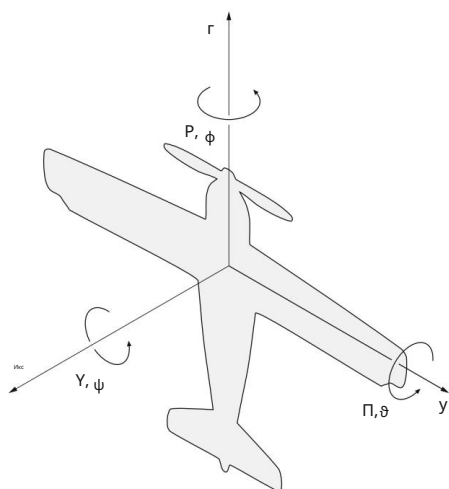


Рис. 4.4 Углы RPY для самолета

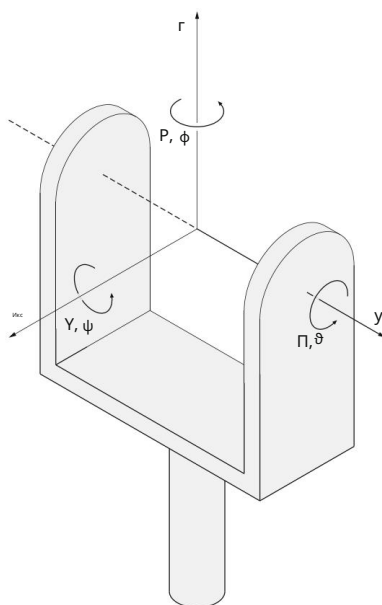


Рис. 4.5 Углы RPY для захвата робота

мы видели, мы умножаем матрицы слева направо. Когда мы имеем дело с последовательными поворотами вокруг осей одной и той же системы координат мы используем предварительного умножения матриц вращения. Другими словами, умножения выполняются в обратном порядке справа налево.

Начнем с вращения ϕ вокруг оси z , продолжим вращением ϑ вокруг оси y и закончим вращением ψ вокруг оси x . Обратный порядок поворотов также очевиден из названия углов RPY. Матрица ориентации, принадлежащая углам RPY, получается следующим умножением матриц вращения

$$R(\phi, \vartheta, \psi) = \text{Rot}(z, \phi)\text{Rot}(y, \vartheta)\text{Rot}(x, \psi) = \begin{pmatrix} c\phi & s\phi & 0 \\ -s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\vartheta & 0 & s\vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\vartheta & 0 & c\vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$$= \begin{pmatrix} c\phi c\vartheta c\psi & c\phi c\vartheta s\psi & c\phi s\vartheta & s\phi c\vartheta c\psi & s\phi c\vartheta s\psi & s\phi s\vartheta & -c\phi s\psi & -s\phi s\psi \\ -s\phi c\vartheta c\psi & -s\phi c\vartheta s\psi & -s\phi s\vartheta & c\phi c\vartheta c\psi & c\phi c\vartheta s\psi & c\phi s\vartheta & s\phi s\psi & c\phi s\psi \\ 0 & 0 & 1 & -s\vartheta c\psi & -s\vartheta s\psi & c\vartheta & c\psi & s\psi \end{pmatrix}$$

Уравнение (4.6) вычисляет матрицу вращения по соответствующим углам RPY.

Мы узнали, что вращение и ориентация могут быть описаны либо матрицами вращения, либо углами RPY. В первом случае нам нужно 9 параметров, а во втором всего 3 параметра. Хотя матрицы удобны для вычислений, они, тем не менее, не обеспечивают быстрого и четкого изображения, например, ориентации захвата робота в пространстве. Углы RPY и Эйлера хорошо отображают ориентацию захвата, но они не подходят для расчетов. В этой главе мы узнаем, что кватернионы подходят как для вычисления, так и для описания ориентации.

Кватернионы представляют собой расширение комплексных чисел

$$r = a + ib, \quad (4.7)$$

где i означает квадратный корень из -1 , поэтому $i^2 = -1$. Комплексные числа можно геометрически представить на плоскости, введя прямоугольную рамку с $\Re$ (действительной) и $\Im$ (мнимой) осью. При переходе из плоскости в пространство $\mathbb{R}^3$ уже существующему i необходимо добавить два единичных вектора j и k . Также справедливо следующее равенство $i = j = ijk = -1$. Кватернион имеет следующую форму

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k. \quad (4.8)$$

В уравнении (4.8) q_i — вещественные числа, а i, j, k — единичные векторы вдоль осей прямоугольной системы координат.

При описании ориентации углами RPY понадобились умножения матриц поворотов. Аналогичным образом нам нужно умножить кватернионы

$$pq = (p_0 + p_1i + p_2j + p_3k)(q_0 + q_1i + q_2j + q_3k). \quad (4.9)$$

Таблица 4.1 Правила умножения кватернионов

*	1	я	и	к
1	1	я	и	к
я	я	1	к	и
и	и	к	1	я
к	к	и	я	1

Умножение кватернионов некоммукативно. При умножении двух кватернионов воспользуемся таблицей 4.1. Умножим два кватерниона

$$\begin{aligned}(2 + 3i - j + 5k)(3 - 4i + 2j + k) &= \\ &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\ &\quad 2 - 8i - 12i + 4ji - 20ki + \\ &\quad + 4j + 6ij - 2j^2 + 10kj + \\ &\quad + 2k + 3ik - jk + 5k^2 = \\ &= 6 + 9i - 3j + 15k - \\ &\quad 8i + 12i - 4k - 20j + \\ &\quad + 4j + 6k + 2 - 10i + \\ &\quad + 2k - 3j - 5 = \\ &= 15 - 10i - 22j + 19k.\end{aligned}$$

(4.10)

Следующее выражение кватерниона особенно подходит для описания ориентация в пространстве

$$d = \text{потому что } \frac{\vartheta}{2} + \text{грех} \frac{\vartheta}{2} c.$$

(4.11)

В уравнении (4.11) — единичный вектор, направленный вдоль оси вращения, а ϑ — угол вращения. Кватернион ориентации можно получить из углов RPY. Вращение R описывается кватернионом

$$qz\phi = \cos \frac{\phi}{2} + \text{грех} \frac{\phi}{2} k.$$

(4.12)

Следующий кватернион принадлежит вращению P

$$qy\vartheta = \cos \frac{\vartheta}{2} + \text{грех} \frac{\vartheta}{2} j,$$

(4.13)

в то время как вращение $\dot{Y}$ можно записать следующим образом

$$\frac{1}{2} \frac{d\psi}{dt} \sin i = \dot{\psi} \cos \psi \quad (4.14)$$

После умножения трех вышеупомянутых кватернионов (4.12–4.14) получающиеся ориента получается кватернион

$$q(\phi, \vartheta, \psi) = q_z q_\vartheta q_\psi. \quad (4.15)$$

Проиллюстрируем три описания ориентации, т.е. углы RPY, матрицу поворота и кватернионы, на примере описания ориентации захвата. Чтобы сделать пример ясным и простым, плоскость двухпальцевого захвата будет помещена в плоскость x_0 – y_0 системы отсчета (рис. 4.6). Углы RPY можно прочесть на рис. 4.6. Повороты вокруг осей z и y равны нулю. Поворот на 60° вокруг оси x можно увидеть на рис. 4.6. Таким образом, ориентация захвата может быть описана следующим набором углов RPY.

$$\phi = 0, \vartheta = 0, \psi = 60^\circ. \quad (4.16)$$

Из рис. 4.6 мы можем также прочесть углы между осями базовой системы координат и системы координат захвата. Их косинусы представляют собой матрицу ориентации/поворота R

$$\begin{aligned} n_x &= \cos 0^\circ, \quad s_x = \cos 90^\circ, \quad a_x = \cos 90^\circ \\ n_y &= \cos 90^\circ, \quad s_y = \cos 60^\circ, \quad a_y = \cos 30^\circ \\ n_z &= \cos 0^\circ, \quad s_z = \cos 150^\circ, \quad a_z = \cos 60^\circ. \end{aligned} \quad (4.17)$$

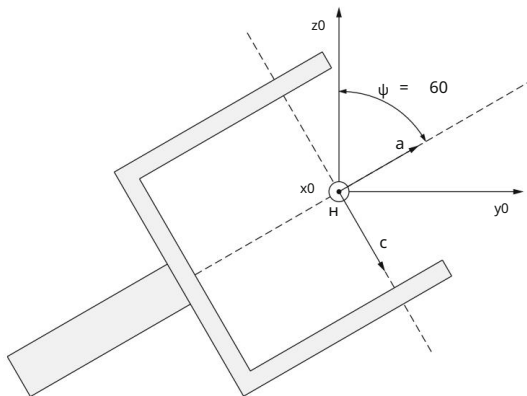


Рис. 4.6 Ориентация захвата робота

Матрицу R также можно рассчитать, подставив известные углы RPY в уравнение. (4.6)

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & 0,866 \\ 0 & 0,866 & 0,5 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Таким образом проверялась правильность нашего прочтения углов на рис. 4.6. Мы вычислим кватернион ориентации, подставив углы RPY в уравнения. (4.12–4.14)

$$\begin{aligned} q_z\phi &= 1 + 0k, \\ q_y\vartheta &= 1 + 0j, \\ q_x\psi &= 0,866 \quad 0,5i. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Кватернион ориентации получается после умножения трех вышеуказанных кватернионов (4.15)

$$q_0 = 0,866, q_1 = -0,5, q_2 = 0, q_3 = 0. \quad (4.20)$$

Уравнения. (4.16), (4.18) и (4.20) демонстрируют три различных описания одинаковой ориентации захвата.

Глава 5

Двухсегментный робот-манипулятор



5.1 Кинематика

Кинематика является частью классической механики, изучающей движение без учета сил, ответственных за это движение. Движение в общем случае описывается траекториями, скоростями и ускорениями. В робототехнике нас в основном интересуют траектории и скорости, поскольку и то, и другое может быть измерено датчиками суставов. В шарнирах роботов траектории измеряются либо как угол во вращательном суставе, либо как расстояние в поступательном суставе. Совместные переменные также называются внутренними координатами. При планировании и программировании задачи робота траектория конечной точки робота имеет первостепенное значение. Положение и ориентация рабочего органа описываются внешними координатами. Вычисление внешних переменных из внутренних и наоборот является центральной проблемой кинематики роботов.

В этой главе мы ограничим наш интерес планарным двухсекционным роботом-манипулятором с двумя вращательными соединениями (рис. 5.1). По определению, данному во вводной главе, такой механизм вряд ли можно назвать роботом. Тем не менее, этот механизм является важной частью конструкций СКАРа и антропоморфных роботов и позволит изучить ряд характерных свойств движения механизмов роботов.

Различают прямую и инверсную кинематику. Прямая кинематика в случае двухсегментного робота представляет собой вычисление положения конечной точки робота по известным углам сочленения. Инверсная кинематика вычисляет переменные соединения по известному положению конечной точки робота. Прямая кинематика представляет собой более простую задачу, поскольку у нас есть единственное решение для положения конечной точки робота. Решения инверсной кинематики во многом зависят от конструкции робота-манипулятора. Мы часто имеем дело с несколькими решениями для совместных переменных, приводящих к одному и тому же положению конечной точки робота, в то время как в некоторых случаях аналитическое решение инверсной кинематики не существует.

Кинематический анализ включает также отношения между скоростью конечной точки робота и скоростями отдельных суставов. Мы обнаружим, что обратная кинематика для скоростей проще, чем обратная кинематика для траекторий. Сначала мы найдем

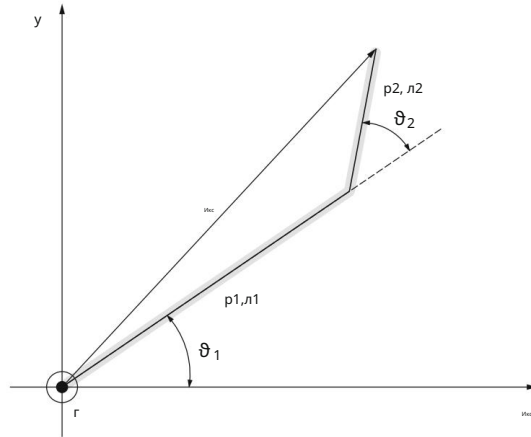


Рис. 5.1 Планарный двухсегментный робот-манипулятор

решение прямой кинематики для траекторий. Тогда путем дифференцирования мы получаем уравнения, описывающие прямую кинематику для скоростей. Путем простой инверсии матрицы можно вычислить инверсную кинематику для скоростей. Рассмотрим теперь планарный двухсегментный робот-манипулятор, показанный на рис. 5.1.

Ось вращения первого сустава представлена вертикальной осью z, указывающей из самолета. Вектор p1 направлен по первому отрезку

$$p1 = l1 \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

Вектор p2 находится вместе со вторым сегментом. Его компоненты можно прочитать на рис. 5.1.

$$p2 = l2 \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Вектор x соединяет начало системы координат с конечной точкой робота.

$$x = p1 + p2. \quad (5.3)$$

Итак, мы имеем для положения конечной точки робота

$$x = \begin{pmatrix} \text{Иис} \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l1 \cos \theta_1 + l2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l1 \sin \theta_1 + l2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

Путем определения вектора суставных углов

$$q = \theta_1 \ \theta_2^T, \quad (5.5)$$

уравнение (5.4) можно записать в следующей более короткой форме

$$\dot{x} = k(\dot{q}), \quad (5.6)$$

где $k(\cdot)$ представляет уравнения прямой кинематики.

Соотношение между скоростями конечной точки робота и суставными скоростями получен дифференцированием. Координаты конечной точки являются функциями суставных углов, которые, в свою очередь, являются функциями времени

$$\begin{aligned} x &= x(\theta_1(t), \theta_2(t)) \\ y &= y(\theta_1(t), \theta_2(t)). \end{aligned} \quad (5.7)$$

Вычисляя производные по времени уравнения (5.7) и приведя их к матричной форме, мы можем написать

$$\begin{matrix} \text{исс} \\ \text{"="} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{x}{\theta_1} & \frac{x}{\theta_2} \\ \frac{y}{\theta_1} & \frac{y}{\theta_2} \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{matrix}. \quad (5.8)$$

Для нашего двухсегментного робота-манипулятора получаем следующее выражение

$$\begin{matrix} \text{исс} \\ \text{"="} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} l_1 s_1 & l_2 s_{12} & l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} & \end{matrix} \begin{matrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{matrix}. \quad (5.9)$$

Матрица, которая в нашем случае второго порядка, называется матрицей Якоби $J(q)$. Соотношение (5.9) может быть записано в краткой форме как

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (5.10)$$

Таким образом решаются задачи прямой кинематики для траекторий и скоростей.

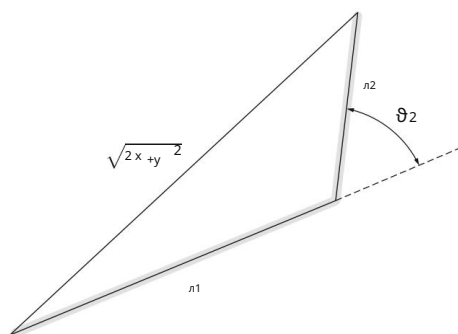
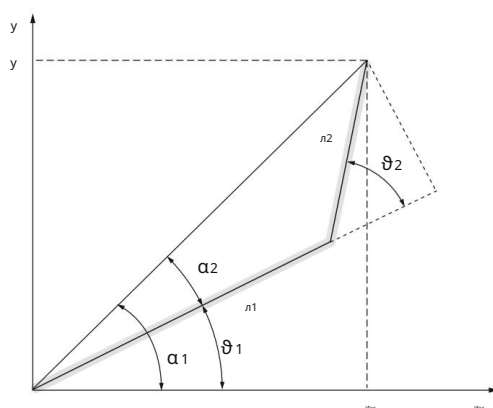
При решении инверсной кинематики углы сочленения вычисляем по известным положению конечной точки робота. На рис. 5.2 показаны только те параметры механизма двухсегментного робота, которые важны для расчета угла θ_2 .

используется правило косинусов

$$2x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180^\circ - \theta_2), \quad (5.11)$$

где $\cos(180^\circ - \theta_2) = -\cos(\theta_2)$. Угол второго сегмента двухсегментного манипулятора вычисляется как обратная тригонометрическая функция

$$\theta_2 = \arccos \frac{2x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}. \quad (5.12)$$

Рис. 5.2 Расчет угла ϑ_2 Рис. 5.3 Расчет угла ϑ_1

Угол первого сегмента вычисляется с помощью рис. 5.3, получается как разность углов α_1 и α_2

$$\vartheta_1 = \alpha_1 - \alpha_2.$$

Угол α_1 получается из прямоугольного треугольника, составленного из горизонталей x и вертикальные координаты y конечной точки робота. Угол α_2 получается удлинением треугольника на рис. 5.2 в прямоугольный треугольник, как показано на рис. 5.3. Снова мы использовать обратные тригонометрические функции

$$\vartheta_1 = \arctan \frac{y}{x} - \arctan \frac{l_2 \sin \vartheta_2}{l_1 + l_2 \cos \vartheta_2}. \quad (5.13)$$

При вычислении угла ϑ_2 у нас есть два решения: локоть вверх и локоть вниз, как показано на рис. 5.4. Вырожденное решение представлено конечной точкой

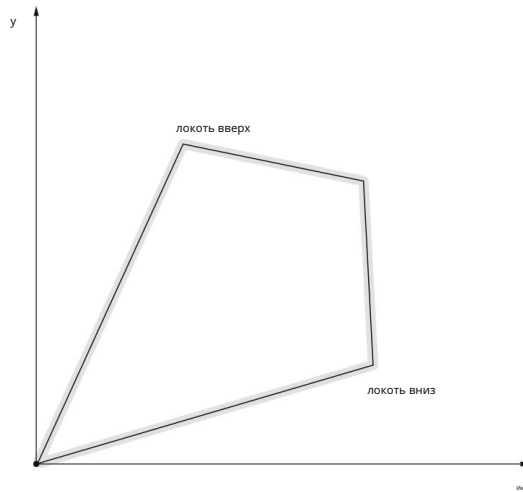


Рис. 5.4 Два решения инверсной кинематики

позиция $x = y = 0$, когда оба отрезка имеют одинаковую длину $l_1 = l_2$. В этом случае до основания арктический $\frac{y}{x}$ не определен. При угле $\vartheta_2 = 180^\circ$, простого двухсегментного механизма можно добраться под произвольным углом ϑ_1 . Однако, когда точка (x, y) лежит вне рабочего пространства манипулятора, задача инверсной кинематики не может быть решена.

Связь между объединенными скоростями и скоростью конечной точки получается путем обращения матрицы Якоби $J(q)$

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{x}. \quad (5.14)$$

Матрицы порядка 2×2 можно инвертировать следующим образом

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{\text{определитель} = ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}.$$

Для нашего двухсегментного манипулятора мы можем написать

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \vartheta_1 & l_1 \sin \vartheta_1 \\ -l_1 \sin \vartheta_1 & l_1 \cos \vartheta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

В общих примерах роботов-манипуляторов нет необходимости, чтобы матрица Якоби имела квадратичную форму. В этом случае вычисляется так называемая псевдообратная матрица $(J^T J)^{-1} J^T$. Для робота с шестью степенями свободы матрица Якоби квадратична, однако после обращения становится непрacticной. Когда манипулятор близко

для сингулярных поз (например, когда угол ϑ_2 близок к нулю для простого двухсегментного робота), обратная матрица Якоби плохо определена. Мы будем использовать матрицу Якоби при изучении управления роботом.

5.2 Статика

После окончания раздела кинематики робота совершим небольшой скачок к статике робота. Предположим, что конечная точка двухсегментного робота-манипулятора наткнулась на препятствие (рис. 5.5). Таким образом, робот создает силу, воздействующую на препятствие. Горизонтальная составляющая силы действует в положительном направлении оси x , а вертикальная составляющая направлена вдоль оси y . Усилие на препятствие создается двигателями в шарнирах робота. Двигатель первого шарнира создает крутящий момент M_1 , а M_2 — крутящий момент второго шарнира.

Положительные направления крутящих моментов обоих суставов против часовой стрелки. Поскольку робот не движется, сумма внешних моментов равна нулю. Это означает, что момент M_1 в первом шарнире равен моменту внешней силы или равен моменту, который манипулятор оказывает на препятствие.

$$M_1 = F_{xy} + F_{yx}. \quad (5.16)$$

Координаты конечной точки x и y , рассчитанные по уравнению (5.4), подставляются в уравнение (5.16)

$$M_1 = F_x (l_1 \sin \vartheta_1 + l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2)) + F_y (l_1 \cos \vartheta_1 + l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2)). \quad (5.17)$$

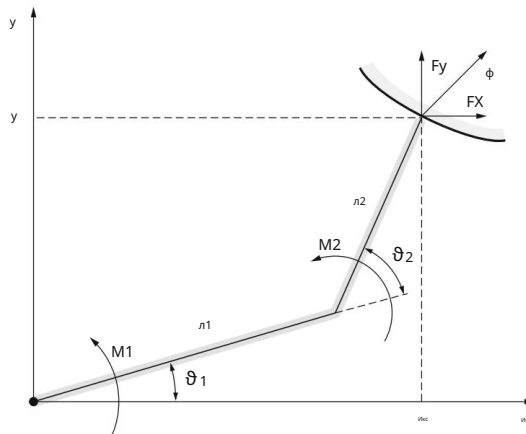


Рис. 5.5 Двухсегментный робот-манипулятор, контактирующий с окружающей средой

Аналогично определяется крутящий момент во втором шарнире.

$$M_2 = F_x l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_y l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \quad (5.18)$$

Уравнения (5.17) и (5.18) можно записать в матричной форме

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 s_1 & l_2 s_1 c_1 + l_2 c_1 c_2 & l_2 s_1 c_2 \\ l_2 c_1 c_2 & l_2 c_1 s_2 & l_2 s_1 s_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

Матрица в уравнении (5.19) — транспонированная матрица Якоби. Транспонированная матрица порядка 2×2 имеет следующий вид

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c & d \end{bmatrix} \quad A^T = \begin{bmatrix} a^T & b^T & c^T & d^T \end{bmatrix}.$$

Таким образом, мы получили важное соотношение между крутящими моментами в суставах и силами на концевом рабочем органе робота.

$$\tau = J^T(\kappa) \phi, \quad (5.20)$$

где

$$\tau = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad \phi = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}.$$

Уравнение (5.20) описывает статику робота. Он будет использоваться для управления роботом, находящимся в контакте с окружающей средой.

5.3 Рабочее пространство

Рабочее пространство робота состоит из всех точек, до которых может добраться конечная точка робота.

Он играет важную роль при выборе промышленного робота для предполагаемой задачи.

Наша цель — описать подход к определению рабочего пространства выбранного робота.

Снова рассмотрим пример простого планарного двухсегментного робота с вращательными

соединениями. Таким образом, наше исследование рабочего пространства робота будет

происходить на плоскости, и мы фактически будем иметь дело с рабочей поверхностью.

Независимо от ограничений, налагаемых плоскостью, мы узнаем о наиболее важных характеристиках свойствах рабочих пространств роботов. Промышленные роботы обычно имеют возможность вращаться вокруг первой вертикальной шарнирной оси. Поэтому мы будем вращать рабочую поверхность вокруг вертикальной оси системы отсчета и, таким образом, получим представление о реалистичных трехмерных рабочих пространствах робота.

Рассмотрим планарный двухсегментный робот-манипулятор, как показано на рис. 5.6.

Вращательные степени свободы обозначаются как θ_1 и θ_2 . Длины отрезков l_1 и l_2 будем считать равными. Координаты конечной точки робота могут быть выражены как в (5.4) с помощью следующих двух уравнений:

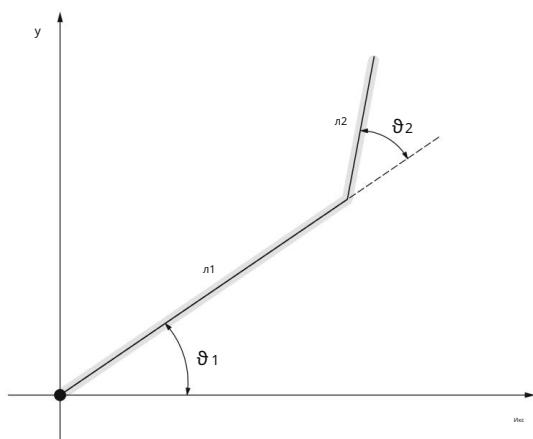


Рис. 5.6 Двухсегментный робот-манипулятор

$$\begin{aligned} x &= l_1 \cos \vartheta_1 + l_2 \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2) \\ y &= l_1 \sin \vartheta_1 + l_2 \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2). \end{aligned} \quad (5.21)$$

Если уравнения (5.21) сначала возводятся в квадрат, а затем суммируются, получаются уравнения окружности

$$\begin{aligned} (x - l_1 \cos \vartheta_1)^2 + (y - l_1 \sin \vartheta_1)^2 &= l_2^2 \\ x^2 + y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \vartheta_2. \end{aligned} \quad (5.22)$$

Первое уравнение зависит только от угла ϑ_1 , а во втором уравнении фигурирует только ϑ_2 . Сетка окружностей, построенных для разных значений ϑ_1 и ϑ_2 , показана на рис. 5.7. Первое уравнение описывает окружности, которые на рис. 5.7 обозначены как $\vartheta_1 = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$, и 180° . Их радиусы равны длине второго отрезка l_2 , центры окружностей зависят от угла ϑ_1 и движутся по окружности с центром в начале системы координат и радиусом l_1 . Окружности второго уравнения имеют все центры в начале системы координат, а их радиусы зависят от длин обоих отрезков и угла ϑ_2 между ними.

Сетка на рис. 5.7 служит для простого графического представления рабочей поверхности двухсегментного робота. Нетрудно определить рабочую поверхность для случая, когда ϑ_1 и ϑ_2 изменяются во всем диапазоне от 0° до 360° . Для двухсегментного манипулятора с одинаковой длиной обоих сегментов это просто окружность радиусом $l_1 + l_2$. Гораздо более неправильные формы рабочих пространств получаются, когда диапазон движения суставов робота ограничен, как это обычно бывает. Часть рабочей поверхности, где ϑ_1 изменяется от 0° до 60° и ϑ_2 от 60° до 120° , заштрихована на рис. 5.7.

При построении рабочих поверхностей двухсегментного манипулятора предполагалось, что длины обоих сегментов равны. Теперь это предположение будет поддержано

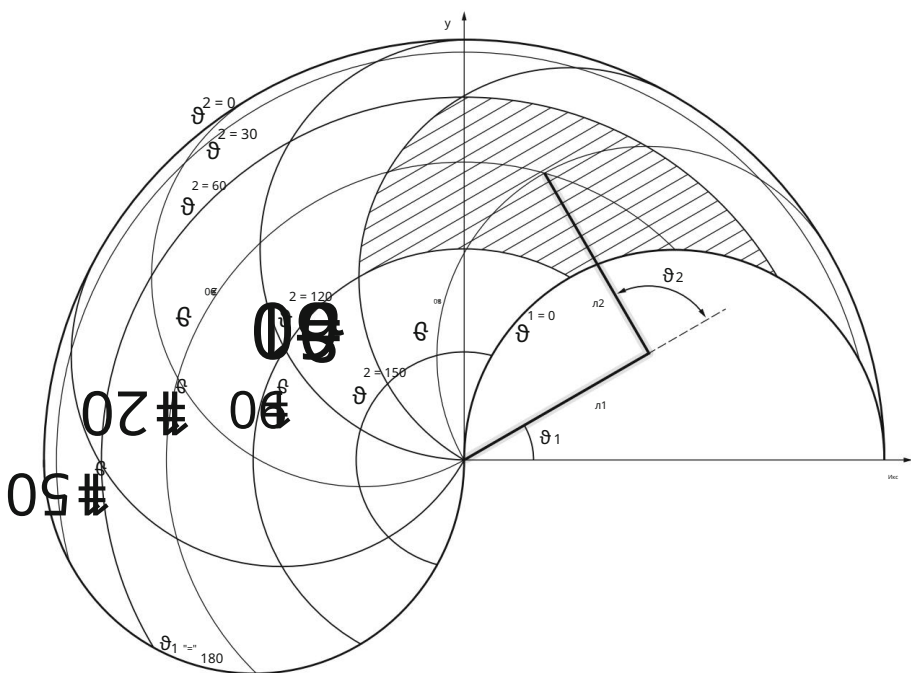


Рис. 5.7 Рабочее пространство планарного двухсегментного робота-манипулятора ($l_1 = l_2, 0 \leq \theta_1 \leq 180^\circ, 0 \leq \theta_2 \leq 180^\circ$)

адекватное доказательство. Нетрудно понять, что сегменты промышленных SCARA и антропоморфных роботов имеют одинаковую длину. Рассмотрим двухсегментного робота, у которого второй сегмент короче первого, а углы θ_1 и θ_2 изменяются от 0 до 360 (рис. 5.8). Рабочая зона такого манипулятора представляет собой кольцо с внутренним радиусом $R_i = l_1 - l_2$ и внешним радиусом $R_o = l_1 + l_2$. Нашей целью является найти соотношение длин отрезков l_1 и l_2 , при котором рабочая площадь будет наибольшей при постоянной сумме длин обоих отрезков R_o . Рабочая зона описанного двухсегментного робота-манипулятора составляет

$$\text{равно } \pi R_o^2 - \pi R_i^2 \quad (5.23)$$

Подставив выражение для внутреннего радиуса в уравнение (5.23)

$$P_{\text{раб}} = \pi (l_1 + l_2)^2 - \pi (2l_1 - R_o)^2 \quad (5.24)$$

мы можем написать

$$A = \pi R_o^2 - \pi (2l_1 - R_o)^2 \quad (5.25)$$

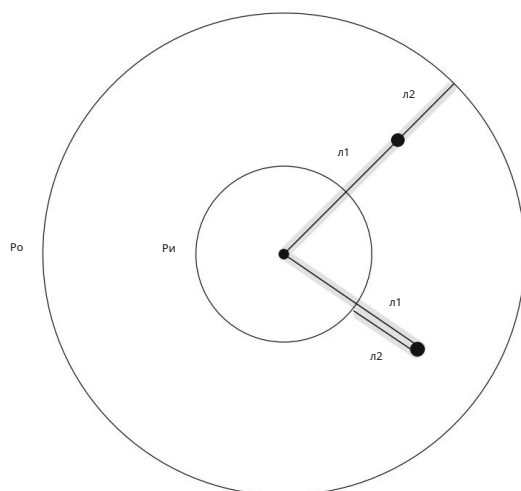


Рис. 5.8 Рабочая зона двухсегментного манипулятора с укороченным вторым сегментом

Для максимальной площади производная по длине сегмента l_1 должна быть равна нулю

$$\frac{dA}{dl_1} = 2\pi(l_1 - R_0) = 0, \quad l_1 = R_0 \quad (5.26)$$

Решение

$$l_1 = \frac{R_0}{2}, \quad (5.27)$$

давать

$$l_1 = l_2. \quad (5.28)$$

Наибольшая рабочая зона двухсегментного механизма возникает при равной длине обоих сегментов.

Площадь рабочей поверхности зависит от длин сегментов l_1 и l_2 и от минимального и максимального значений углов ϑ_1 и ϑ_2 . При изменении соотношения l_1/l_2 можно получить различные формы рабочей поверхности робота. Площадь такой рабочей поверхности всегда равна показанной на рис. 5.9. На этом рисунке ϑ_1 относится к разнице между максимальным и минимальным значением угла соединения $\vartheta_1 = (\vartheta_{1\max} - \vartheta_{1\min})$. Площадь рабочей поверхности равна площади сегмента кольца

$$A = \frac{\vartheta_1 \pi}{360} (r_1^2 - r_2^2) \quad (5.29)$$

для ϑ_1 в угловых градусах.

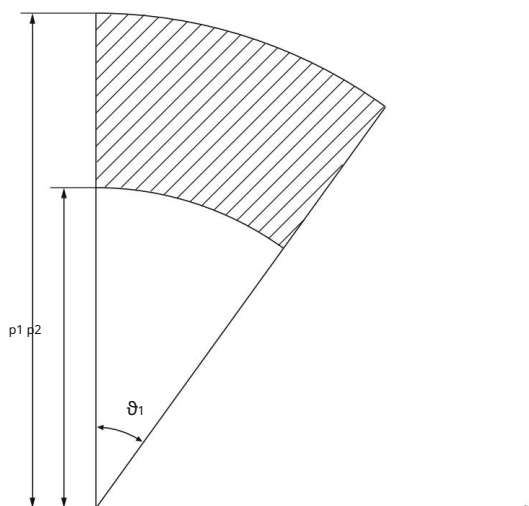


Рис. 5.9 Рабочая поверхность двухсегментного манипулятора

В уравнении (5.29), радиусы r_1 и r_2 находятся по правилу косинусов

$$r_1 = l_1 \sqrt{\frac{l_2^2 + l_1^2 + 2l_1l_2 \cos \vartheta_{2\min}}{l_1^2}} \quad r_2 = l_2 \sqrt{\frac{l_2^2 + l_1^2 + 2l_1l_2 \cos \vartheta_{2\max}}{l_2^2}}. \quad (5.30)$$

Площадь рабочей поверхности так же, как и ее форма, зависит от отношения l_2/l_1 и ограничений в углах соединения. Угол ϑ_1 определяет положение рабочей поверхности относительно системы отсчета и не влияет на ее форму. Рассмотрим влияние второго угла ϑ_2 на площадь рабочей поверхности. Будем считать, что $l_1 = l_2 = 1$ и ϑ_1 изменяется от 30° до 60° .

Для одинаковых диапазонов угла ϑ_2 (30°) и различных значений $\vartheta_{2\max}$ и $\vartheta_{2\min}$ получаем разные значения рабочих площадей

$$\begin{aligned} \vartheta_1 = 30^\circ \quad \vartheta_2 = 30^\circ \quad A &= 0,07 \quad 30^\circ \\ \vartheta_2 = 60^\circ \quad A &= 0,19 \quad 60^\circ \quad \vartheta_2 \\ 90^\circ \quad A &= 0,26 \quad 90^\circ \quad \vartheta_2 \quad 120^\circ \quad A \\ &= 0,26 \quad 120^\circ \quad \vartheta_2 \quad 150^\circ \quad A = \\ 0,19 \quad 150^\circ \quad \vartheta_2 \quad 180^\circ \quad A &= 0,07. \end{aligned}$$

До сих пор под термином рабочее пространство мы подразумевали так называемое доступное рабочее пространство робота. Это включает в себя все точки в окружении робота, которые могут быть достигнуты конечной точкой робота. Часто это так называемое ловкое рабочее пространство имеет большее значение. Проворное рабочее пространство включает в себя все точки, до которых можно добраться при любой произвольной ориентации исполнительного органа робота. Это рабочее пространство всегда

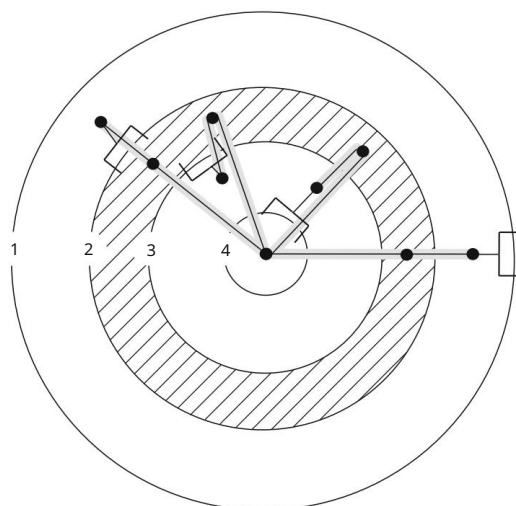


Рис. 5.10 Доступное и маневренное рабочее пространство двухсегментного манипулятора с рабочим органом

меньше доступного рабочего пространства. Ловкое рабочее пространство больше, когда последний сегмент (рабочий орган) короче. На рис. 5.10 показаны достижимая и ловкая рабочие области двухсегментного робота с концевым исполнительным органом. Второй и третий круги получаются, когда рабочий орган робота ориентирован на область ограничивается двумя кругами. Эти два круга представляют пределы ловкого рабочего пространства. Первый и четвертый круг ограничивают достижимое рабочее пространство. Точки между первым и вторым, третьим и четвертым кругами не могут быть достигнуты при произвольной ориентации рабочего органа.

Для роботов, имеющих более трех суставов, описанный графический подход не подходит. В этом случае мы используем численные методы и компьютерные алгоритмы.

5.4 Динамика

В целях иллюстрации мы изучим планарный двухсегментный робот-манипулятор, как показано на рис. 5.11. Отрезки длиной l_1 и l_2 могут перемещаться в вертикальной плоскости $x-y$, их положение описывается углами относительно горизонтальной оси (x); ϑ_1 и $\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2$. Приводы в соединениях создают крутящие моменты M_1 и M_2 , положительное направление которых определяется возрастающими углами, т. е. вдоль положительного направления оси z нашей системы координат.

Теперь аппроксимируем сегменты точечными массами m_1 и m_2 в серединах жестких, но в остальном безмассовых стержней (см. рис. 5.12). Пусть r_1 обозначает положение точки массы m_1 относительно первого сустава, который находится в начале нашей системы координат. Пусть r_2 обозначает положение точки массы m_2 относительно второго шарнира, который находится на стыке двух сегментов.

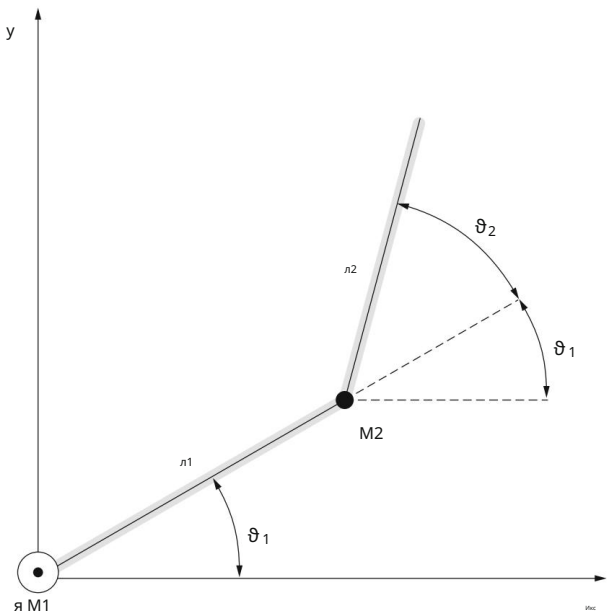


Рис. 5.11 Параметры плоского двухсегментного робота-манипулятора, который перемещается в вертикальной плоскости x - y

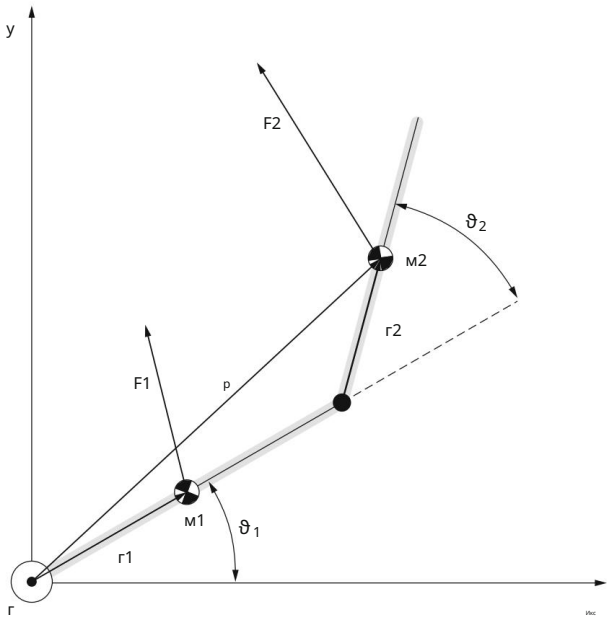


Рис. 5.12 Планарный робот-манипулятор, аппроксимированный точечными массами m_1 и m_2

На точечные массы m_1 и m_2 действуют силы, передаваемые безмассовыми стержнями, а также сила тяжести. Закон Ньютона утверждает, что векторная сумма всех сил, действующих на частицу, равна произведению массы частицы на ее ускорение. Поэтому,

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ и } F_2 = m_2 a_2, \quad (5.31)$$

где F_1 и F_2 представляют собой суммы всех сил (т. е. силы стержня и силы тяжести), действующих на каждую из точечных масс m_1 и m_2 , а a_1 и a_2 — их ускорения относительно начала координат. координатная рамка. Итак, вычисление ускорений сводится к определению сил, действующих на две «частицы».

Положение m_1 относительно начала системы отсчета определяется как r_1 , а положение m_2 определяется как $r = 2r_1 + r_2$ (см. рис. 5.12). Таким образом, соответствующие ускорения равны $a_1 = \ddot{r}_1$ и $a_2 = \ddot{r}$, где две точки над векторным символом обозначают вторые производные по времени. Поэтому,

$$a_1 = \ddot{r}_1 \text{ и } a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2. \quad (5.32)$$

Теперь r_1 и r_2 представляют собой жесткие стержни, поэтому их длины фиксированы. Следовательно, эти векторы могут только вращаться. Вспомним базовую физику, которая говорит, что вращающийся вектор описывает частицу в круговом движении. Такое движение может иметь две составляющие ускорения (рис. 5.13, см. также Приложение ??). Первая составляющая – это радиальное или центростремительное ускорение a_r , которое направлено к центру вращения. Это связано с изменением только направления скорости и, таким образом, присутствует также в равномерном круговом движении. Он дается выражением

$$2 a_r = -\omega^2 r, \quad (5.33)$$

где ω — угловая скорость $\omega = \dot{\theta}$. Вторая составляющая – тангенциальное ускорение, которое направлено по касательной к окружности (рис. 5.13). Оно обусловлено изменением модуля скорости и присутствует только при движении по окружности с угловым ускорением $\alpha = \dot{\omega}$. Это дано

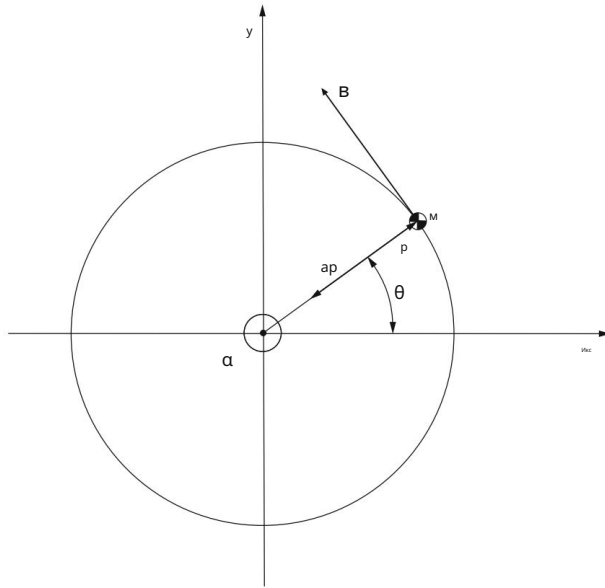
$$\text{при} = \alpha \times r, \quad (5.34)$$

где α — вектор углового ускорения, перпендикулярный плоскости движения, т. е. направленный вдоль оси z нашей системы координат. Полное ускорение, очевидно,

$$a = a_r + \text{при} = -\omega^2 r + \alpha \times r. \quad (5.35)$$

Теперь вычислим вторые производные по времени от векторов r_1 и r_2 . Как отмечалось выше, каждая из этих производных имеет две составляющие, соответствующие радиальному и тангенциальному ускорениям. Так

$$\ddot{r}_1 = -\omega_1^2 r_1 + \alpha_1 \times r_1 \text{ и } \ddot{r}_2 = -\omega_2^2 r_2 + \alpha_2 \times r_2. \quad (5.36)$$

Рис. 5.13 Вращающийся вектор r фиксированной длины описывает круговое движение частицы

Модуль угловой скорости ω_1 и вектор углового ускорения α_1 первого участка равны

$$\omega_1 = \dot{\vartheta}_1 \quad \text{и} \quad \alpha_1 = \ddot{\vartheta}_1 k, \quad (5.37)$$

где k — единичный вектор вдоль оси z . Угловая скорость ω_2 и угловое ускорение α_2 второго сегмента равны

$$\omega_2 = \dot{\vartheta} = \dot{\vartheta}_1 + \dot{\vartheta}_2 \quad \text{и} \quad \alpha_2 = \ddot{\vartheta} k = (\ddot{\vartheta}_1 + \ddot{\vartheta}_2)k. \quad (5.38)$$

Здесь мы использовали $\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2$ (см. рис. 5.11 и 5.12). Вторые производные векторов r_1 и r_2 можно записать как

$$\ddot{r}_1 = \omega_1^2 r_1 + \alpha_1 \times r_1 = \dot{\vartheta}_1^2 r_1 + \ddot{\vartheta}_1 k \times r_1 \quad (5.39)$$

и

$$\begin{aligned} \ddot{r}_2 &= \omega_2^2 r_2 + \alpha_2 \times r_2 = \dot{\vartheta}^2 r_2 + \ddot{\vartheta} k \times r_2 = \\ &= (\dot{\vartheta}_1 + \dot{\vartheta}_2)^2 r_2 + (\ddot{\vartheta}_1 + \ddot{\vartheta}_2)k \times r_2. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Теперь мы можем использовать эти выражения для вычисления ускорений двух точечных масс m_1 и m_2 , соответствующих нашему двухсегментному роботу. Ускорение a_1 движения m_1 равно

$$a_1 = \ddot{r}_1 = \dot{\vartheta}_1^2 r_1 + \ddot{\vartheta}_1 (k \times r_1). \quad (5.41)$$

Ускорение a_2 равно _

$$a_2 = \ddot{r} = 2\ddot{r}_1 + \ddot{r}_2 = \ddot{\theta}_1^2 r_1 + 2\ddot{\theta}_1 (k \times r_1) + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)^2 r_2 + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)(k \times r_2). \quad (5.42)$$

Из этих ускорений получаем суммарные силы, действующие на частицы m_1 и m_2

$$F_1 = m_1 a_1 \text{ и } F_2 = m_2 a_2. \quad (5.43)$$

Теперь мы можем вычислить моменты этих сил относительно начала системы координат.

$$\tau_1 = r_1 \times F_1 = r_1 \times m_1 a_1 \text{ и } \tau_2 = r \times F_2 = (2r_1 + r_2) \times m_2 a_2. \quad (5.44)$$

Подставив выражения для a_1 и a_2 , полученные выше, напомним себе о двойном векторном произведении $[a \times (b \times c) = b(a \cdot c) - c(a \cdot b)]$ и терпеливо проделав длинную алгебру, мы получаем

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_1 r_1^2 \ddot{\theta}_1 k \\ \text{и} \\ \tau_2 &= [\ddot{\theta}_1^2 (4m_2 r_1^2 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2 + m_2 r_2^2) + \ddot{\theta}_1^2 (2m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \ddot{\theta}_1 \ddot{\theta}_2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 - \ddot{\theta}_2^2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2] k. \end{aligned} \quad (5.45)$$

Сумма обоих крутящих моментов на двух «частицах» нашей системы, очевидно, равна $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

С другой стороны, мы можем рассмотреть нашу двухзвенную систему, состоящую из двух точечных масс и двух безмассовых стержней, с другой точки зрения. Следствием третьего закона Ньютона (на каждое действие есть равное, но противоположное противодействие) у нас есть теорема, утверждающая, что внутренние крутящие моменты в системе уравниваются, так что имеют значение только крутящие моменты внешних сил. Моменты внешних сил на нашу систему роботов — это моменты силы тяжести и крутящий момент, создаваемый основанием, на котором стоит робот. Крутящий момент основания равен крутящему моменту M_1 привода в первом шарнире. Сумма этих крутящих моментов внешних сил (база + сила тяжести) должна быть равна $\tau_1 + \tau_2$ (получено выше), так как оба результата представляют собой два способа просмотра общего крутящего момента в одной и той же системе. Так

$$M_1 + r_1 \times m_1 g + r \times m_2 g = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.46)$$

При $r = 2r_1 + r_2$ имеем момент привода в первом шарнире

$$M_1 = \tau_1 + \tau_2 - r_1 \times m_1 g - (2r_1 + r_2) \times m_2 g. \quad (5.47)$$

Вспоминая, что g указывает вертикально вниз (т. е. вдоль y), и подставляя приведенные выше результаты для τ_1 и τ_2 , мы, наконец, получаем

$$\begin{aligned} M_1 = & \ddot{\theta}_1 (m_1 r_1^2 + m_2 p_2^2 + 4m_2 p_1^2 + 4m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \\ & + \ddot{\theta}_2 (m_2 r_2^2 + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) \\ & + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 - \dot{\theta}_2^2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 + \\ & + m_1 g r_1 \cos \theta_1 + 2m_2 g r_1 \cos \theta_1 + m_2 g r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2). \end{aligned} \quad (5.48)$$

Чтобы получить крутящий момент M_2 исполнительного механизма во втором шарнире, сначала рассмотрим полную силу F_2 , действующую на точечную массу m_2 . Сила F_2 представляет собой сумму двух вкладов. Одна — сила тяжести $m_2 g$, другая — сила F , действующая на m_2 со стороны безмассового и жесткого стержня второго сегмента. Так

$$\Phi_2 = \Phi_2' + m_2 g. \quad (5.49)$$

Применим к этому уравнению векторное произведение r_2 слева и получим

$$r_2 \times F_2 = r_2 \times F_2' + r_2 \times m_2 g. \quad (5.50)$$

Первый член в правой части — это векторное произведение r_2 на силу F_2' , действующую на m_2 безмассовый и жесткий стержень. Этот член равен крутящему моменту M_2 исполнительного механизма во втором шарнире. (Заметим, что стержень может также воздействовать на m_2 силой, направленной вдоль стержня, но векторное произведение этой компоненты на r_2 равно нулю). Таким образом, мы получаем

$$M_2 = r_2 \times F_2' - r_2 \times m_2 g. \quad (5.51)$$

Замена $m_2 a_2$ на F_2 и выражение, полученное ранее для a_2 , приводит к

$$\begin{aligned} M_2 = & \ddot{\theta}_1 (m_2 r_1^2 + \frac{1}{2} + 2m_2 r_1 r_2 \cos \theta_2) + \ddot{\theta}_2 (m_2 r_2^2 + \\ & + \dot{\theta}_1^2 2m_2 r_1 r_2 \sin \theta_2 + m_2 r_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2)). \end{aligned} \quad (5.52)$$

Выражения для M_1 (5.48) и M_2 (5.52) кажутся относительно сложными, поэтому давайте рассмотрим некоторые простые и знакомые случаи. Во-первых, предположим, что $\theta_1 = 90^\circ$ и отсутствие крутящего момента во втором шарнире $M_2 = 0$ (рис. 5.14 слева). Уравнение для M_2 сводится к

$$\ddot{\theta}_2 2m_2 p_2^2 = m_2 g r_2 \sin \theta_2. \quad (5.53)$$

Это уравнение простого маятника с массой m_2 , моментом инерции $m_2 r_2^2 J_2$, который вращается вокруг второго шарнира с угловым ускорением $\ddot{\theta}_2$ (рис. 5.14 слева). Таким образом, левая часть равна $J_2 \ddot{\alpha}_2$, а правая часть имеет крутящий момент, вызванный силой тяжести. Итак, это пример простого уравнения $M = J\alpha$, к которому наша

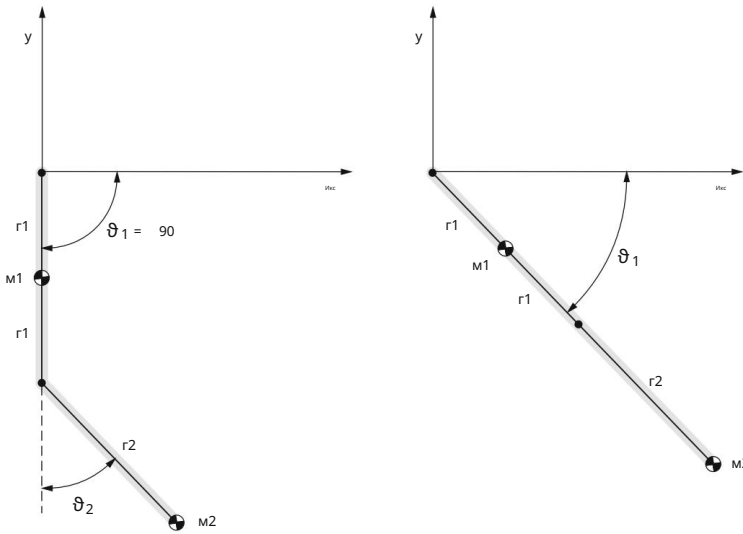


Рис. 5.14 Два простых примера двухсегментного робота-манипулятора: $\vartheta_1 = 90^\circ$ (слева) и $\vartheta_2 = 0$ (справа)

сложное выражение было уменьшено. Для малых колебаний ($\vartheta_2 \ll 1$) имеем $\sin \vartheta_2 \approx \vartheta_2$ и уравнение принимает вид

$$\ddot{\vartheta}_2 + \frac{g}{r_2} \vartheta_2 = 0. \quad (5.54)$$

Это уравнение простого маятника с угловой частотой $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{r_2}}$ и

период колебаний $T = 2\pi \sqrt{\frac{r_2}{g}}$. Далее

предположим, что $\vartheta_2 = 0$, поэтому у нас есть один жесткий стержень, вращающийся вокруг одного конца, который закреплен в начале системы координат (рис. 5.14 справа). Если еще «выключить» гравитацию ($g = 0$), то для крутящего момента в первом шарнире получим

$$\begin{aligned} M_1 &= \ddot{\vartheta}_1 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + 4m_2 p_1^2 + 4m_2 p_1 p_2) = \\ &= \ddot{\vartheta}_1 [m_1 r_1^2 + m_2 (2r_1 + r_2)^2] = J_{12} \alpha_1, \end{aligned} \quad (5.55)$$

где $\alpha_1 = \ddot{\vartheta}_1$ — угловое ускорение, а J_{12} — суммарный момент инерции двух масс. В качестве альтернативы можно принять крутящий момент в первом шарнире равным нулю, включить гравитацию и получить относительно простой маятник с двумя точечными массами на одном безмассовом жестком стержне.

Отметим, что приведенные выше полные уравнения для M_1 и M_2 (уравнения (5.48) и (5.52)), с небольшими изменениями в обозначениях, справедливы для двойного маятника с

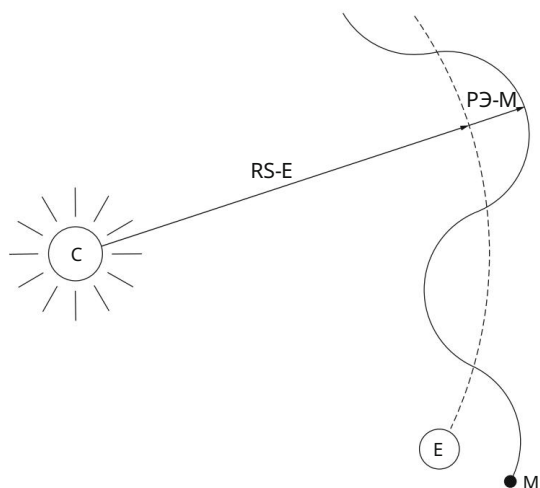


Рис. 5.15 Схематическая траектория (не в масштабе) Земли (штриховая линия) и Луны (сплошная линия) в системе отсчета Солнца

трение. Моменты исполнительных механизмов в этом случае заменяются моментами трения в шарнирах.

Забавным упражнением было бы сравнить траектории конечных точек двух сегментов нашего простого робота с траекториями Земли и Луны, если смотреть из системы отсчета Солнца. Аппроксимируем Землю и Луну точечными частицами ($m_E \ll m_M$) на компланарных круговых орбитах. Поскольку гравитационная сила действует только вдоль линии, соединяющей две частицы, она не может передавать крутящие моменты, поэтому угловые ускорения равны нулю, а угловые скорости постоянны. Орбитальная скорость Земли вокруг Солнца ($R_{S-E} = 150 \cdot 10^6$ км, $T = 365$ сут, $v_E = 2,6 \cdot 10^6$ км/сут) намного превышает орбитальную скорость Луны вокруг Земли ($R_{E-M} = 0,38 \cdot 10^6$ км, $T = 28$ дней, $v_M = 0,08 \cdot 10^6$ км/день), поэтому траектория Луны, видимая в системе отсчета Солнца, будет примерно синусоидой, наложенной на круговую орбиту Земли вокруг Солнца (рис. 5.15).

С нашим двухсегментным роботом можно было бы иметь более высокие угловые скорости второго сегмента, приводящие к различным формам траектории его конечной точки (например, эпициклам Птолемея).

Возвращаясь к нашим относительно сложным уравнениям для крутящих моментов M_1 и M_2 (уравнения (5.48) и (5.52)), обусловленным исполнительными механизмами в шарнирах, мы видим, что эти уравнения могут быть сжаты в матричный вид, представляющий динамическую модель робота как

$$\tau = B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q). \quad (5.56)$$

В этом уравнении вектор τ объединяет моменты обоих приводов

$$\tau = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \end{pmatrix}. \quad (5.57)$$

Векторы q , $\dot{q}$ и $\ddot{q}$ принадлежат сегментам траекторий, скоростей и ускорений соответственно. Для двухсегментного робота имеем

$$q = \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \end{pmatrix}, \quad \dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \end{pmatrix}, \quad \ddot{q} = \begin{pmatrix} \ddot{\vartheta}_1 \\ \ddot{\vartheta}_2 \end{pmatrix}.$$

Первый член уравнения для τ называется инерционным членом. В нашем случае плоского двухсегментного робота-манипулятора при $r_1 = r_2 = l$ и упрощая обозначения при $s_1 = \sin \vartheta_1$, $c_{12} = \cos(\vartheta_1 + \vartheta_2)$ и т. д., получаем

$$B(q) = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}m_1 l^2 + \frac{5}{4}m_2 l^2 + m_2 l^2 c^2 & \frac{1}{4}m_2 l^2 + \frac{1}{2}m_2 l^2 c^2 \\ \frac{1}{4}m_2 l^2 + \frac{1}{2}m_2 l^2 c^2 & \frac{1}{4}m_2 l^2 \end{pmatrix}. \quad (5.58)$$

Второй член этого матричного уравнения называется членом Кориолиса и включает скорость и центробежные эффекты. Для двухсегментного робота имеем следующую матрицу

$$C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} m_2 l^2 s_2 \dot{\vartheta}_2 - \frac{1}{2}m_2 l^2 s_2 \dot{\vartheta}_2^2 & 0 \\ \frac{1}{2}m_2 l^2 s_2 \dot{\vartheta}_1^2 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.59)$$

Гравитационный столб $g(q)$ в нашем случае имеет следующий вид

$$g(q) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}m_1 g l c_1 + m_2 g l c_1 + \frac{1}{2}m_2 g l c_{12} \\ \frac{1}{2}m_2 g l c_{12} \end{pmatrix}. \quad (5.60)$$

Глава 6

Параллельные роботы



В этой главе рассматриваются все более популярные и высокопроизводительные роботы, известные как параллельные роботы. Стандартные механизмы промышленных роботов имеют последовательные кинематические цепи, в которых чередуются звенья и шарниры, как показано на рис. 6.1 (слева). Их называют серийными роботами. В последнее время мы наблюдаем значительное продвижение параллельных роботов. К ним относятся замкнутые кинематические цепи, пример показан на рис. 6.1 (справа).

В промышленности за последние два десятилетия начали завоевывать популярность параллельные роботы. Однако первоначальные разработки относятся к 1962 году, когда Гоф и Уайтхолл разработали параллельного робота для тестирования автомобильных шин. Примерно в то же время Стюарт представил аналогичный параллельный робот для разработки симулятора полета. Параллельный робот, в котором подвижная платформа управляется шестью приводными ногами, поэтому называется платформой Стюарта-Гофа. Прорыв параллельных роботов также во многом произошел благодаря роботу, разработанному Клавелем в восьмидесятых годах. Его механизм был запатентован в США в 1990 году под названием «робот Дельта». Параллельные механизмы в робототехнике стали предметом систематических научных исследований в начале восьмидесятых годов. Эта деятельность значительно активизировалась в девяностые годы и завершилась некоторыми ключевыми достижениями в области кинематики роботов в целом.

6.1 Характеристики параллельных роботов

У серийных роботов количество степеней свободы идентично общему количеству степеней свободы в суставах. Таким образом, все шарниры должны приводиться в действие, и обычно используются только простые поступательные и вращательные шарниры с одной степенью свободы. У параллельных роботов количество степеней свободы меньше, чем общее количество степеней свободы в суставах, поэтому многие суставы пассивны. Пассивные суставы могут быть более сложными; типичными представителями являются карданный шарнир и шаровой шарнир. Универсальный шарнир состоит из двух перпендикулярных вращений и трех перпендикулярных

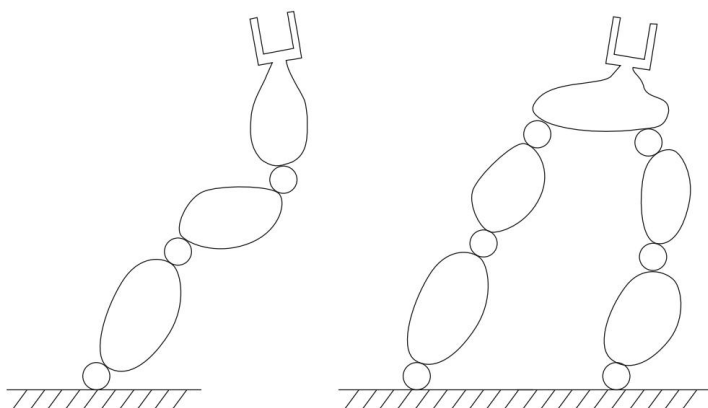


Рис. 6.1 Последовательная кинематическая цепь (слева) и замкнутая кинематическая цепь (справа)

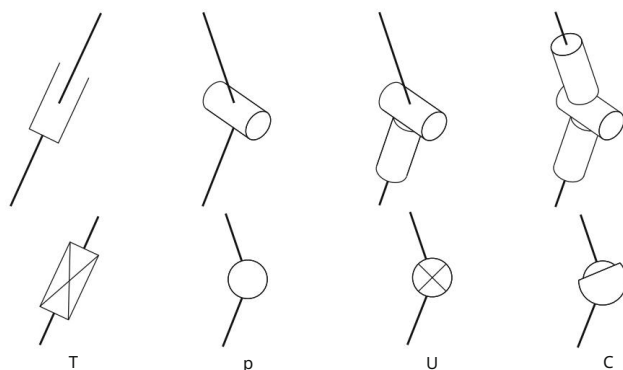


Рис. 6.2 Типы соединений, часто используемые в параллельных механизмах

вращения составляют сферический шарнир, как показано на рис. 6.2. Здесь буквы T, P, U и S используются для обозначения поступательного, вращательного, универсального и сферического шарниров соответственно.

В параллельных роботах последним (верхним) звеном механизмов является так называемая платформа (рис. 6.3). Платформа является активным звеном, к которому прикреплен рабочий орган. Он соединен с неподвижным основанием заданным количеством (обычно) последовательных механизмов, называемых ногами. Вся конструкция содержит как минимум одну замкнутую кинематическую цепь (минимум две ветви). Смещения в опорах вызывают смещение платформы, как показано на рис. 6.3. Движения платформы и ног связаны часто очень сложными тригонометрическими выражениями (прямая и обратная кинематика) в зависимости от геометрии механизма, типа соединений, числа ног и их кинематического расположения.

К сожалению, уникальных и единых номиналов для параллельных роботов не существует. В данной работе параллельный робот именуется типом кинематических цепей, представляемых

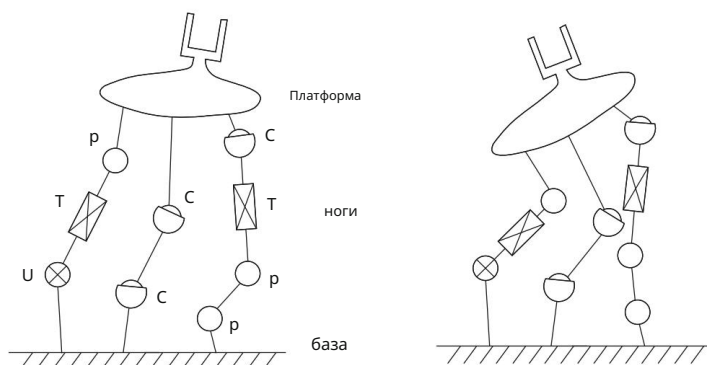


Рис. 6.3 Базовая структура параллельного робота

посылает ноги. Таким образом, робот на рис. 6.3 обозначен как УТР-СС-РРТС. Когда ноги одного типа повторяются, например, в роботе TRR-TRR-TRR, номинал может быть упрощен до 3TRR.

Количество степеней свободы

Каждое сочленение способствует подвижности робота, вводя заданное количество степеней свободы или, альтернативно, вводя соответствующее количество ограничений, которые определяются следующим образом. Обозначим через λ максимальное число степеней свободы свободно движущегося тела (в пространстве $\lambda = 6$ и в плоскости $\lambda = 3$), а через f_i — число степеней свободы i — го шарнира. Соответствующее количество ограничений равно

$$c_i \text{ знак равно } \lambda - f_i. \quad (6.1)$$

В робототехнической практике, где преобладают серийные роботы, мы обычно рассматриваем шарниры как элементы, которые добавляют степени свободы движению рабочего органа робота. В параллельных роботах, наоборот, целесообразнее рассматривать движение платформы (к которой крепится рабочий орган) с учетом ряда ограничений, вносимых шарнирами. Таким образом, универсальный шарнир U в пространстве, где $\lambda = 6$, вводит $f_i = 2$ степени свободы и $c_i = \lambda - f_i = 6 - 2 = 4$ ограничения.

Или, например, на плоскости, где $\lambda = 3$, вращательный шарнир R вводит $f_i = 1$ степень свободы и $c_i = \lambda - f_i = 3 - 1 = 2$ связи, а тот же шарнир в пространстве вводит $c_i = \lambda - f_i = 6 - 1 = 5$ ограничений. Отметим, что вращательные и поступательные шарниры могут работать как в плоскости, так и в пространстве, тогда как сферические и карданные шарниры производят только пространственные движения и не могут использоваться в планарных роботах.

Количество степеней свободы параллельного робота меньше, чем общее количество степеней свободы, создаваемых соединениями робота, в отличие от последовательного робота, где эти два числа идентичны. Пусть N — количество подвижных звеньев робота, а n — количество соединений. Суставы обозначаются как $i = 1, 2, \dots, n$. Каждый сустав имеет f_i степеней свободы и c_i связей. N свободно движущихся звеньев имеют $N\lambda$ степеней свободы. Когда они объединены в механизм, их движение

ограничивается связями, вносимыми шарнирами, так что число степеней свободы механизма робота равно

$$F = N\lambda - \sum_{j=1}^H \text{ки} . \quad (6.2)$$

Здесь, заменяя си на фи , мы получаем известную формулу Грюблера следующего вида

$$F = \lambda(N - n) + \sum_{j=1}^H \text{фи} . \quad (6.3)$$

Нельзя забывать, что количество моторов, управляющих движением робота, равно F .

Обратите внимание, что в серийных роботах количество подвижных звеньев и количество соединений одинаково ($N = n$), так что первая часть формулы Грюблера всегда равна нулю ($\lambda(N - n) = 0$). Это объясняет, почему количество степеней свободы у серийных роботов просто

$$\Phi = \sum_{j=1}^H \text{фи} . \quad (6.4)$$

Очень практичная форма формулы Грюблера для расчета степеней свободы параллельного робота может быть получена следующим образом. Предположим, что параллельный механизм включает $k = 1, 2, \dots, K$ ветвей, каждая из которых имеет vk степеней свободы и, следовательно, $\xi_k = \lambda - \text{vk}$ ограничений. Когда платформа не связана с опорами и может свободно перемещаться в пространстве, она содержит λ степеней свободы. Таким образом, количество степеней свободы соединенной платформы можно вычислить путем вычитания суммы ограничений, вносимых опорами.

$$F = \lambda - \sum_{k=1}^K \xi_k . \quad (6.5)$$

Уравнения (6.3) и (6.5) математически идентичны и могут быть преобразованы из одного в другое с помощью простых алгебраических операций.

Теперь мы можем вычислить степени свободы для робота, показанного на рис. 6.3. Этот робот имеет $N = 7$ подвижных звеньев и $n = 9$ шарниров. Общее число степеней свободы в шарнирах равно 16 (3 вращательных шарнира, 2 поступательных шарнира, 1 универсальный и 3 шаровых шарнира). Используя стандартную формулу Грюблера, приведенную в уравнении. (6.3), получаем

$$F = 6(7 - 9) + 16 = 4.$$

Если мы теперь используем модифицированную форму формулы Грюблера, нам нужно вычислить ограничения, вносимые каждой ногой. Это довольно просто, потому что нам нужно только вычесть количество степеней свободы каждой ноги из λ . Для данного робота (ноги

считаются слева направо) имеем $\xi_1 = 2$, $\xi_2 = 0$ и $\xi_3 = 0$. Вводя эти значения в уравнение (6.5), как и ожидалось, получаем

$$F = 6 - 2 = 4.$$

Преимущества и недостатки параллельных роботов

Внедрение параллельных роботов в промышленность мотивировано рядом существенных преимуществ, которыми обладают параллельные роботы по сравнению с последовательными роботами. Наиболее очевидны следующие:

Грузоподъемность, жесткость и точность. Грузоподъемность параллельных роботов значительно больше, чем у последовательных роботов. Параллельные роботы также более жесткие, а их точность позиционирования и ориентации рабочего органа в несколько раз лучше, чем у последовательных роботов.

Отличные динамические характеристики. Платформа может достигать высоких скоростей и ускорений. Кроме того, резонансная частота параллельного робота на порядки выше.

Простая конструкция. Несколько пассивных соединений в параллельных роботах обеспечивают менее дорогую и простую механическую конструкцию. При построении параллельных роботов могут использоваться стандартные подшипники, шпиндели и другие элементы машин.

Тем не менее использование параллельных роботов ограничено. Из-за запутанных ног параллельным роботам может быть трудно избегать препятствий на своем рабочем месте. Другими существенными недостатками являются:

Небольшое рабочее пространство. Параллельные роботы имеют значительно меньшее рабочее пространство, чем последовательные роботы сопоставимого размера. Их рабочее пространство может быть дополнительно уменьшено, так как при движении платформы ножки могут мешать друг другу.

Сложная кинематика. Расчет кинематики параллельных роботов сложен и длителен. В отличие от серийных роботов, где сложность возникает при решении обратной задачи кинематики, в параллельных механизмах сложность возникает при решении прямой задачи кинематики.

Фатальные кинематические особенности. Серийные роботы в кинематически сингулярных позах теряют подвижность. Параллельные роботы в сингулярных позах получают степени свободы, которыми невозможно управлять. Это фатальная ситуация, потому что она не может быть решена.

6.2 Кинематическая схема параллельных роботов

Мы можем создать огромное количество кинематических механизмов параллельных роботов. Однако в производственной практике используются лишь немногие из них. Наиболее популярной и общей в кинематическом смысле является платформа Стюарта-Гофа, показанная на рис. 6.4.

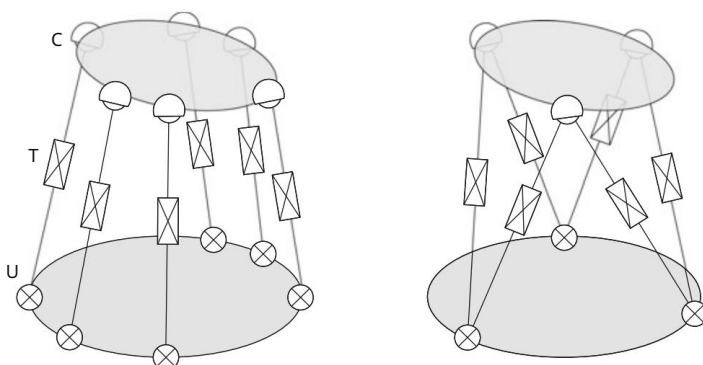


Рис. 6.4 Платформа Стюарта-Гофа

Платформа Стюарта-Гофа

Общая платформа Стюарта-Гофа показана в левой части рис. 6.4. По нашему номиналу механизм типа БУТС. Робот содержит $n = 18$ суставов, $N = 13$ подвижных звеньев и сумма $f_i, i = 1, 2, \dots, n$ равна 36. Это дает ожидаемый результат

$$F = 6(13 - 18) + 36 = 6$$

степени свободы. Платформа этого робота может быть пространственно позиционирована и ориентирована под управлением шести двигателей, которые обычно имеют шесть перемещений. Укорачивая или расширяя ноги (изменяя длину ног), платформу можно перемещать в желаемую позу (положение и ориентацию). Особым преимуществом платформы Stewart Gough с опорами UTS является то, что нагрузки, действующие на платформу, передаются на каждую конкретную опору в виде продольной силы в направлении опоры и отсутствует поперечная нагрузка на опоры. Эта особенность обеспечивает отличные динамические характеристики.

Количество степеней свободы ветви УТС равно шести, а количество ограничений равно нулю. Если рассмотреть формулу Грюблера (6.5), то легко убедиться, что количество ног УТС не влияет на число степеней свободы робота и что подвижность платформы Стюарта-Гофа не зависит от количества ног.

Робот только с одной ногой UTS, который является серийным роботом, обладает шестью степенями свободы, такими же, как полностью параллельный оригинальный шестиногий робот Стюарта-Гофа.

Шестиногий механизм в правой части рис. 6.4 схематично представляет исходную платформу Стюарта-Гофа, имеющую центрально-симметричную звездообразную форму.

При таком расположении две на две ножки зажимаются в одной точке, в которой размещаются два перекрывающихся друг друга сферических (или универсальных) шарнира.

Следовательно, число независимых сферических шарниров равно шести и столько же карданных шарниров. Перекрывающиеся соединения не только упрощают конструкцию, но и облегчают расчеты кинематики и динамики робота.

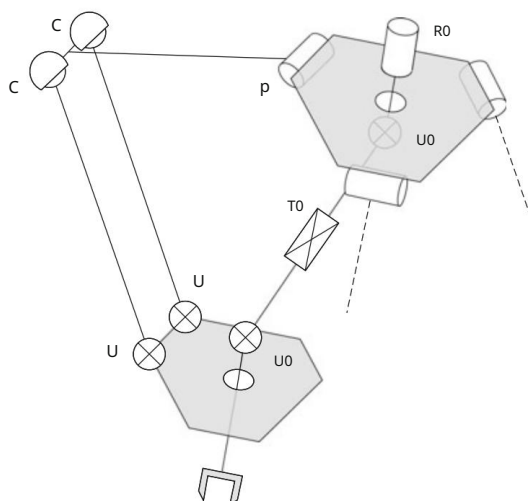


Рис. 6.5 Робот Delta

Дельта-робот

Благодаря своим специфическим характеристикам движения и множеству применений в промышленности робот Delta занял свое место среди производителей роботов (см. рис. 6.5). Кинематика этого робота очень сложная. Основной целью его создателя было создание легкого робота с экстремальными динамическими характеристиками.

Неподвижным основанием робота является верхний шестиугольник, а нижний шестиугольник представляет собой подвижную платформу. Робот имеет три боковые ноги. На рисунке представлен только один, с одним R-образным соединением, двумя S-образными соединениями и двумя U-образными соединениями; две другие ноги символически нарисованы пунктирной линией. Также имеется независимая средняя нога R0U0T0U0, которая не влияет на движение платформы. Между серединой ножки и основанием расположен параллелограммный механизм, состоящий из двух сферических шарниров S и двух универсальных шарниров U. Таким образом, каждая ножка имеет 3 звена и 5 шарниров. Без учета среднего плеча число степеней свободы механизма равно

$$F = 6 (10 - 15) + 33 = 3.$$

Положение платформы определяется всего тремя переменными. В оригинальной версии дельта-робота три угла поворота R боковых ног управляются двигателями. Благодаря параллелограммной конструкции ножек платформа выполняет только поступательное движение и всегда параллельна основанию.

Назначение средней ноги — передать вращение R0 поперек платформы захвата в конечной точке робота. Он действует как телескопический карданный вал для вращения захвата. Эта ветвь представляет собой карданный шарнир с двумя карданными шарнирами U0, разделенными поступательным шарниром T0. Всего механизм имеет четыре степени свободы: три поступательных, обеспечивающих пространственное положение захвата, и одну вращательную, позволяющую

вращение захвата вокруг оси, перпендикулярной платформе. Все приводы механизма «Дельта» прикреплены к основанию и не двигаются. Поэтому механизм чрезвычайно легкий, а платформа может двигаться с большими скоростями и ускорениями.

Планарно-параллельные роботы

Следующие примеры представляют собой плоских параллельных роботов, которые работают в заданной плоскости, где $\lambda = 3$. Первый пример показан на рис. 6.6 слева. Робот содержит три ноги типа РТР-РРР-РРР. В результате имеем $N = 7$ и $n = 9$, а общее число степеней свободы в суставах равно 9. Согласно уравнению (6.3), число степеней свободы этого робота равно

$$F = 3 (7 - 9) + 9 = 3.$$

Результат ожидаем, поскольку все ветви вводят нулевые ограничения (6.5). Следовательно, платформа может принять любую желаемую позу внутри рабочей области. Обратите внимание, что на плоскости необходимы две степени свободы для положения (перемещения в плоскости $x-y$) и одна степень свободы для ориентации (вращение вокруг оси z). Для активации этого робота необходимы три мотора. Чтобы прикрепить моторы, мы можем выбрать любое из девяти соединений. Обычно мы предпочитаем шарниры, прикрепленные к основанию, чтобы моторы не двигались и их вес не влиял на динамику робота. В конкретном случае поступательное сочленение также может приводиться в движение с помощью электрического шпинделя или гидравлического цилиндра.

На рис. 6.6 справа представлен аналогичный плоскопараллельный робот, его структура РТР РР-РР. Здесь мы видим, что каждая из двух ветвей RR вводит одно ограничение.

Согласно уравнению (6.5), число степеней свободы этого параллельного робота равно

$$F = 3 - 2 = 1.$$

Робот управляется с помощью одного двигателя. Платформа имеет ограниченную подвижность и может двигаться только по кривой в плоскости $x-y$. Мы можем, например, либо расположить

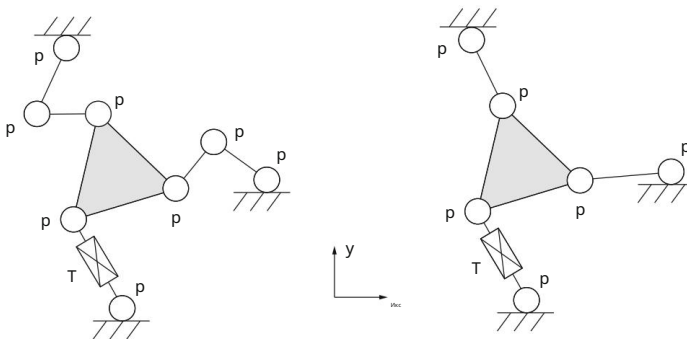


Рис. 6.6 Планарно-параллельные роботы

платформу вдоль оси x , не контролируя y и ориентацию платформы, или, альтернативно, ориентировать платформу, не контролируя ее положение по x и y .

Параллельное гуманоидное плечо

Параллельные механизмы очень распространены в природе, в организме человека или животных. Поэтому неудивительно, что модели параллельных роботов могут быть эффективно использованы для моделирования биомеханических свойств человека, где мышцы и связки, натянутые на суставы, образуют различные параллельные кинематические структуры. Например, плечевой комплекс может быть представлен двумя основными составами: так называемым внутренним суставом, включающим движение ключицы и лопатки относительно туловища, и так называемым наружным суставом, который связан с плечелопаточный сустав. В современной гуманоидной робототехнике движением внутреннего сустава обычно пренебрегают из-за его механической сложности. Тем не менее, его вклад в движение человека, досягаемость руки и динамику имеет решающее значение.

В литературе был предложен параллельный плечевой механизм, представляющий внутреннее плечо. Его движение показано на рис. 6.7. Предлагаемая конструкция - ТС-ЗУТС. Имеется центральная ветвь Т0S0 с четырьмя степенями свободы и двумя ограничениями. Вокруг оси центральной стойки закреплены три боковые стойки УТС с шестью степенями свободы каждая, число связей которых равно нулю. Согласно уравнению (6.5), число степеней свободы робота равно

$$F = 6 - 2 = 4.$$

Робот может производить полную ориентацию платформы (около трех основных углов ориентации) и может расширяться или сжиматься подобно человеческому плечу. Рука прикрепляется к этой платформе через плечевой сустав. Внутренние плечевые суставы, как предполагается, точно имитируют движение руки, в том числе пожимание плечами.

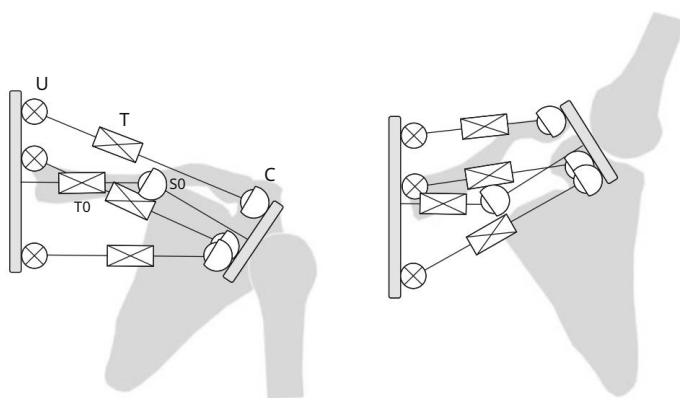


Рис. 6.7 Параллельный робот, имитирующий внутренний плечевой механизм

и предотвращение столкновений с телом, а также обеспечивает отличную статическую грузоподъемность и динамические возможности.

6.3 Моделирование и проектирование параллельных роботов

Большинство параллельных роботов, которые появляются в промышленности или в исследовательских лабораториях, имеют симметричную кинематическую схему. С точки зрения их конструкции полезно, чтобы они состояли из одних и тех же механических элементов. Симметрия также способствует упрощению их математической обработки.

Одна общая группа кинематических устройств представлена ранее описанным плечевым роботом. Эта группа содержит центральный отрезок с v_1 степенями свободы, вокруг которого симметрично расположены боковые отрезки, часто типа UTS, обладающие $v_2, v_3, \dots, v_K = \lambda$ степенями свободы (и нулевыми связями). Таким образом, центральная нога имеет решающее значение для определения кинематических свойств всего робота, поскольку число степеней свободы робота равно $F = v_1$.

Вторая группа кинематических устройств представлена платформой Стюарта-Гофа, в которой все ноги одинаковы и обычно относятся к типу UTS, так что $v_1, v_2, \dots, v_K = \lambda$. При $v_1, v_2, \dots, v_K < \lambda$ подвижна лишь небольшая часть таких роботов, большинство их конструкций с нулевыми или отрицательными степенями свободы. Роботы с отрицательным числом степеней свободы называются чрезмерно ограниченными.

Рассмотрим вторую группу роботов (кинематическая структура типа Гофа-Стюарта) с одним двигателем в каждой ноге. У такого робота должно быть $K = F$ ног, так как роботом с $K < F$ нельзя управлять. Легко проверить, что в космосе могут существовать только следующие роботы (где $\lambda = 6$)

$$\begin{aligned} K = 1, v_1 &= 1 \\ K = 2, v_1 &= v_2 = 4 \\ K = 3, v_1 &= v_2 = v_3 = 5 \\ K = 6, v_1 &= v_2 = \dots = v_6 = 6 \end{aligned}$$

Роботов в этой группе с четырьмя и пятью ногами не существует. В плоскости, где $\lambda = 3$, могут существовать только следующие роботы

$$\begin{aligned} K = 1, v_1 &= 1 \\ K = 3, v_1 &= v_2 = v_3 = 3 \end{aligned}$$

В плоском случае роботов с двумя ногами не существует.

Кинематические параметры и координаты параллельных роботов

На рис. 6.8 система координат x - y - z прикреплена к подвижной платформе, а 0 - y_0 - z_0 закреплена за основанием. Положение платформы задается относительно фиксированной системы координат вектором g ; его компоненты: g_x, g_y, g_z . Ориентация

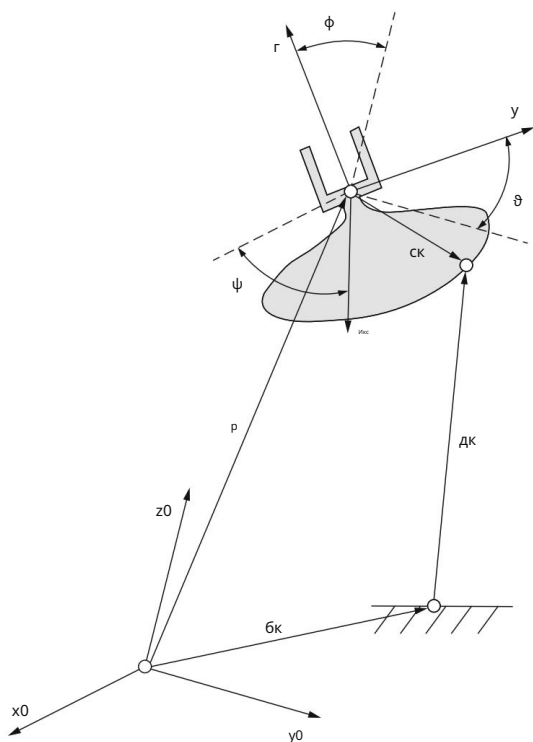


Рис. 6.8 Кинематические параметры параллельного робота

платформы можно описать выбранной тройкой ориентационных углов ψ , θ , ϕ , возникающих между обеими системами координат (подробности см. в гл. 4).

Вектор b_k определяет крепление ноги k к основанию, выраженному в кадре x_0 - y_0 - z_0 , а вектор s_k определяет крепление той же ноги к платформе в кадре x - y - z . Векторы

$$r + R s_k = b_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad d_k = \quad (6.6)$$

описывают геометрию ног робота, выраженную в системе координат x_0 - y_0 - z_0 .

Здесь $R = R(\psi, \theta, \phi)$ — матрица вращения 3×3 , переводящая систему координат x - y - z в x_0 - y_0 - z_0 . Уравнение (6.6) можно также сформулировать в однородной форме следующим образом

$$d_k = H s_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.7)$$

где однородная матрица преобразования

$$H = \begin{bmatrix} r & p & -b_k & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Мы предполагаем, что длины ног являются координатами суставов робота.

$$q_k = d_k, k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.9)$$

где $\cdot$ указывает норму вектора. Они являются элементами вектора совместных координат

$$q = (q_1, q_2, \dots, q_K)^T.$$

Кинематические параметры робота представляют собой векторы b_k , $k = 1, 2, \dots, K$, выраженные в системе отсчета $x_0-y_0-z_0$, и векторы s_k , выраженные в системе координат $x-y-z$.

После того, как мы определили внутренние координаты, давайте посмотрим, каковы внешние координаты робота. В параллельных роботах они обычно представляют некоторые характеристики движения платформы, к которой прикреплен рабочий орган. В большинстве случаев выбранными внешними координатами являются положение и ориентация платформы, так называемые декартовы координаты. В пространстве, где $\lambda = 6$, они включают в себя три компоненты g_x, g_y, g_z вектора положения на рис. 6.8 и три угла ориентации ψ, ϑ, ϕ , так что вектор внешних координат определяется следующим образом

$$p = (r_x, r_y, r_z, \psi, \vartheta, \phi)^T.$$

Инверсная и прямая кинематика параллельных роботов

С точки зрения управления соотношение между внешними и внутренними координатами имеет первостепенное значение. Их взаимосвязь, как и у серийных роботов, определяется очень сложными алгебраическими тригонометрическими уравнениями.

Обратная задача кинематики параллельных роботов требует определения внутренних координат q , которые являются длинами ног, из заданного набора внешних координат p , которые представляют положение и ориентацию платформы. Для данного набора внешних координат p внутренние координаты могут быть получены простым решением уравнения. (6.7). Здесь, в отличие от последовательных роботов, важно понимать, что значения внешних координат однозначно определяют длину ног параллельного робота, а вычисления просты.

Прямая задача кинематики параллельных роботов требует определения внешних координат p по заданному набору совместных координат q (рис. 6.9). Эта задача чрезвычайно сложна в математическом отношении, а вычислительные процедуры громоздки. В общем случае невозможно выразить внешние координаты как явные функции внутренних координат, в то время как для серийных роботов это достаточно просто. Обычно это связанные тригонометрические и квадратные уравнения, которые могут быть решены в закрытой форме только в особых случаях. Не существует правил относительно того, как подходить к символическим решениям. Распространены следующие трудности:

Отсутствие реального решения. Для некоторых значений внутренних координат реальных решений для внешних координат не существует. Интервалы внутренних координат, когда это может произойти, нельзя предусмотреть заранее.

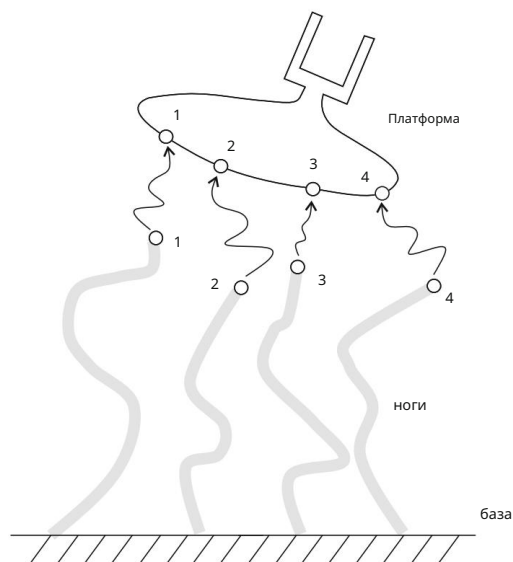


Рис. 6.9 Задача прямой кинематики состоит в нахождении положения платформы, соответствующего длине ног. Конечные точки ног должны совпадать с соответствующими точками на платформе (например, 1 — 1).

Несколько решений. Для данного набора внутренних координат существует несколько решений для внешних координат. Количество решений для данной комбинации длин ветвей зависит от кинематической структуры механизма. Общая платформа Стюарта-Гофа имеет сорок возможных решений прямой задачи кинематики. Для выбранной комбинации длин ног существует сорок различных поз платформы. Кроме того, иногда две позы платформы не могут быть изменены между собой, так как ноги запутываются. В таких случаях платформа могла перейти из одной позы в другую только путем демонтажа ног в первой позе и их повторной сборки в новой позе.

Отсутствие решений в замкнутой форме. Как правило, для заданного набора координат соединения невозможно найти точное решение прямой задачи кинематики, даже если реальное решение существует. В таких случаях мы используем численные методы, которые не обязательно сходятся и не могут найти все решения.

Проектирование параллельных роботов

Конструкция параллельных роботов зависит от желаемой производительности, гибкости, мобильности и грузоподъемности, а также от фактического рабочего пространства.

При рассмотрении рабочих пространств как для параллельных, так и для последовательных роботов мы имеем в виду достижимое рабочее пространство и ловкое рабочее пространство. Одним из основных недостатков параллельных роботов является их маленькое рабочее пространство. Таким образом, основная цель анализа рабочего пространства состоит в том, чтобы определить, находится ли желаемая траектория внутри рабочего пространства робота. Размер рабочего пространства у параллельных роботов ограничен диапазонами перемеще

ног, смещений пассивных суставов и, в частности, интерференции между ногами робота. Даже при небольших движениях ноги могут столкнуться друг с другом. Переплетение ног на практике является основным препятствием в движении робота и его доступности. Определение и анализ рабочего пространства робота в целом является утомительным процессом. В параллельных роботах это обычно еще сложнее, в зависимости от количества степеней свободы и архитектуры механизма.

Влияние нагрузки в серийных роботах обычно рассматривается с точки зрения динамики, которая в значительной степени включает инерцию звеньев. Вклад внешней силы обычно меньше, и во многих случаях им можно пренебречь. В параллельных роботах с большим количеством ног, где звенья очень легкие, а двигатели обычно прикреплены к неподвижному основанию, статика робота играет важную роль. Вычисление статики робота связано с известной матрицей Якоби, которая представляет преобразование между внешними и внутренними координатами. Это выходит за рамки нашей книги, но заинтересованному читателю доступен значительный объем литературы, статей и учебников.

На практике часто можно встретить платформу Стюарта-Гофа, структура которой представлена на рис. 6.10. Робот содержит (вместо шести ног типа UTS) шесть ног типа STS. Кинематически эта архитектура весьма необычна и избыточна. У робота слишком много степеней свободы. Каждая нога имеет 7 степеней свободы.

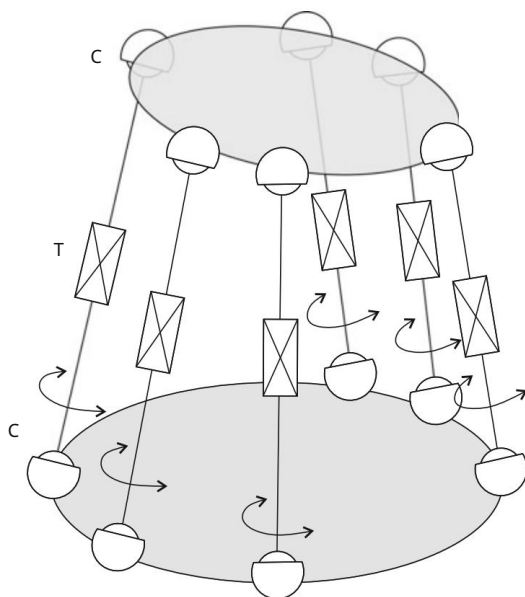


Рис. 6.10 Модификация платформы Stewart-Gough

что соответствует ограничениям 1. Согласно формуле Грюблера (6.5), число степеней свободы робота равно

$$F = 6 - (-6) = 12.$$

Важно отметить, что шесть из двенадцати степеней свободы проявляются как вращения ног вокруг собственных осей. Эти вращения не влияют на движение платформы. Таким образом, робот по-прежнему может приводиться в движение только шестью двигателями, которые изменяют длину ног, влияя на поступательное перемещение T , а повороты вокруг осей ног можно оставить пассивными и свободно изменять. Преимущества этой конструкции заключаются в том, что S-образные соединения легче построить, чем U-образные соединения (и, следовательно, дешевле), и что пассивное вращение вокруг осей опор обеспечивает большую гибкость при подключении силовых и сигнальных кабелей, поскольку они часто располагаются вдоль опор от базы на платформу робота.

Глава 7

Датчики роботов



Сенсорная система человека включает в себя сенсоры зрения и слуха, кинестетические сенсоры (движения, силы и осязания), сенсоры вкуса и обоняния. Эти датчики подают входные сигналы в мозг, который использует эту сенсорную информацию для построения собственного образа окружающей среды и принятия решений для дальнейших действий. Аналогичные требования справедливы и для механизмов роботов. Однако из-за сложности человеческого восприятия датчики роботов ограничены меньшим количеством датчиков.

Использование датчиков имеет решающее значение для эффективной и точной работы робота. Датчики робота в целом можно разделить на: (1) проприоцептивные датчики, оценивающие внутренние состояния механизма робота (положения, скорости и крутящие моменты в суставах робота); 2) экстероцептивные датчики, передающие контроллеру информацию об окружении робота (силовые, тактильные датчики, датчики приближения и расстояния, зрение робота).

7.1 Принципы зондирования

Как правило, датчики преобразуют измеренную физическую переменную в электрический сигнал, который может быть в цифровой форме оценен компьютером. В робототехнике нас в основном интересуют следующие переменные: положение, скорость, сила и крутящий момент. С помощью специальных преобразователей эти переменные могут быть преобразованы в электрические сигналы, такие как напряжение, ток, сопротивление, емкость или индуктивность. По принципу преобразования датчики можно разделить на:

- Электрические датчики — физическая переменная напрямую преобразуется в электрический сигнал; такими датчиками являются, например, потенциометры или тензодатчики;
- Электромагнитные датчики — используют магнитное поле для физических способная конверсия; пример тахометр;

- Оптические датчики — используют свет при преобразовании сигналов; пример такой датчик - оптический энкодер.

7.2 Датчики движения

Типичными датчиками движений роботов являются потенциометры, оптические энкодеры и тахометры. Все они измеряют движения робота внутри сустава робота. Важно, где в суставе разместить датчик движения, а также как измерять параметры движения.

7.2.1 Размещение датчиков

Сначала рассмотрим датчик углового смещения. Нашей целью является измерение угла в шарнире робота, который приводится в действие двигателем через редуктор с передаточным отношением k_r . С помощью редуктора мы уменьшаем угловую скорость соединения в k_r раз по отношению к угловой скорости двигателя. В то же время момент в суставе увеличивается во столько же раз. Важно, расположен ли датчик движения до или после редуктора. Выбор зависит от требований задачи и используемого датчика. В идеальном случае мы устанавливаем датчик перед редуктором (со стороны двигателя), как показано на рис. 7.1. Таким образом, мы измеряем непосредственно обороты двигателя. Затем выходной сигнал датчика необходимо разделить на коэффициент уменьшения, чтобы получить угол соединения.

Обозначим через ϑ угловое положение шарнира, ϑ_m — угловое положение соответствующего двигателя, а k_r — передаточное число редуктора. Когда датчик

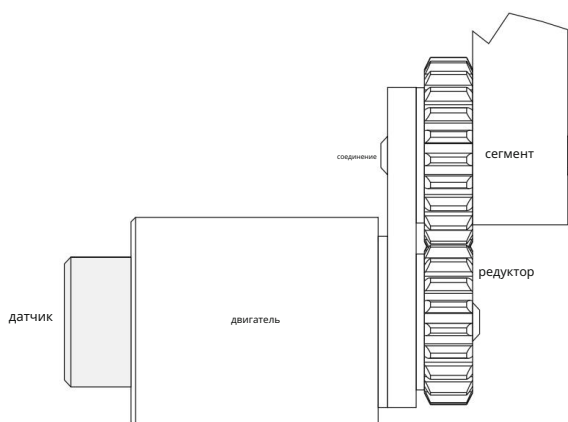


Рис. 7.1 Монтаж датчика движения перед редуктором

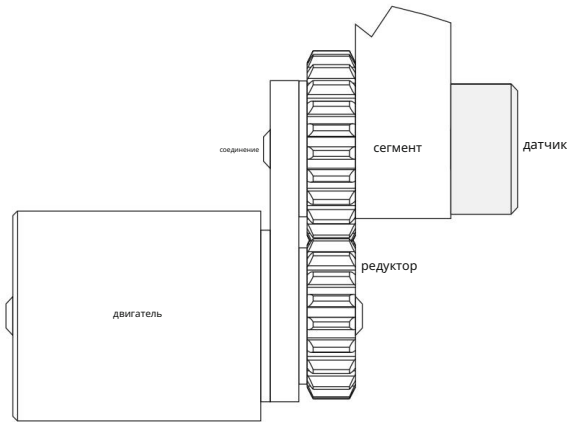


Рис. 7.2 Монтаж датчика движения за редуктором

ставится перед редуктором, его выход равен углу ϑ_m . Переменной, которая нам нужна для целей управления, является шарнирный угол ϑ , определяемый соотношением

$$\vartheta = \frac{\vartheta_m}{kr} . \quad (7.1)$$

Дифференцируя уравнение (7.1) относительно ϑ_m имеем

$$\frac{d\vartheta}{d\vartheta_m} = \frac{1}{kr} \quad 1, \text{ таким образом, } d\vartheta = d\vartheta_m / kr \quad (7.2)$$

это означает, что погрешность измерения датчика уменьшается в kr раз .

Преимущество размещения датчика перед редуктором заключается в получении более точной информации об угловом положении сустава.

Другой вариант установки датчика показан на рис. 7.2. Здесь датчик установлен за редуктором. Таким образом, движения сустава измеряются напрямую. Снижается качество управляющего сигнала, так как погрешность измерения датчика (которая теперь не уменьшается) напрямую попадает в совместный контур управления. Поскольку диапазон движения сустава в kr раз меньше, чем у двигателя, можно использовать датчики с меньшим диапазоном движения. Иногда мы не можем избежать установки датчика движения в ось сустава. Поэтому важно, чтобы мы осознавали недостатки такого размещения.

7.2.2 Потенциометр

На рис. 7.3 представлена модель поворотного потенциометра и его компонентов.

Потенциометр состоит из двух частей: (1) резистивной обмотки и (2) подвижного движка.

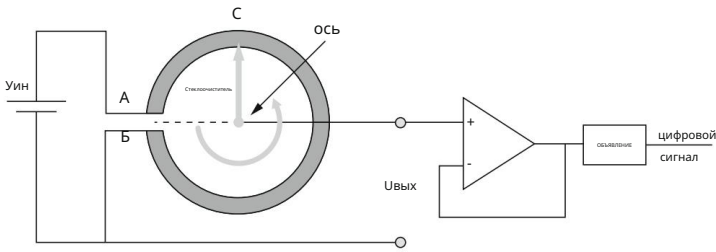


Рис. 7.3 Модель потенциометра

Потенциометр представляет собой контактный метод измерения, потому что скользящий контакт скользит по круглой резистивной обмотке.

Потенциометры обычно размещают за редуктором таким образом, чтобы ось потенциометра была соединена с осью шарнира. Предположим, что точка В представляет собой исходное положение потенциометра, относящегося к соединению. Сопротивление потенциометра вдоль обмотки АВ равно R , а r представляет собой сопротивление СВ части обмотки. Угол дворника по отношению к исходному положению В обозначается ϑ (в радианах). Когда сопротивление вдоль круговой обмотки потенциометра одинаково, а расстояние между точками А и В пренебрежимо мало, имеем следующее уравнение

$$\frac{r}{R} = \frac{CB}{AB} = \frac{\vartheta}{2\pi}. \quad (7.3)$$

Предположим, что на потенциометр подается напряжение $U_{вх}$. Выходное напряжение, измеренное на стеклоочистителе, равно

$$\frac{U_{вых}}{U_{ин}} = \frac{r}{R} = \frac{\vartheta}{2\pi}, \quad (7.4)$$

или

$$U_{вых} = \vartheta \cdot \frac{U_{вх}}{2\pi} \quad (7.5)$$

Измеряя выходное напряжение $U_{вых}$, определяют угловое положение ϑ .

7.2.3 Оптический энкодер

Подход к контактному измерению угла соединения робота с помощью потенциометров имеет несколько недостатков. Наиболее важным является относительно короткий срок службы из-за высокого износа. Кроме того, наиболее подходящим является размещение непосредственно на оси шарнира (за редуктором), а не на оси двигателя (перед редуктором).

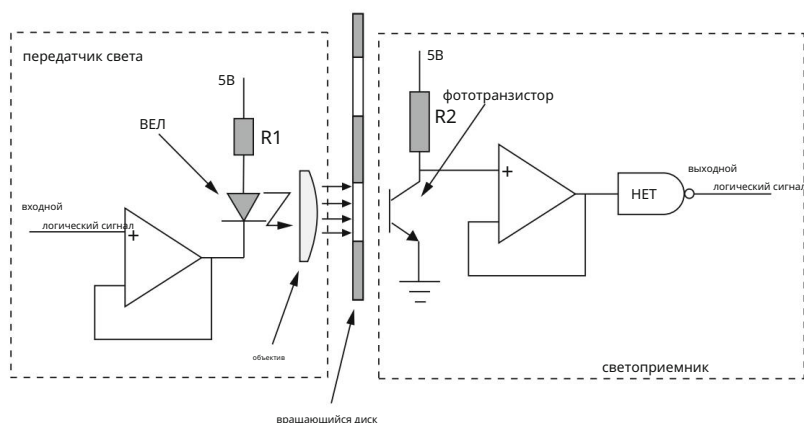


Рис. 7.4 Модель оптического энкодера

Таким образом, наиболее широко используемыми датчиками движения в робототехнике являются оптические энкодеры, обеспечивающие бесконтактное измерение.

Оптический энкодер основан на преобразовании движения сустава в серию световых импульсов, которые далее преобразуются в электрические импульсы. Для генерации световых импульсов необходим источник света, обычно светодиод. Преобразование света в электрические импульсы осуществляется фототранзистором или фотодиодом, преобразующим свет в электрический ток.

Модель оптического датчика, оценивающего угловое положение сустава, представлена на рис. 7.4. Он состоит из источника света и линзы, детектора света и вращающегося диска с прорезями, который соединен либо с мотором, либо с шарнирной осью. На вращающемся диске имеется дорожка из щелей и промежутков, которые попеременно то передают, то блокируют свет от светодиода к фототранзистору. Логический выход датчика имеет высокий уровень, когда свет проходит через щель и попадает на фототранзистор на другой стороне вращающейся пластины. Когда путь между светоизлучающим диодом и фототранзистором заблокирован промежутком между двумя слотами, логический выход низкий.

Оптические энкодеры делятся на абсолютные и инкрементальные. В дальнейшем тексте мы узнаем об их наиболее важных свойствах.

7.2.3.1 Абсолютный энкодер

Абсолютный оптический энкодер — это устройство, которое измеряет абсолютное угловое положение сустава. Его выход представляет собой цифровой сигнал. В цифровой системе каждая линия логического сигнала представляет один бит информации. При соединении всех этих битов в единую переменную логического состояния количество всех возможных логических состояний определяет количество всех абсолютных угловых положений, которые могут быть измерены энкодером.

Предположим, что мы хотим измерить угловой поворот на 360° с помощью Абсолютный разрешение $0,1^\circ$ - энкодер должен различать 3600 различных логических состояний, а это значит, что нам нужно как минимум 12 бит для оценки углов сочленения с требуемым разрешением. С помощью 12 бит мы можем представить 4096 логических состояний. Поэтому важным конструктивным параметром абсолютных энкодеров является количество логических состояний, которое зависит от требований задачи и размещения энкодера (до или после редуктора). При размещении энкодера перед редуктором с коэффициентом уменьшения k разрешение измерения угла увеличивается в k раз. Когда энкодер находится за редуктором, необходимое разрешение энкодера напрямую определяется требуемым разрешением измерения угла шарнира. Все логические состояния должны быть равномерно выгравированы на вращающемся диске энкодера. Пример абсолютного энкодера с шестнадцатью логическими состояниями показан на рис. 7.5. Шестнадцать логических состояний могут быть представлены четырьмя битами. Все шестнадцать логических состояний выгравированы на поверхности вращающегося диска. Диск в радиальном направлении разделен на четыре дорожки, представляющие четыре бита. Каждая дорожка разделена на шестнадцать сегментов, соответствующих логическим состояниям. Поскольку информация об угловом смещении представлена четырьмя битами, нам потребуется четыре пары светодиодов и фототранзисторов (по одной паре на каждый бит). При вращении диска, который соединен либо с двигателем, либо с шарнирной осью, выходной сигнал будет изменяться в соответствии с логическими состояниями, определяемыми порядком сегментов (обычно используется код Грея, когда два последовательных значения отличаются только одним битом). в абсолютных энкодерах).

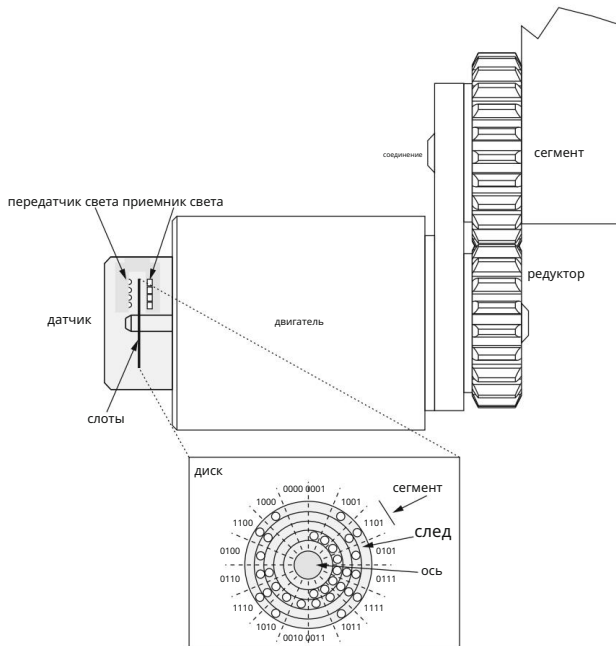


Рис. 7.5 Модель абсолютного энкодера

Абсолютный энкодер определяет не только угловое положение шарнира, но и направление вращения.

7.2.3.2 Инкрементальный энкодер

В отличие от абсолютных энкодеров, инкрементальные энкодеры предоставляют информацию только об изменениях углового положения шарнира. Преимуществами инкрементальных энкодеров по сравнению с абсолютными энкодерами являются их простота, меньшие габариты и (главное) низкая стоимость. Этого можно достичь, уменьшив количество дорожек на вращающемся диске до одной дорожки. Вместо того, чтобы иметь столько дорожек, сколько битов необходимо для представления всех требуемых логических состояний, теперь у нас есть только одна дорожка с равномерным распределением слотов по краю диска.

На рис. 7.6 показана модель инкрементного энкодера. Для одной дорожки требуется только одна пара светодиода и фототранзистора (оптическая пара). При вращении закодированного диска генерируется серия электрических импульсов. Измерение смещения сустава основано на подсчете этих импульсов. Их количество пропорционально смещению сустава робота. Инкрементный энкодер, показанный на рис. 7.6, генерирует восемь импульсов при каждом обороте. Разрешение этого энкодера

$$\vartheta = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}. \quad (7.6)$$

При увеличении количества слотов на диске увеличивается разрешение кодировщика. Обозначив количество слотов как nc , можно записать общее уравнение для разрешения энкодера

$$\vartheta = \frac{2\pi}{nc}. \quad (7.7)$$

Энкодер с одной единственной дорожкой способен оценивать только изменение углового положения шарнира. Он не может предоставить информацию о направлении вращения или абсолютном положении сустава. Если мы хотим применить инкрементальные энкодеры в управлении роботом, мы должны определить: (1) исходное положение, представляющее точку отсчета для измерения изменения положения сустава, и (2) направление вращения.

Проблема исходного положения решается за счет добавления на диск дополнительного эталонного слота. Этот эталонный паз смещен радиально по отношению к дорожке с прорезью, измеряющей угловое положение. Для определения исходного положения необходима дополнительная оптическая пара. При поиске эталонной прорези робот запрограммирован на движение с низкой скоростью до тех пор, пока не будет достигнута эталонная прорезь или конечное положение диапазона движения сустава. В последнем случае робот движется в противоположном направлении к опорной щели.

Задача определения направления вращения решается другой парой светодиода и фототранзистора. Эта дополнительная оптическая пара смещена по касательной и радиально от первой оптической пары, как показано на рис. 7.6. Когда диск

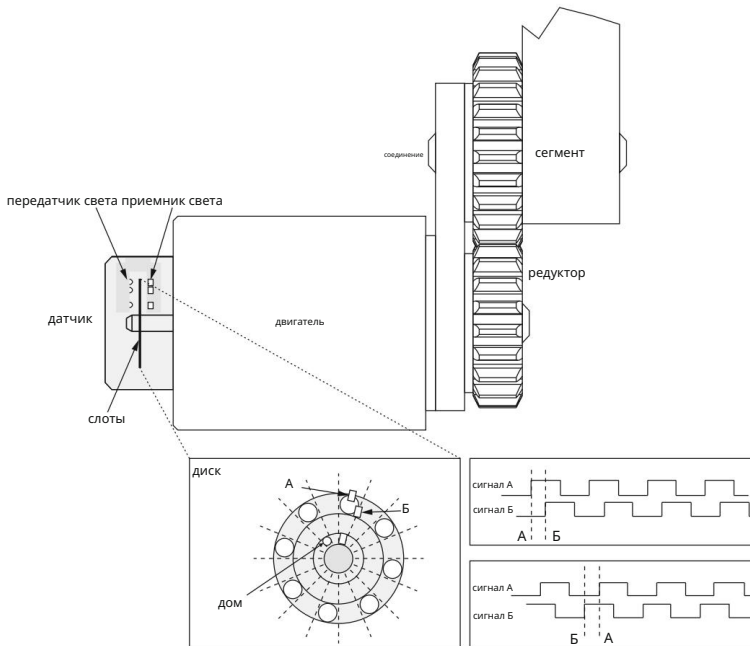


Рис. 7.6 Модель инкрементного энкодера. Серия импульсов для положительного (вверху) и отрицательного (внизу) направления вращения

вращается, получаются два сигнала, которые из-за смещения оптических пар сдвинуты по фазе. Этот сдвиг по фазе происходит потому, что каждый слот на диске сначала достигает первой оптической пары, а после небольшой задержки также и второй пары.

Оптические компоненты обычно размещают таким образом, чтобы между двумя сигналами был получен фазовый сдвиг $\pi/2$. При вращении по часовой стрелке сигнал В отстает по фазе на $\pi/2$ от сигнала А. При вращении против часовой стрелки сигнал В опережает по фазе на $\pi/2$ сигнал А (рис. 7.6).

Направление вращения энкодера можно определить на основе фазовых сдвигов между сигналами А и В. Еще одним преимуществом наличия двух оптических пар является возможность подсчета всех изменений в сигналах А и В. Подход, известный как квадратурное декодирование, обеспечивает разрешение измерения, в четыре раза превышающее номинальное разрешение энкодера.

7.2.4 Магнитный энкодер

В отличие от оптических энкодеров магнитный энкодер использует магнитное поле для измерения положения. Этого можно добиться, используя серию магнитных полюсов (2 или более) на роторе датчика, чтобы представить положение энкодера магнитному датчику. Ротор вращается

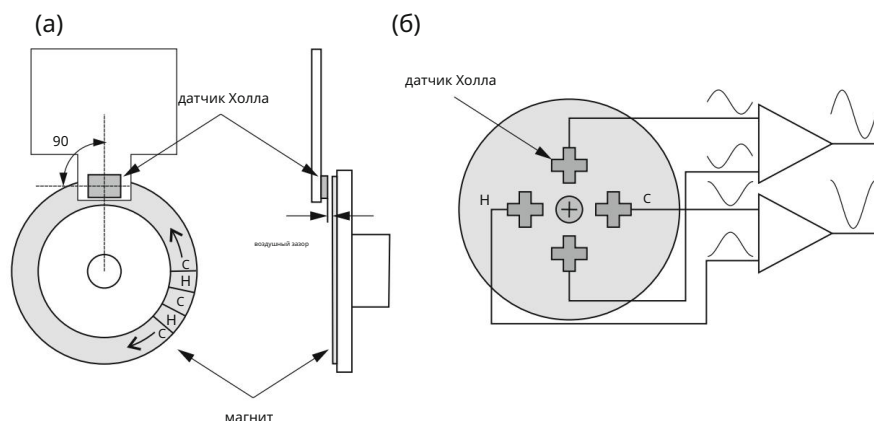


Рис. 7.7 Модель магнитного энкодера: а датчик Холла и чередующиеся северный и южный полюса и б несколько датчиков Холла с диаметрально намагниченным вращающимся магнитом

с валом и содержит чередующиеся, равномерно расположенные северный и южный полюса по его окружности. Магнитный датчик (обычно магниторезистивный или на эффекте Холла) считывает положения магнитных полюсов. Датчики Холла генерируют выходное напряжение, пропорциональное силе приложенного магнитного поля. Магниторезистивные датчики обнаруживают изменения сопротивления, вызванные магнитным полем. Принцип работы показан на рис. 7.7а.

Датчики Холла можно использовать для измерения угла также при размещении рядом с диаметрально намагниченным магнитом, генерирующим синусоидальную форму волны. Ограничением этого метода является неоднозначность при углах $>90^\circ$ в обоих направлениях от точки пересечения нуля. Для расширения диапазона измерения до 360° , уточнение требуется метод. Проблема может быть решена путем использования нескольких датчиков Холла, а не одного, и размещения их под диаметрально намагниченным вращающимся магнитом для генерации нескольких синусоидальных сигналов. На рис. 7.7б показаны четыре равноудаленных датчика Холла, генерирующие четыре синусоидальных сигнала, каждый из которых сдвинут по фазе на 90° относительно соседнего. Магнитные энкодеры обычно более надежны, чем оптические энкодеры.

7.2.5 Тахометр

Сигнал скорости сустава можно получить путем численного дифференцирования сигнала положения. Тем не менее прямое измерение скорости сустава с помощью тахометра часто используется в робототехнике. Причиной является шум, вносимый численным дифференцированием, который может сильно повлиять на качество управления роботом.

Тахометры можно разделить на: (1) тахометры постоянного тока (DC) и (2) тахометры переменного тока (AC). В робототехнике обычно используются более простые тахометры постоянного тока. Принцип работы основан на генераторе постоянного тока, магнитное поле которого создается постоянными магнитами. Поскольку магнитное поле постоянно, выходное напряжение тахометра пропорционально угловой скорости ротора. Поскольку в тахометрах постоянного тока используются коммутаторы, в выходном напряжении появляются небольшие пульсации, которые невозможно полностью отфильтровать. Этот недостаток вместе с другими недостатками устраняется использованием тахометров переменного тока.

7.2.6 Инерциальная единица измерения

Потенциометры и оптические энкодеры измеряют смещения суставов в механизмах роботов. При рассмотрении, например, роботизированного летательного аппарата или колесного робота эти датчики не предоставляют информацию об ориентации устройства в пространстве.

Измерение ориентации объекта (робота) в пространстве обычно основано на магнитоинерциальном принципе. Этот метод сочетает в себе гироскоп (датчик угловой скорости), акселерометр (датчик линейного ускорения) и магнитометр (измеряет ориентацию относительно магнитного поля Земли и не рассматривается как инерциальный датчик).

Метод будет проиллюстрирован на примере жесткого маятника, снабженного двухосным акселерометром (измеряет ускорения по двум перпендикулярным осям) и одноосным гироскопом (рис. 7.8). Оба датчика выдают измеренные величины в своих собственных системах координат, которые прикреплены к центру датчика и имеют оси, параллельные осям x и y системы координат, прикрепленной к маятнику. На рис. 7.8a показан неподвижный маятник, а на рис. 7.8b — качающийся маятник. Нас интересует ориентация маятника относительно системы координат $x_0-y_0-z_0$. Поскольку маятник качается только вокруг оси z , нас интересует только угол ϕ .

Сначала проанализируем стационарные условия. Поскольку угловая скорость покоящегося маятника равна нулю, выходной сигнал гироскопа также равен нулю, и гироскоп ничего не говорит нам об ориентации маятника. Однако мы видим, что акселерометр по-прежнему измеряет гравитационное ускорение. Поскольку акселерометр расположен под углом ϕ к гравитационному полю, измеряются две составляющие ускорения: a_x и a_y .

Векторная сумма обоих компонентов дает ускорение свободного падения. На рис. 7.8a показано, что угол между векторами g и a равен ϕ . Поскольку скалярные значения ускорений a_x и a_y известны, теперь мы можем определить угол наклона маятника

$$\phi = \arctg \frac{a_x}{a_y} . \quad (7.8)$$

Таким образом, акселерометр позволяет измерять угол маятника в стационарных условиях. По этой причине акселерометры часто используются в качестве инклинометров.

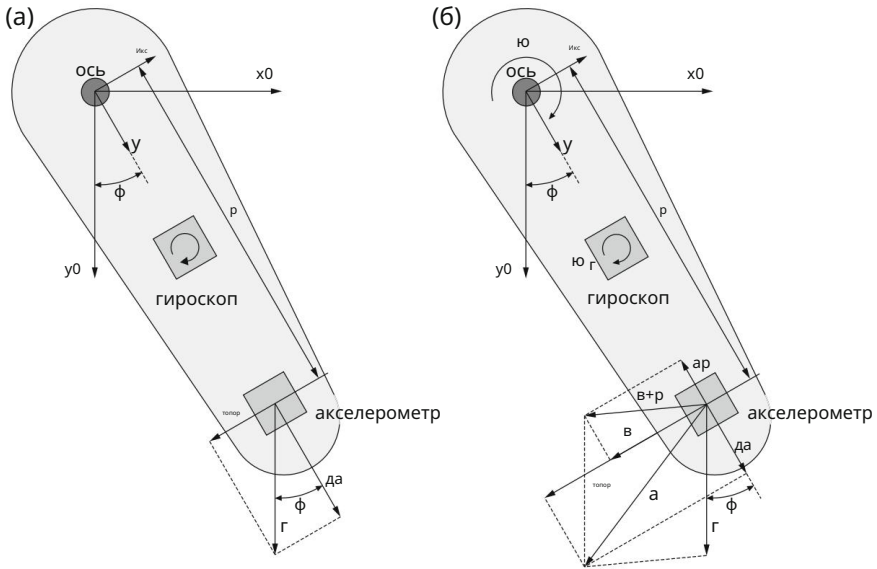


Рис. 7.8 Пример использования инерциальной измерительной системы для измерения угла маятника: левый рисунок — неподвижный маятник, правый рисунок — качающийся маятник

Условия в качающемся маятнике совсем другие. Поскольку качение ускоренное вращательное движение, на акселерометр влияет не только гравитационное ускорение g , но и центростремительное ускорение

$$a_p = \omega \times (\omega \times r) \quad (7.9)$$

и тангенциальное ускорение

$$a_t = \dot{\omega} \times r. \quad (7.10)$$

Таким образом, полное ускорение, действующее на акселерометр, равно

$$a = g + a_p + a_t. \quad (7.11)$$

Уравнение, используемое для расчета угла в стационарных условиях (7.8), больше не действует, следовательно, акселерометр нельзя использовать для расчета угла качающегося маятника. Однако выход гироскопа, измеряющего угловую скорость маятника, теперь также доступен. Так как угол маятника может быть вычисляемый как временной интеграл угловой скорости, может быть получено следующее соотношение

$$\phi = \phi_0 + \omega dt, \quad (7.12)$$

где должна быть известна начальная ориентация маятника ϕ_0 .

Приведенный пример показывает, что акселерометр пригоден для измерения ориентации в статических или квазистатических условиях, а гироскоп — для измерения ориентации в динамических условиях. Однако следует упомянуть о двух слабых сторонах акселерометров и гироскопов. Акселерометр нельзя использовать для измерения углов в горизонтальной плоскости, поскольку выходной сигнал датчика равен нулю, когда его ось перпендикулярна направлению силы тяжести.

Для этой цели мы можем использовать магнитометр, который также позволяет измерять вращение вокруг вектора гравитационного поля (вспомните, как работает компас). Более того, ни гироскоп, ни акселерометр не идеальны. В дополнение к измеренной величине выходные данные включают смещение и шум. Интегрирование смещения вызывает линейный дрейф, поэтому уравнение (7.12) не дает точного измерения ориентации маятника. Из-за недостатков отдельных датчиков принято объединять три перпендикулярных акселерометра, три перпендикулярных гироскопа и три перпендикулярных магнитометра в единую систему, называемую магнитоинерциальным измерительным блоком (ИМИ). Сочетание лучших свойств акселерометра, гироскопа и магнитометра может дать точное и надежное измерение пространственной ориентации.

Угловая скорость, измеренная гироскопом, интегрируется, что дает оценку ориентации. Измерения акселерометра и магнитометра используются для непосредственного расчета ориентации датчика относительно векторов гравитации и магнитного поля. Это достигается за счет слияния датчиков, что можно сделать с помощью фильтра Калмана.

7.3 Контактные датчики

Рассмотренные до сих пор датчики предоставляют информацию о позе и движении робота. Они позволяют замыкать контур управления положением и скоростью. В некоторых задачах робота требуется контакт рабочего органа с окружающей средой. Типичными контактными датчиками, используемыми в робототехнике, являются тактильные датчики и датчики силы и крутящего момента. Тактильные датчики измеряют параметры, определяющие контакт между датчиком и объектом.

Зондирование заключается в измерении силы точечного контакта и пространственного распределения сил перпендикулярно площади. Напротив, датчики силы и крутящего момента измеряют общую силу, приложенную к объекту.

7.3.1 Тактильный датчик

Роботы могут собирать информацию об окружающей среде также посредством прикосновения. Чтобы расширить возможности манипулирования роботом, в пальцах робота можно использовать тактильные датчики, как показано на рис. 7.9а. Датчик предоставляет данные о распределении контактной силы между пальцем и объектом манипулирования. Для повышения безопасности робота (например, когда

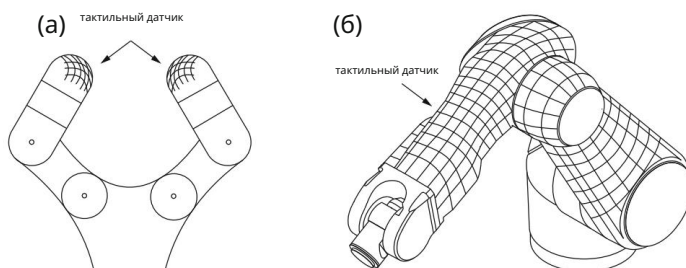


Рис. 7.9 Тактильный датчик, используемый в пальце робота (слева) и в качестве кожи робота (справа)

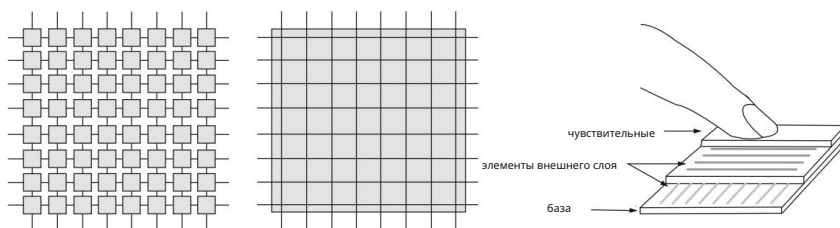


Рис. 7.10 Модель тактильного датчика

при работе с человеком) в качестве искусственной кожи робота можно использовать тактильные датчики, позволяющие роботу ощущать контакты с объектами окружающей среды (рис. 7.9б).

Тактильное восприятие основано на массиве сенсорных датчиков, как показано на рис. 7.10.

В массиве могут быть реализованы следующие принципы восприятия:

- датчики на основе деформации — поверхность материала деформируется (меняет длину) под действием внешних сил; деформация преобразуется в электрические сигналы с помощью тензорезисторов, подключенных к мосту Уитстона;
- резистивные датчики — изменение электрического сопротивления при изменении давления материала, помещенного между двумя электродами;
- емкостные датчики — чувствительный элемент представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется в зависимости от приложенной силы; сила может вызвать изменение как расстояния между пластинами конденсатора, так и его площади;
- оптические датчики — восприятие обычно основано на измерении интенсивности света; интенсивность света можно регулировать, перемещая препятствие или отражающую поверхность на световой путь; интенсивность полученного света зависит от смещения и, следовательно, от приложенной силы;
- пьезоэлектрические датчики —

такие материалы, как кварц, обладают пьезоэлектрическими свойствами и поэтому могут использоваться для тактильных ощущений; пьезоэлектрические преобразователи не подходят для передачи статической силы; эту проблему можно решить, вибрируя датчик и обнаруживая разницу в частоте вибрации из-за приложенной силы;

- магнитные датчики — изменение плотности магнитного потока или магнитная связь между цепями являются наиболее широко используемыми принципами магнитотактильного зондирования; •
- механические датчики — чувствительные элементы представляют собой механические микропереключатели с включенным и выключенным состоянием.

7.3.2 Концевой выключатель и бампер

Концевые выключатели часто используются для управления механизмами роботов. Они могут обнаруживать одно положение движущейся части и поэтому подходят для обеспечения того, чтобы движение не превышало заданный предел. Например, датчик бампера, особый тип концевой выключателя, сообщит роботу, находится ли он в контакте с физическим объектом или нет.

Если датчик установлен на переднем бампере мобильного робота, робот может использовать эту информацию, чтобы определить, столкнулся ли он с препятствием, например со стеной (рис. 7.11).

Роботы-пылесосы обычно полагаются на датчики бампера для навигации в домашней обстановке.

7.3.3 Датчик силы и крутящего момента

В простейшем случае измерение силы позволяет отключить робота, когда контактная сила превышает заданный безопасный предел. В более сложном случае мы используем датчики силы для контроля силы между рабочим органом робота и окружающей средой. Поэтому нетрудно понять, что датчик силы помещается в запястье робота и поэтому часто называется датчиком запястья.

Тензодатчики обычно используются для измерения силы. Тензорезистор крепится к упругой балке, которая деформируется под действием приложенной силы. Таким образом, тензорезистор ведет себя как переменный резистор, сопротивление которого изменяется пропорционально его деформации. Датчик на запястье не должен влиять на

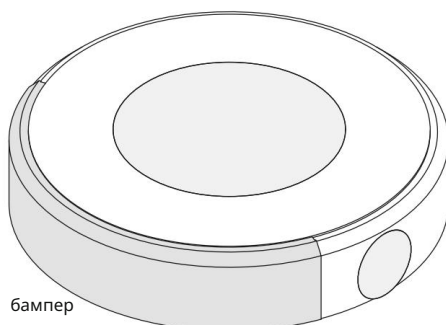


Рис. 7.11 Датчики бампера для использования на мобильном роботе

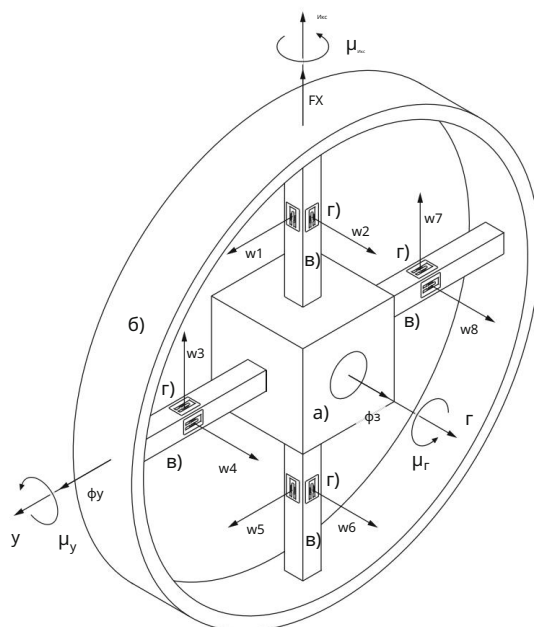


Рис. 7.12 Модель датчика силы и крутящего момента: твердое тело, контактирующее с рабочим органом робота, б жесткое кольцо, контактирующее с окружающей средой робота, с упругие балки, d тензорезистор

Взаимодействие робота с окружающей средой. Это означает, что датчик на запястье должен быть достаточно жестким. Наручные датчики робота обычно имеют конструкцию, показанную на рис. 7.12. Конструкция датчика основана на трех компонентах: (а) жесткая внутренняя часть, контактирующая с рабочим органом робота; (б) жесткое внешнее кольцо, контактирующее с окружающей средой робота; и (с) эластичные балки, соединяющие внешнее и внутреннее кольца. При контакте робота с окружающей средой балки деформируются внешними силами, что вызывает изменение сопротивления тензорезисторов.

Вектор сил и моментов, действующих на рабочий орган робота, находится в трехмерном пространстве, представленном шестью элементами, тремя силами и тремя моментами.

Прямоугольное поперечное сечение балки (показанное на рис. 7.12) позволяет измерять деформации в двух направлениях. Для измерения шести элементов вектора силы и крутящего момента необходимы как минимум три балки, которые не лежат на одной прямой. В примере на рис. 7.12 используются четыре луча. К перпендикулярным поверхностям каждой балки прикреплены два тензодатчика. Имея восемь тензодатчиков, есть восемь переменных сопротивлений, от R1 до R8. Вследствие действия внешних сил и крутящих моментов возникают упругие деформации от w1 до w8, приводящие к изменению сопротивлений от R1 до R8. Небольшие изменения сопротивления с помощью моста Уитстона преобразуются в сигналы напряжения (рис. 7.13). К каждой из восьми переменных

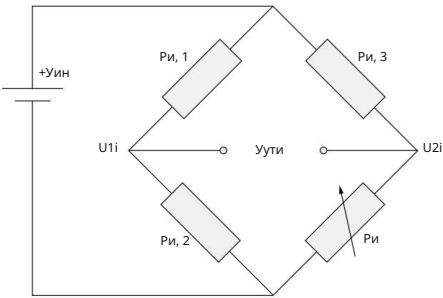


Рис. 7.13 Мост Уитстона

резисторов {R1 ... R8} добавляются три дополнительных резистора. Три резистора вместе с тензодатчиком включены в измерительный мост. На мост подается напряжение $U_{ин}$, а выходное напряжение U_{outi} определяется разностью $U_{1i} - U_{2i}$.
Напряжение U_{1i} равно

$$U_{1i} = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} U_{ин}, \tag{7.13}$$

в то время как напряжение U_{2i}

$$U_{2i} = U_{вх} \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} \tag{7.14}$$

Выходное напряжение равно

$$U_{ти} = \frac{R_{i,2}}{R_{i,1} + R_{i,2}} - \frac{R_i}{R_i + R_{i,3}} U_{ин}. \tag{7.15}$$

Дифференцируя уравнение (7.15) по переменной R_i можно определить влияние изменения сопротивления тензорезистора на выходное напряжение

$$U_{outi} = \frac{R_{i,3} U_{ин}}{(R_i + R_{i,3})^2} R_i. \tag{7.16}$$

Перед применением датчик силы должен быть откалиброван, что требует определения калибровочной матрицы 6×8 , преобразующей шесть выходных напряжений в три силы f_x, f_y, f_z при моментах μ_x, μ_y, μ_z

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} U_{вых1} & U_{вых2} & U_{вых3} & U_{вых4} & U_{вых5} & U_{вых6} & U_{вых7} & U_{вых8} \end{bmatrix}^T, \tag{7.17}$$

где

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & K_{13} & 0 & 0 & K_{17} & 0 \\ 21 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{32} & 0 & K_{34} & 0 & K_{36} & 0 \\ 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 & K_{48} & 0 \\ 0 & K_{52} & 0 & 0 & K_{56} & 0 & 0 \\ K_{61} & 0 & K_{63} & 0 & K_{65} & 0 & K_{67} \end{pmatrix}$$

(7.18)

– калибровочная матрица с постоянными значениями K_{ij} .

7.3.4 Датчик крутящего момента соединения

Часто требуется или предпочтительнее измерять крутящие моменты в суставах, а не усилия на концевом рабочем органе робота. В таких случаях необходимо использовать датчик крутящего момента шарнира. Измеряя крутящие моменты в суставах, робот может реагировать на силы, приложенные в любом месте его механизма. Если известна динамическая модель робота, можно также оценить силы концевой рабочей органы.

В качестве примера рассмотрим уравнение (5.20). Обратное к этому уравнению даст

$$\phi = D_j^{-T}(K)T.$$

(7.19)

Следует отметить, что приведенное выше уравнение дает точные силы рабочего органа только в статических условиях и если сила тяжести не влияет на крутящий момент в суставах. В других условиях необходимо учитывать динамическую модель робота (5.56).

Принцип работы датчика крутящего момента обычно аналогичен принципу работы наручного датчика. Однако его механическая структура разработана таким образом, чтобы соответствовать оси сустава.

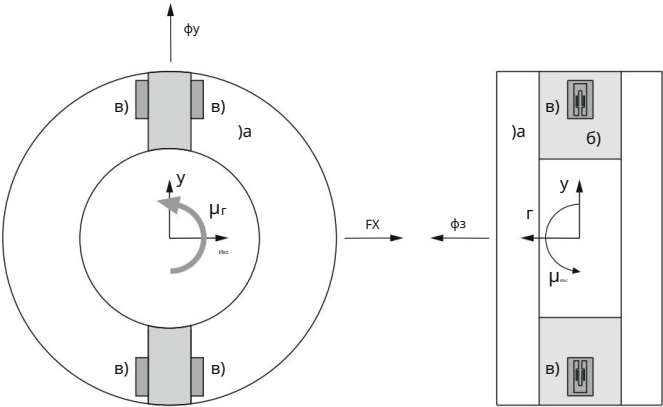


Рис. 7.14 Конструкция датчика крутящего момента в соединении измеряет крутящий момент μ_z : а рама, б упругий элемент и в тензодатчик.

Таким образом, датчик встроен между исполнительным механизмом (и, возможно, шестерней) и сегментом робота. Датчик должен гарантировать высокую чувствительность к кручению, низкую чувствительность к компонентам без кручения и высокую жесткость по всем осям сил и моментов.

Деформация механической конструкции из-за крутящего момента в соединении измеряется с помощью тензодатчиков. Схематическое изображение датчика крутящего момента шарнира показано на рис. 7.14.

7.4 Датчики приближения и дальности

Датчики приближения и дальности обнаруживают присутствие близлежащих объектов без физического контакта. Последовательно они позволяют различать препятствия разных форм и размеров, а также более эффективно избегать препятствий, чем контактные датчики. Для обнаружения препятствий на расстоянии можно использовать различные методы. Методы, основанные на магнитных и емкостных принципах, обычно позволяют определять близость объекта, но не его расстояние. Когда важно расстояние, можно рассмотреть активные методы, такие как ультразвуковой дальномер, лазерный дальномер и инфракрасный датчик приближения, а также пассивные методы, основанные на камерах. Все методы характеризуются высокой надежностью и длительным сроком службы, так как работают без физического контакта между датчиком и воспринимаемым объектом.

7.4.1 Ультразвуковой дальномер

Ультразвуковой дальномер измеряет расстояние до объекта с помощью звуковых волн.

Расстояние измеряется путем отправки звуковой волны ультразвуковой частоты (более высокие частоты лучше подходят для ближнего действия и высокой точности) и прослушивания отражения этой звуковой волны (рис. 7.15а). Время, прошедшее между генерируемой звуковой волной и ее отражением, используется для расчета расстояния между датчиком и объектом (учитывая, что скорость звука в воздухе составляет приблизительно 343 м/с).

Понимание зоны обнаружения важно для успешного обнаружения объекта и уклонения от него.

Ширина луча ультразвукового дальномера обычно описывается как конус определенного угла. Этот угол описывает дугу, по которой ультразвуковая волна исходит от преобразователя. Однако на определенном расстоянии скорость расширения начинает уменьшаться, как показано на рис. 7.15б. Расширение области измерения ультразвукового дальномера может быть достигнуто за счет использования нескольких блоков датчиков, расположенных под разными углами (рис. 7.15в). В таком случае необходимо учитывать проблему перекрестных помех.

Различные другие факторы влияют на работу ультразвукового дальномера. Необходимо учитывать размер, состав, форму и ориентацию объектов. В случаях, представленных на верхних изображениях на рис. 7.16, измерения, как правило, правильные, в то время как в сценариях, представленных на нижних изображениях на рис. 7.16, ультразвуковой дальномер дает ложные результаты.

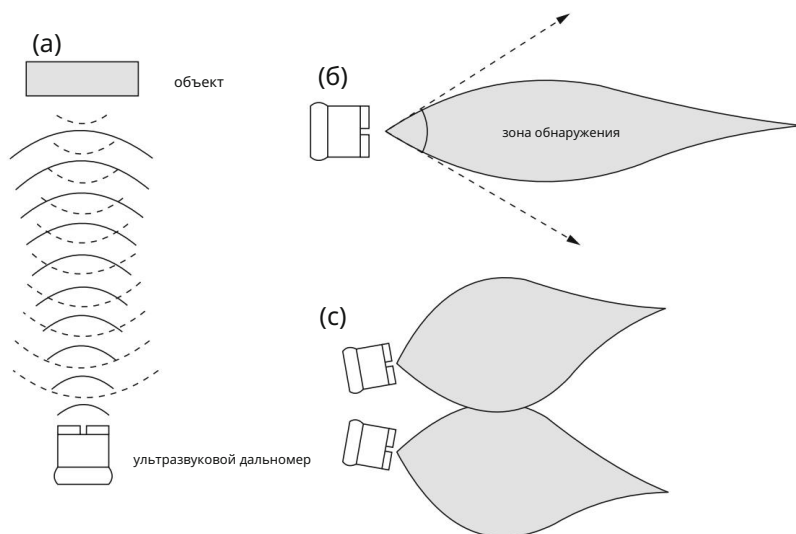


Рис. 7.15 Ультразвуковой дальномер: а принцип работы, б зона обнаружения и в комбинация нескольких датчиков

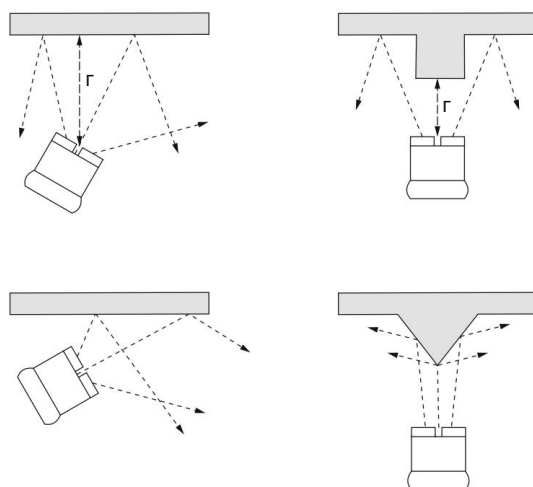


Рис. 7.16 Измерение расстояния ультразвуковым дальномером и ограничения: правильные измерения расстояния d (верхний ряд) и ложные результаты (нижний ряд)

7.4.2 Лазерный дальномер и лазерный сканер

Лазерный дальномер использует лазерный луч для определения расстояния до объекта. Наиболее распространенная форма лазерного дальномера работает по принципу времени пролета. Расстояние можно определить, измерив время, за которое лазерный импульс возвращается в исходное положение.

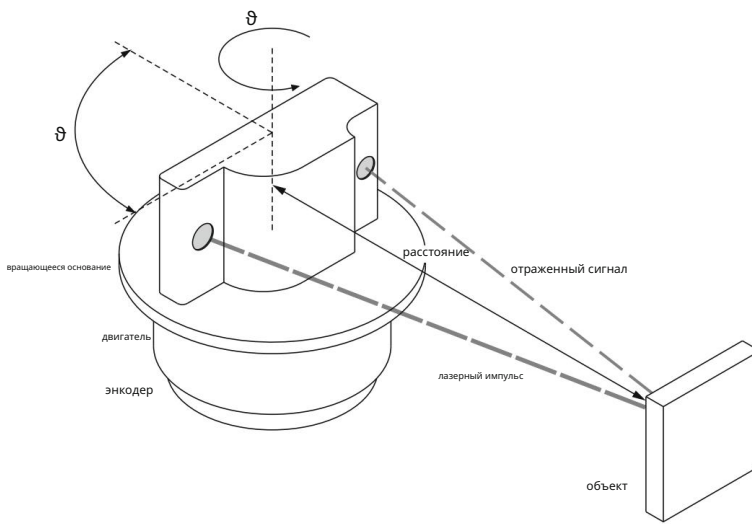


Рис. 7.17 Лазерный сканер

датчик и требует точного измерения времени. Зная скорость света и точно измеряя затраченное время, можно рассчитать расстояние. Другая возможность состоит в том, чтобы вычислить фазовый сдвиг световой волны, анализируя входящий свет и сравнивая его с эталонным сигналом. Наиболее точным методом измерения изменений расстояния, а не абсолютных расстояний, является интерферометрия.

Лазерный дальномер измеряет расстояние до одного объекта за раз. Следовательно, это одномерный датчик. В лазерном сканере используется лазер, который проходит через поле зрения датчика. Как следует из названия, прибор в основном состоит из лазера и сканера. Расстояния измеряются как с помощью лазерного дальномера. Лазерный сканер создает массив точек, замеряя окружающую среду с высокой скоростью. Обычно это достигается за счет использования вращающихся узлов или вращающихся зеркал, которые вращаются вокруг окружающей среды на 360 градусов. Принцип работы лазерного сканера показан на рис. 7.17.

Выборочные точки представляют положения объекта относительно датчика. Генерация массива точек представлена на рис. 7.18. Расстояние dL измеряется с помощью лазера, а угол поворота θL обычно измеряется с помощью энкодера на вращающемся узле. Поэтому точки определяются в полярных координатах. Их можно преобразовать в декартовы координаты (xL, yL) относительно датчика с

$$xL = dL \cos \theta L \text{ и } yL = dL \sin \theta L. \quad (7.20)$$

Точки выборки можно использовать для создания карты окружающей среды, планирования пути и обхода препятствий. Трехмерный (3-D) сканер позволяет сканировать

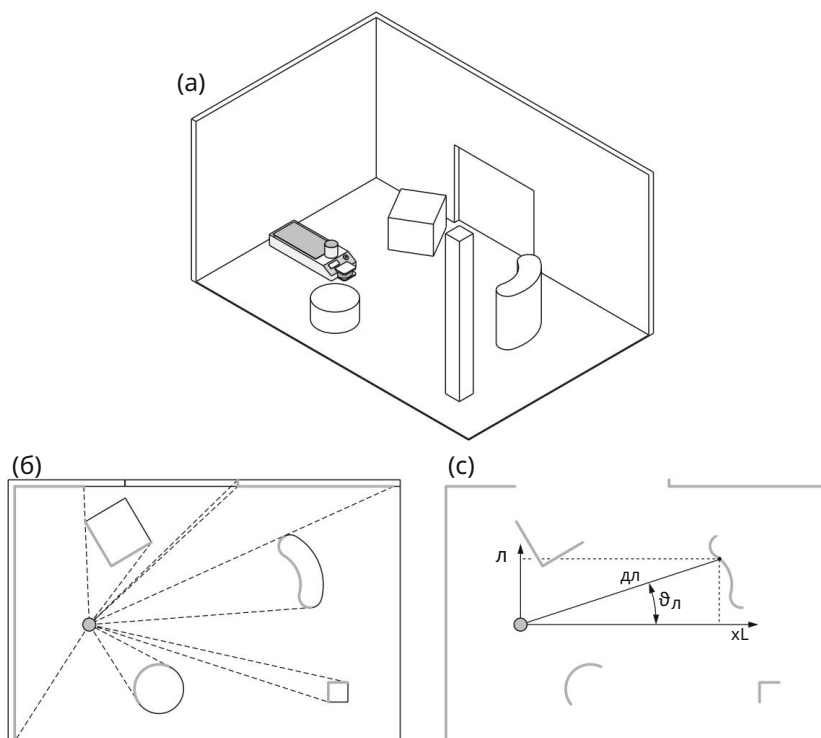


Рис. 7.18. Лазерный сканер для создания карты окружающей среды: а-среда, б-сканирование и в-карта

полное трехмерное пространство и сбор данных трехмерного облака точек с использованием другой степени свободы вращающегося узла. Эти трехмерные лазерные сканеры обычно называются LiDAR (Light Detection And Ranging) и часто используются в автономных транспортных средствах для сканирования окружающей среды.

Глава 8

Видение робота



Задача зрения робота — распознать геометрию рабочего пространства робота по цифровому изображению. Наша цель — найти связь между координатами точки на двумерном (2D) изображении и координатами точки в реальной трехмерной (3D) среде робота.

8.1 Конфигурация системы

Система технического зрения роботов основана на использовании одной, двух и более камер. Если для наблюдения за одним и тем же объектом используется несколько камер, можно получить информацию о глубине объекта. В таком случае мы говорим о трехмерном или стереозрении. Конечно, 3D-вид также можно получить с помощью одной камеры, если доступны два изображения объекта, снятые из разных поз. Если доступно только одно изображение, глубину можно оценить на основе некоторых заранее известных геометрических свойств объек

При анализе конфигурации роботизированной системы технического зрения необходимо различать возможные варианты размещения камер. Камеры могут быть размещены в стационарной конфигурации, когда они жестко закреплены в рабочей ячейке, или в мобильной конфигурации, когда камера прикреплена к роботу. В первой конфигурации камера наблюдает за объектами из фиксированного положения относительно базовой системы координат робота. Поле зрения камеры не меняется в процессе выполнения задачи, а значит, в основном точность измерения постоянна. В некоторых задачах сложно предотвратить попадание манипулятора в поле зрения камеры и тем самым перекрытие объектов. Поэтому в таком случае необходимо ставить камеру на робота (в мобильной конфигурации).

Камеру можно прикрепить до или после запястья робота. В первом случае камера наблюдает за ситуацией с выгодной позиции, а манипулятор вообще не перекрывает ее поле зрения. Во втором случае камера прикреплена к рабочему органу робота и обычно наблюдает только за объектом, которым манипулируют.

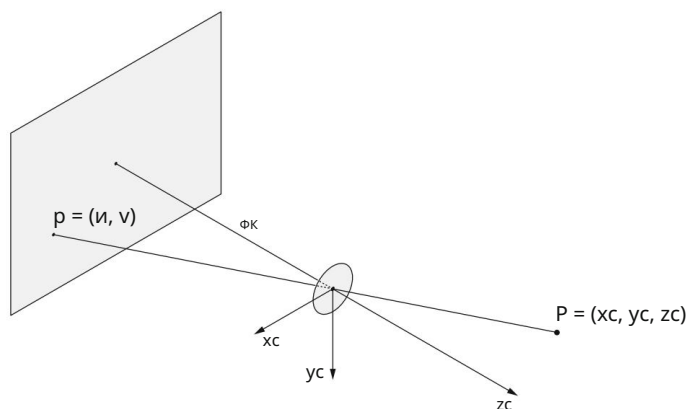


Рис. 8.1 Перспективная проекция

ул. В обоих случаях поле зрения камеры меняется при движениях манипулятора. При приближении манипулятора к объекту точность измерения обычно возрастает.

8.2 Проекция вперед

Основные уравнения оптики определяют положение точки в плоскости изображения относительно соответствующей точки в трехмерном пространстве (рис. 8.1). Таким образом, мы найдем геометрическую связь между координатами точки $P = (x_c, y_c, z_c)$ в пространстве и координатами точки $p = (u, v)$ на изображении.

Поскольку апертура объективов камеры, через которую свет падает на плоскость изображения, мала по сравнению с размерами объектов, которыми манипулирует робот, мы можем заменить линзы в нашей математической модели простым отверстием. В перспективной проекции точки из пространства проецируются на плоскость изображения линиями, пересекающимися в общей точке, называемой центром проекции. При замене реальной камеры на камеру-обскуру центр проекции располагается в

При изучении геометрии и кинематики робота мы привязывали систему координат к каждому твердому телу (например, к сегментам робота или к объектам, которыми робот манипулирует). При рассмотрении зрения робота сама камера представляет собой твердое тело, и ей должна быть назначена система координат. Положение камеры с этого момента будет описываться соответствующей системой координат. Ось z_c кадра камеры направлена вдоль оптической оси, а начало кадра расположено в центре проекции. Мы выберем правосторонний кадр, в котором ось x_c параллельна рядам датчика изображения, а ось y_c параллельна его столбцам.

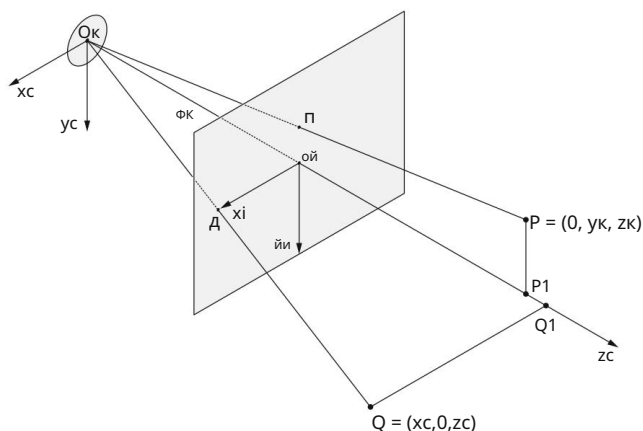


Рис. 8.2 Эквивалентная плоскость изображения

Плоскость изображения находится в камере, расположенной за центром проекции. Расстояние f_c между изображением и центром проекции называется фокусным расстоянием. В кадре камеры фокусное расстояние имеет отрицательное значение, так как плоскость изображения пересекает отрицательную ось z_c . Удобнее использовать эквивалентную плоскость изображения, расположенную при положительном значении z_c (рис. 8.2). Эквивалентная плоскость изображения и плоскость реального изображения симметричны относительно начала координат кадра камеры. Геометрические свойства объектов эквивалентны в обеих плоскостях и отличаются только знаком.

С этого момента мы будем называть эквивалентную плоскость изображения просто плоскостью изображения. Также плоскость изображения можно рассматривать как твердое тело, к которому следует прикрепить систему координат. Начало этого кадра находится на пересечении оптической оси с плоскостью изображения. Оси x_i и y_i параллельны осям x_c и y_c кадра камеры.

Таким образом, камера имеет две системы координат: рамку камеры и рамку изображения. Пусть точка P выражена в кадре камеры, а точка p представляет собой ее проекцию на плоскость изображения. Нашей целью является найти соотношения между координатами точки P и координатами ее изображения p .

Предположим сначала, что точка P расположена в плоскости y_c-z_c камеры. Его координаты

$$P = \begin{pmatrix} 0 \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix}. \quad (8.1)$$

Проецируемая точка p в этом случае расположена на оси y_i плоскости изображения.

$$p = \begin{pmatrix} 0 \\ y_i \end{pmatrix}. \quad (8.2)$$

Ввиду подобия треугольников $P P1O_c$ и PO_c можно написать

$$\frac{y_c}{y_i} = \frac{z_c}{f_c}$$

или

$$y_c y_i = \frac{f_c z_c}{f_c} \quad (8.3)$$

Рассмотрим также точку Q , лежащую в плоскости x_c-z_c кадра камеры. После перспективной проекции точки Q ее изображение q попадает на ось x_i кадра изображения. В силу подобных треугольников $Q Q1O_c$ и QO_c имеем

$$\frac{x_c}{x_i} = \frac{z_c}{f_c}$$

или

$$x_i = f_c z_c \frac{x_c}{f_c} \quad (8.4)$$

Таким образом, мы получили связь между координатами (x_c, y_c, z_c) точки P в кадре камеры и координатами (x_i, y_i) точки p в плоскости изображения. Уравнения (8.3) и (8.4) представляют собой математическое описание перспективной проекции из трехмерного пространства в двумерное. Оба уравнения можно записать в виде перспективного матричного уравнения

$$\begin{matrix} & x_i & & & x_c \\ & y_i & & & y_c \\ & 1 & & & z_c \end{matrix} \begin{matrix} & f_c & 0 & 0 \\ 0 & f_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \begin{matrix} & & & & x_c \\ & & & & y_c \\ & & & & z_c \\ & & & & 1 \end{matrix} \quad (8.5)$$

В уравнении (8.5) s — коэффициент масштабирования, а (x_i, y_i) — координаты проецируемой точки в кадре изображения, а (x_c, y_c, z_c) — координаты исходной точки в кадре камеры.

Из матричного уравнения (8.5) нетрудно понять, что мы можем однозначно определить координаты (x_i, y_i) и масштабный коэффициент s , зная (x_c, y_c, z_c) . Наоборот, мы не можем вычислить координаты (x_c, y_c, z_c) в кадре камеры, когда известны только координаты (x_i, y_i) в кадре изображения, но не коэффициент масштабирования.

Уравнение (8.5) представляет собой прямую проекцию зрения робота. Вычисление (x_c, y_c, z_c) из (x_i, y_i) называется обратной проекцией. При использовании одной камеры и без априорной информации о размерах объектов в среде робота невозможно найти однозначное решение обратной задачи.

Для простоты программирования удобнее использовать индексы, отмечающие положение пикселя (т. е. наименьшего элемента цифрового изображения) в двумерном изображении вместо метрических единиц по осям x_i и y_i кадра изображения. Мы будем использовать два индекса, которые будем называть индексными координатами пикселя (рис. 8.3). Это индекс строки и индекс столбца. В памяти, хранящей цифровое изображение, индекс строки и

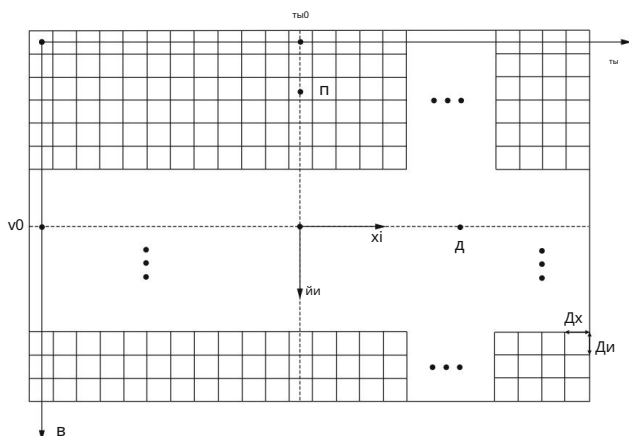


Рис. 8.3 Плоскость изображения и индексная система координат

верхняя часть изображения вниз, а индекс столбца начинается слева и останавливается на правом краю изображения. Мы будем использовать ось u для индексов столбцов и ось v для индексов строк. Таким образом, индексная система координат $u-v$ принадлежит каждому конкретному изображению. Верхний левый пиксель обозначается либо $(0, 0)$, либо $(1, 1)$. Индексные координаты не имеют единиц измерения.

В дальнейшем тексте мы найдем связь между координатами изображения (x_i, y_i) и координатами индекса (u, v) . Предположим, что цифровое изображение было получено как прямой выход с датчика изображения (на выходе датчика изображения выполнялось аналого-цифровое преобразование). При этом каждый пиксель соответствует определенному элементу матрицы. Будем считать, что площадь датчика изображения прямоугольная.

Начало кадра изображения находится в точке (u_0, v_0) индексного кадра. Размер пикселя представлен парой (D_x, D_y) . Связь между кадром изображения x_i-y_i и индексным кадром $u-v$ описывается следующими двумя уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{x_i}{D_x} &= u - u_0 \\ \frac{y_i}{D_y} &= v - v_0. \end{aligned} \quad (8.6)$$

Уравнения (8.6) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \frac{x_i}{D_x} \\ v &= v_0 + \frac{y_i}{D_y}. \end{aligned} \quad (8.7)$$

уравнении. (8.7) представляют количество цифровых преобразований по строке и столбцу Dx соответственно. Уравнение (8.7) можно переписать в следующей матричной форме

$$\begin{array}{ccccc} & & \frac{1}{Dx} & 0 & 0 \\ \text{ты} & & & & \\ \text{В} & \text{"="} & 0 & \frac{1}{v0} & \\ 1 & & \text{Дай} & 001 & \end{array} \quad \begin{array}{c} xi \\ \\ yi \\ 1 \end{array} \quad (8.8)$$

Используя модель камеры-обскуры, теперь мы можем объединить уравнение (8.5), связывая координаты изображения с координатами камеры, и уравнение (8.8), описывающая связь между координатами изображения и индекса

$$\begin{array}{ccccc} & & \frac{1}{Dx} & 0 & 0 \\ \text{ты} & & & & \\ \text{В} & \text{"="} & 0 & \frac{1}{v0} & \\ 1 & & \text{Дай} & 001 & \end{array} \quad \begin{array}{c} \phi_k \ 0 \ 00 \\ 0 \ \phi_k \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 10 \end{array} \quad \begin{array}{c} xc \\ yc \\ zk \\ 1 \end{array} \quad \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \quad (8.9)$$

$$\begin{array}{ccccc} & & \frac{\phi_k}{Dx} & 0 & 0 \\ \text{"="} & & 0 & \phi_k & v0 \ 0 \\ & & \text{Ды} & 0 \ 0 \ 10 & \end{array} \quad \begin{array}{c} xc \\ yc \\ zk \\ 1 \end{array} \quad \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array}$$

Вышеупомянутая матрица может быть записана также в следующем виде

$$P = \begin{array}{ccccc} \phi_x \ 0 \ u0 \ 0 \\ 0 \ \phi_y \ v0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 10 \end{array} \quad (8.10)$$

Матрица P представляет собой перспективную проекцию из кадра камеры в соответствующий индекс координат. Переменные

$$\begin{array}{l} \phi_x = \frac{\phi_k}{Dx} \\ \phi_y = \frac{\phi_k}{Dy} \end{array} \quad (8.11)$$

– фокусные расстояния камеры по осям x_c и y_c . Параметры ϕ_x , ϕ_y и $v0$ называются собственными параметрами камеры.

В целом внутренние параметры камеры неизвестны. Характеристики камеры и объективов недостаточно точны. Таким образом, внутренние параметры камеры получаются в процессе калибровки камеры. Зная внутренние параметры камеры, мы можем однозначно вычислить координаты индекса (u, v) по заданным координатам (x_c, y_c, z_c) . Координаты (x_c, y_c, z_c) не могут быть определены по известным (u, v) координатам без знания коэффициента масштабирования.

8.3 Обратная проекция

Цифровое изображение представлено матрицей пикселей. Поскольку координаты индекса (u, v) не имеют единиц измерения, это означает, что характерные черты изображения описываются скорее качественно, чем количественно. Если мы хотим выразить расстояния в метрических единицах, мы должны знать соотношение между индексными координатами (u, v) и координатами (x_r, y_r, z_r) в трехмерной системе отсчета. Без знания реальных размеров или геометрии сцены невозможно распознать особенности изображения.

8.3.1 Одиночная камера

Предположим, что у нас есть роботизированная система технического зрения с одной камерой. Система имеет изображение рабочего пространства робота в качестве входных данных и требуется для воспроизведения геометрических измерений в качестве выходных данных. Необходимые преобразования между системами координат видны из рис. 8.4.

Предположим, что теперь мы можем распознать точку q на изображении.

Нашей целью является определение координат реальной точки Q по координатам ее изображения q . Это проблема обратной проекции. Чтобы решить эту проблему, мы должны знать, как координаты точки q связаны с координатами реальной точки Q в системе отсчета, что является проблемой прямой проекции.

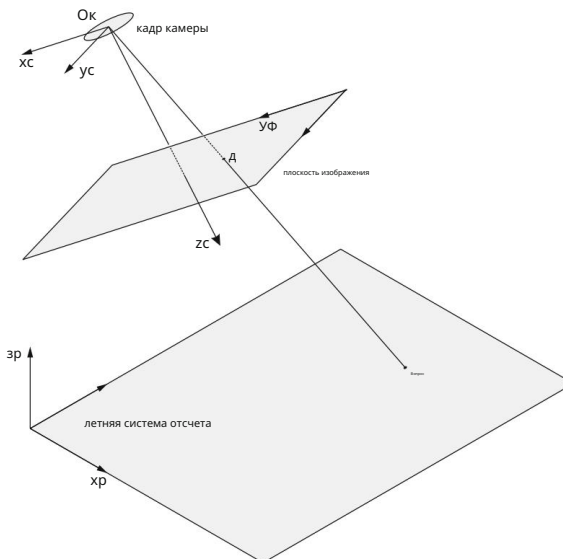


Рис. 8.4 Системы координат в системе технического зрения робота

Сначала решим задачу прямой проекции. Точка Q задается координатами (x_r, y_r, z_r) в системе координат. Мы хотим определить координаты его изображения $q = (u, v)$, выраженные в индексном кадре. Рамка x_c - y_c - z_c прикреплена к камере. Матрица M представляет собой преобразование эталона в кадр камеры.

$$\begin{matrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{matrix} = M \begin{matrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ \text{руб.} \end{matrix} \quad (8.12)$$

Комбинируя уравнения (8.12) и (8.9), получаем

$$\begin{matrix} c \\ b \\ 1 \end{matrix} = PM \begin{matrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ \text{руб.} \end{matrix} \quad (8.13)$$

Соотношение (8.13) описывает прямую проекцию. Элементы матрицы P являются внутренними параметрами камеры, а элементы матрицы M представляют ее внешние параметры. Матрица 3×4

$$H = PM \quad (8.14)$$

называется калибровочной матрицей камеры. Он используется в процессе калибровки для определения как внутренних, так и внешних параметров камеры.

В дальнейшем тексте мы будем рассматривать обратную проекцию. Нашей целью является определение координат (x_r, y_r, z_r) реальной точки Q по известным координатам точки изображения (u, v) и калибровочной матрицы H . Масштабный коэффициент s неизвестен. В (8.13) мы имеем четыре неизвестных s, x_r, y_r, z_r и только три уравнения для одной точки пространства.

Попробуем с тремя точками A, B и C (рис. 8.5). Мы знаем расстояния между этими тремя точками. Их координаты в системе отсчета равны

$$(x_{rj}, y_{rj}, z_{rj}), j = 1, 2, 3.$$

Координаты соответствующих точек изображения

$$(u_j, v_j), j = 1, 2, 3.$$

Прямая проекция может быть записана в следующем виде

$$\begin{matrix} c_j \\ b_j \\ 1 \end{matrix} = H \begin{matrix} x_{rj} \\ y_{rj} \\ z_{rj} \\ 1 \end{matrix} \quad (8.15)$$

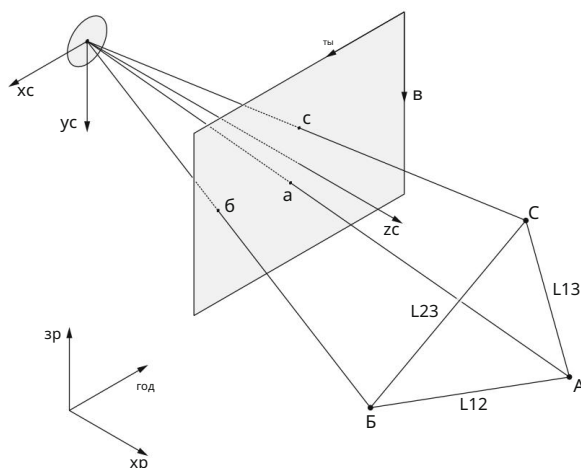


Рис. 8.5 Пример проецирования трех точек

В уравнении (8.15) имеем 12 неизвестных и 9 уравнений. Для решения задачи нам потребуются дополнительные три уравнения. Эти уравнения можно получить из размеров треугольника, представленного точками A, B и C. Обозначим стороны треугольника AB, BC и CA как длины L12, L23 и L31.

$$\begin{aligned} L_{12}^2 &= (x_{r1} - x_{r2})^2 + (y_{r1} - y_{r2})^2 + (z_{r1} - z_{r2})^2 \\ L_{23}^2 &= (x_{r2} - x_{r3})^2 + (y_{r2} - y_{r3})^2 + (z_{r2} - z_{r3})^2 \\ L_{31}^2 &= (x_{r3} - x_{r1})^2 + (y_{r3} - y_{r1})^2 + (z_{r3} - z_{r1})^2. \end{aligned} \quad (8.16)$$

Теперь у нас есть двенадцать уравнений для двенадцати неизвестных. Таким образом, решение обратной задачи существует. Неудобно то, что последние три уравнения нелинейны, что требует компьютера для численного решения уравнений. Этот подход называется обратной проекцией на основе модели.

8.3.2 Стереовидение

Поскольку модель наблюдаемого объекта обычно недоступна или объект изменяется со временем, необходимо найти другие решения проблемы обратной проекции.

Одним из возможных решений является использование стереозрения: зондирование на основе двух камер. Принцип аналогичен человеческому зрительному восприятию, когда изображения, видимые левым и правым глазами, немного различаются из-за параллакса, и мозг использует различия между изображениями для определения расстояния до наблюдаемого объекта.

Для простоты предположим, что две параллельные камеры наблюдают за точкой Q, как показано на рис. 8.6. Точка Q проецируется на плоскость изображения левой и правой камер.

Плоскость изображения левой камеры содержит проекцию q_l с координатами x_l, y_l.

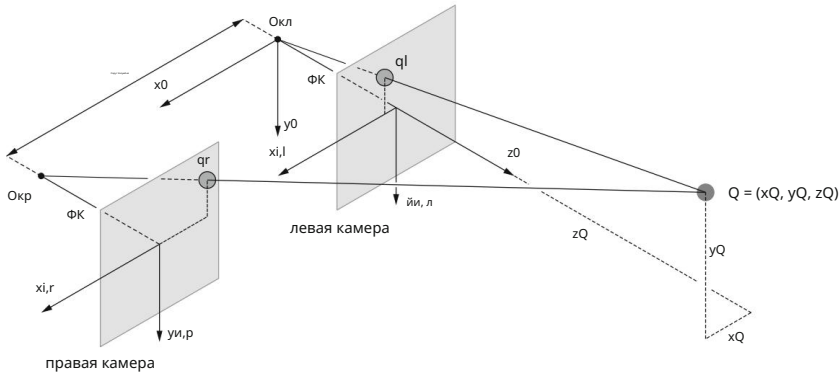


Рис. 8.6 Стереовид точки Q с использованием двух параллельных камер

а плоскость изображения правой камеры содержит проекцию q_R с координатами $x_{i,r}$ и $y_{i,r}$.

Оси системы координат $x_0-y_0-z_0$ имеют те же направления, что и система координат левой камеры.

На рис. 8.7а показан вид сверху, а на рис. 8.7б показан вид сбоку ситуации, показанной на рис. 8.6. Эти представления помогут нам вычислить координаты точки Q. Из геометрии на рис. 8.7а мы можем извлечь следующие соотношения (расстояния x_Q , y_Q и z_Q относительно системы координат $x_0-y_0-z_0$)

$$\frac{z_Q}{\Phi_K} = \frac{x_Q}{x_{i,l}} \quad (8.17)$$

$$\frac{z_Q}{\Phi_K} = \frac{x_Q + dc}{x_{i,r}},$$

где dc — расстояние между камерами. Из первого уравнения (8.17) выразим

$$x_Q = z_Q \frac{x_{i,l}}{f_c} \quad (8.18)$$

и подставляем во второе уравнение, чтобы получить

$$\frac{x_{i,l} z_Q}{x_{i,r} f_c} = \frac{z_Q}{\Phi_K} = \frac{z_Q}{x_{i,r}}. \quad (8.19)$$

Затем мы можем определить расстояние z_Q до точки Q как

$$z_Q = x_{i,l} \frac{\Phi_K d_K}{x_{i,r}}. \quad (8.20)$$

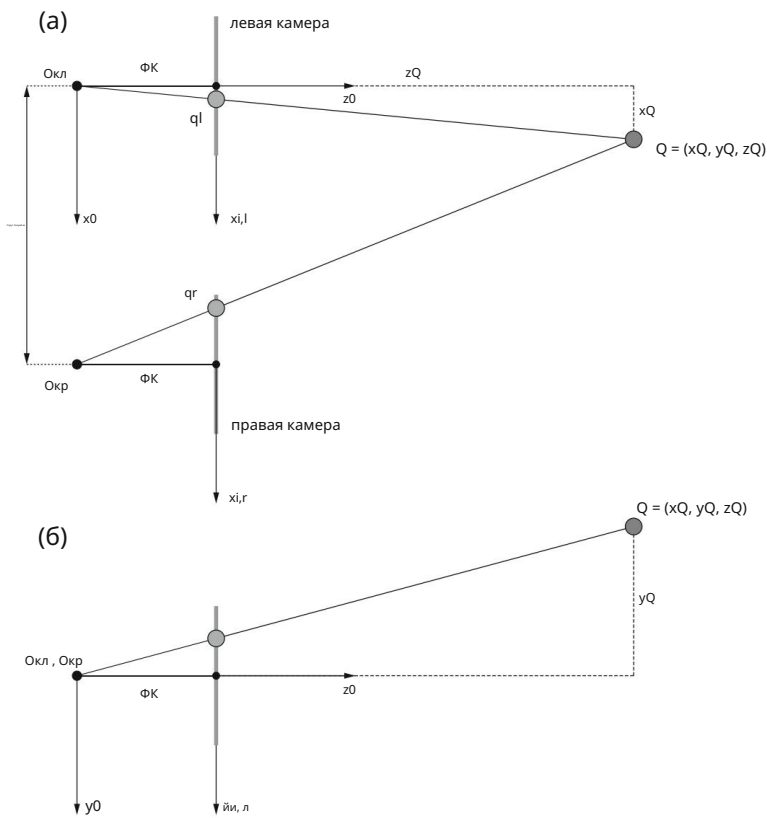


Рис. 8.7 Проекция точки Q на плоскости левой и правой камер. На верхнем рисунке а показан вид на обе камеры сверху, а на нижнем рисунке б показан вид камер сбоку.

Расстояние x_Q можно определить из уравнения (8.18). Для определения расстояния y_Q обратимся к рис. 8.76. Из геометрии мы можем извлечь соотношение

$$\frac{z_Q}{ФК} = \frac{y_Q}{y_{i,l}}, \tag{8.21}$$

позволяя нам вычислить оставшуюся координату

$$y_Q = z_Q \cdot \frac{y_{i,l}}{ФК} \tag{8.22}$$

Использование двух камер позволяет вычислить положение (и ориентацию) объекта. объект в космосе без точной модели объекта.

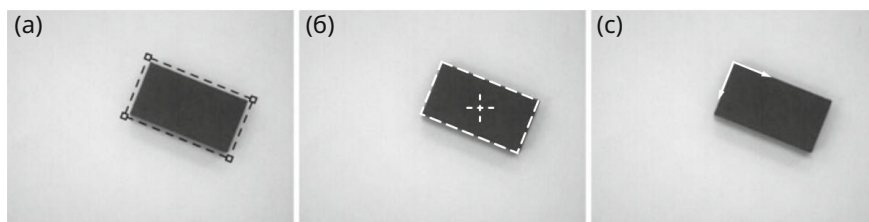


Рис. 8.8 а Определение модели, б признаки распознанного объекта, в обнаруженный объект

8.4 Обработка изображений

В отличие от большинства других сенсорных систем, зрительные системы предоставляют очень обширную информацию, которая требует сложных алгоритмов обработки, прежде чем ее можно будет использовать для управления роботом. Целью обработки изображений является получение числовой информации из изображения, которая обеспечивает надежное описание объекта на сцене. Пример результата обработки изображения показан на рис. 8.8. Объект сначала идентифицируется в сцене, а затем определяется его положение, отмеченное координатной рамкой.

Обработка изображений выходит за рамки этой книги и не будет здесь подробно рассматриваться.

8.5 Поза объекта на изображении

Чтобы управлять роботом относительно интересующего объекта, необходимо определить положение объекта относительно системы координат робота $x-y-z$. Как показано на рис. 8.8, положение объекта известно в системе координат изображения после обработки изображения. Чтобы определить его положение в кадре робота, необходимо определить преобразование между изображением и кадром координат робота, что является результатом калибровки камеры. На рис. 8.9 представлен простой подход к задаче калибровки, когда плоскость изображения параллельна горизонтальной плоскости. Для простоты кадр изображения $x_i-y_i-z_i$ расположен в той же точке, что и индексный кадр $u-v$ (ось z_i добавлена к кадру изображения, чтобы подчеркнуть вращение вокруг вертикальной оси).

8.5.1 Калибровка камеры

Камера устанавливается в фиксированном положении над рабочим пространством робота. Калибровка выполняется с помощью калибровочного шаблона (шахматная доска) и калибровочного наконечника на концевом эффекторе робота. Шаблон калибровки можно дополнить реперным маркером, который появляется на изображении для использования в качестве точки отсчета или меры. Цель процедуры калибровки — найти матрицу преобразования H_i между изобр

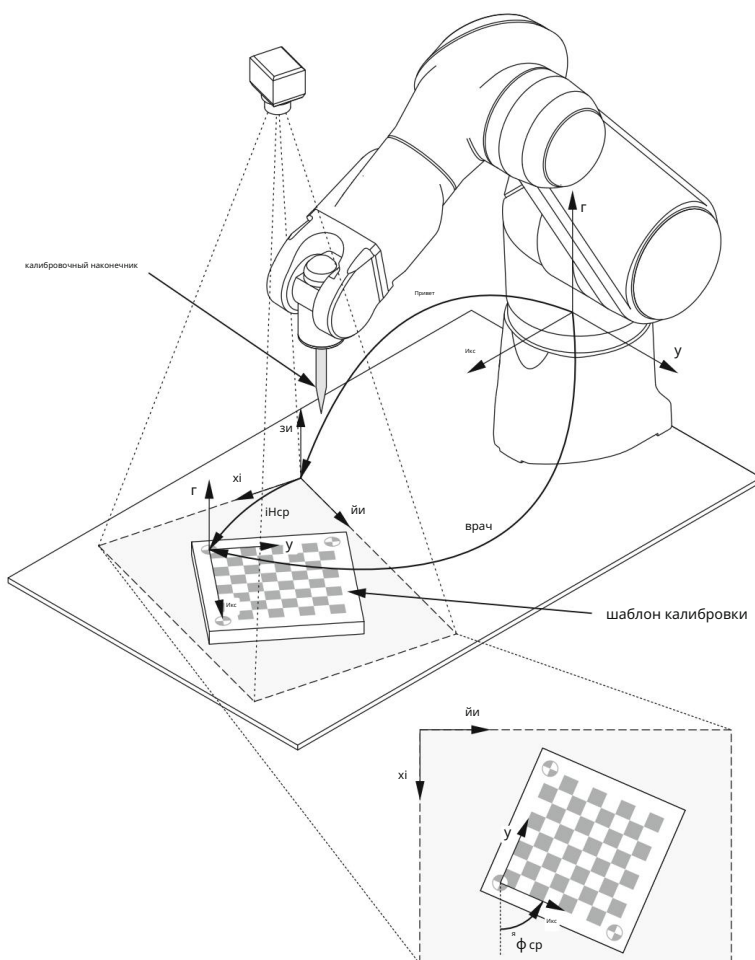


Рис. 8.9 Преобразования, используемые для калибровки камеры

системы координат робота $x_i-y_i-z_i$ и $x-y-z$. На основании соотношений на рис. 8.9 можно записать следующее равенство

$$H_{ср} = \text{Привет } iH_{ср}, \quad (8.23)$$

где $H_{ср}$ и $iH_{ср}$ — положения калибровочного шаблона, выраженные в системе координат робота и изображения соответственно.

Положение калибровочного шаблона iH_{cp} , выраженное в системе координат изображения $x_i - y_i - z_i$, является результатом обработки изображения

$$iH_{cp} = \begin{pmatrix} \cos i\varphi_{cp} & \sin i\varphi_{cp} & 0 & x_{cp} \\ \sin i\varphi_{cp} & \cos i\varphi_{cp} & 0 & y_{cp} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8.24)$$

где $i\varphi_{cp}$ и $i\varphi_{cp}$, y_{cp} — ориентация и положение шаблона калибровки. (относительно плоскости изображения соответственно. Положение выражается в метрических единицах как

$$\begin{pmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x_{кп} \\ y_{кп} \end{pmatrix}, \quad (8.25)$$

где (x_{cp}, y_{cp}) — координаты начала градуировочного шаблона в пикселях, а λ — отношение между положением, выраженным в метрических единицах, и пикселями на изображении (отношение может быть получено из градуировочного шаблона с известным размером черного и белого полей). Матрица iH_{cp} представляет собой поворот вокруг оси z_i и перемещение по осям x_i и y_i системы координат изображения.

Положение калибровочного шаблона H_{cp} , выраженное в системе координат робота $x - y - z$, можно определить с помощью калибровочного наконечника на концевом эффекторе робота и точек калибровки, отмеченных на калибровочном шаблоне. Поместив калибровочный наконечник в точку калибровки, записав координаты рабочего органа робота и повторив процедуру для трех точек калибровки, можно получить набор координат, который позволяет определить положение шаблона калибровки относительно системы координат робота как

$$H_{пу} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{cp} & \sin \varphi_{cp} & 0 & x_{cp} \\ \sin \varphi_{cp} & \cos \varphi_{cp} & 0 & y_{cp} \\ 0 & 0 & 1 & z_{cp} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8.26)$$

где φ_{cp} и (x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}) — ориентация и положение калибровочного шаблона относительно рамы робота соответственно.

Из уравнений (8.23), (8.24) и (8.26) матрица преобразования между изображением и системы координат робота можно получить как

$$H_i = H_{cp} iH_{cp}^{-1} \quad (8.27)$$

8.5.2 Поза объекта

При известном H_i можно определить положение объекта H_o относительно системы координат робота, как показано на рис. 8.10.

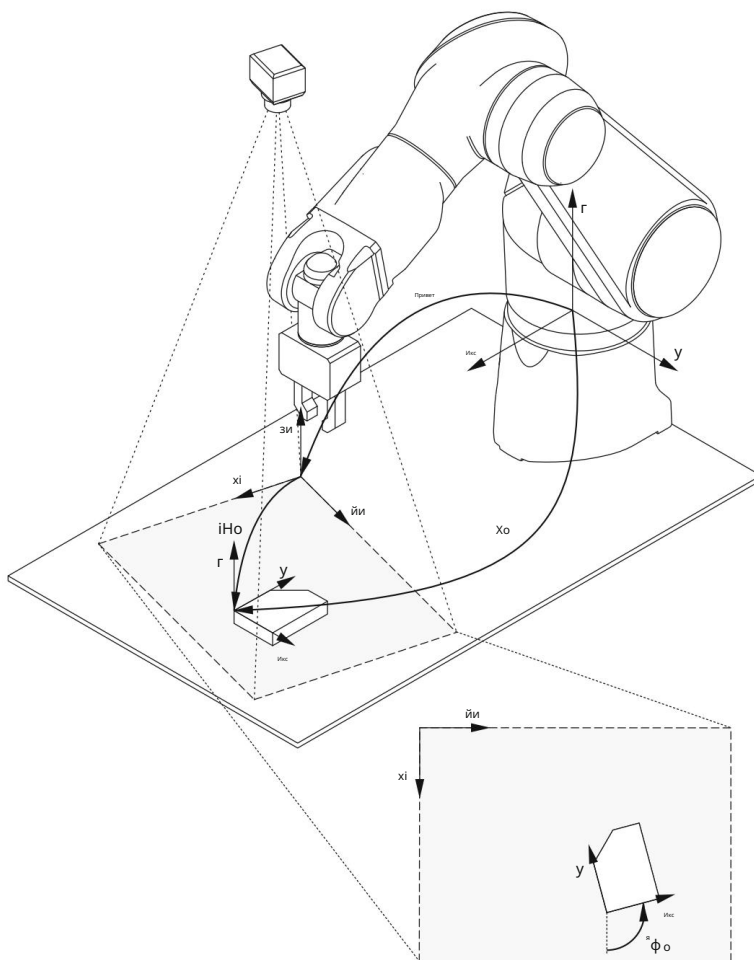


Рис. 8.10 Преобразования, используемые для вычисления позы объекта

Положение объекта iHo , выраженное в системе координат изображения $x_i-y_i-z_i$, является результатом обработки изображения

$$iHo = \begin{pmatrix} \cos \varphi_o & \sin \varphi_o & 0 \\ 0 & \sin \varphi_o & \cos \varphi_o \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix}, \quad (8.28)$$

или x_0 ,
 где ϕ и θ (плоскость xy) — ориентация и положение объекта относительно
 изображения соответственно. Положение выражается в метрических единицах как

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}, \quad (8.29)$$

где (x_c, y_c) — координаты начала координат объекта в пикселях.

Наконец, λ можно определить как

$$\lambda = \frac{x_0}{x_c} = \frac{y_0}{y_c}. \quad (8.30)$$

Глава 9

Планирование траектории



В предыдущих главах мы изучали математические модели механизмов роботов. В первую очередь нас интересовала кинематика и динамика робота. Прежде чем применять эти знания к управлению роботом, мы должны ознакомиться с планированием движения робота. Целью планирования траектории является создание эталонных входных данных для системы управления роботом, которые гарантируют, что рабочий орган робота будет следовать желаемой траектории.

Движение робота обычно задается в прямоугольной системе мировых координат, помещенной в наиболее удобное для выполнения задачи робота рабочее пространство. В простейшей задаче мы определяем только начальную и конечную точки рабочего органа робота. Затем инверсная кинематическая модель используется для расчета переменных сустава, соответствующих желаемому положению рабочего органа робота.

9.1 Интерполяция траектории между двумя точками

При перемещении между двумя точками робот-манипулятор должен перемещаться из начальной в конечную точку за заданный интервал времени t_f . Часто нас не интересует точная траектория между двумя точками. Тем не менее, мы должны определить ход движения во времени для каждой совместной переменной и подать расчетную траекторию на управляющий вход.

Совместная переменная представляет собой либо угол θ для вращательного, либо смещение d для поступательного сустава. При рассмотрении интерполяции траектории мы не будем различать вращательные и поступательные шарниры, поэтому переменную шарнира будем обозначать в более общем виде как q . При перемещении промышленных манипуляторов между двумя точками чаще всего выбирают так называемый трапециевидный профиль скорости. Движение робота начинается в момент времени $t = 0$ с постоянным ускорением, затем следует фаза постоянной скорости и завершается фаза постоянного торможения (рис. 9.1).

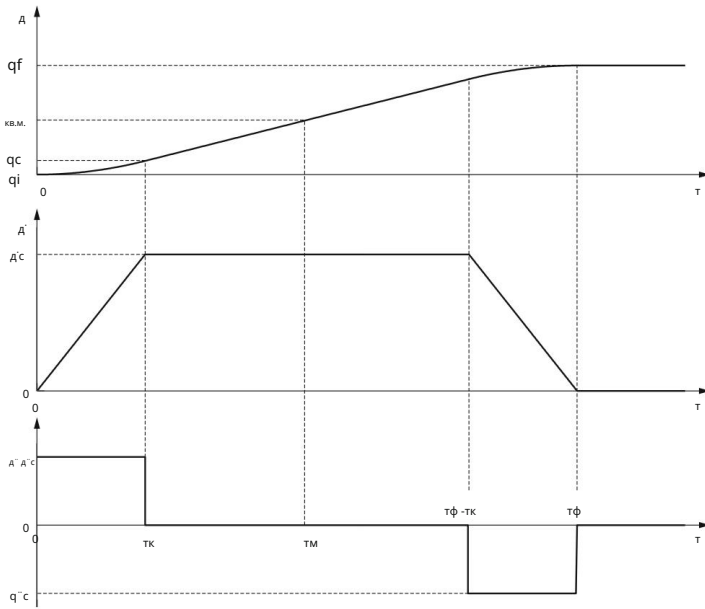


Рис. 9.1 Зависимость совместных переменных от времени с трапециевидным профилем скорости

Результирующая траектория либо угла сустава, либо смещения состоит из центрального линейного отрезка, который начинается и заканчивается параболическим отрезком. Начальная и конечная скорости движения между двумя точками равны нулю. Длительность фазы постоянного ускорения равна интервалу с постоянным торможением. В обеих фазах величина ускорения равна q''_c . Таким образом, мы имеем дело с симметричной траекторией, где

$$q_{вм} = \frac{\Delta \phi + \psi_i}{2} \quad \text{в момент } t_m = \frac{t_f}{2}. \quad (9.1)$$

Траектория $q(t)$ должна удовлетворять ряду ограничений, чтобы сустав робота перемещался из начальной точки q_i в конечную точку q_f за требуемый интервал времени. Скорость в конце начальной параболической фазы должна быть равна постоянной t_f скорости в линейной фазе. Скорость в первой фазе находится из уравнения, описывающего движение с постоянным ускорением

$$\dot{q}' = q''_c t. \quad (9.2)$$

В конце первого этапа имеем

$$\dot{q}'_c = q''_c t_c. \quad (9.3)$$

Скорость во второй фазе можно определить с помощью рис. 9.1.

$$\dot{q}_c = \frac{d_M - d_K}{t_M - t_c}, \quad (9.4)$$

где q_c представляет собой значение совместной переменной q в конце начальной параболической фазы (т. е. в момент времени t_c). До этого момента происходит движение с постоянным ускорением $\ddot{q}_c$, поэтому скорость определяется уравнением (9.2). Зависимость положения сустава от времени получается путем интегрирования уравнения (9.2)

$$q \dot{q} dt = \ddot{q}_c dt = \ddot{q}_c q = \frac{\tau^2}{2} + C_1, \quad (9.5)$$

где начальное положение шарнира q_i принимается за постоянную интегрирования. В конце первого этапа имеем

$$C_1 = C_1 + \frac{1}{2} \ddot{q}_c t_c^2. \quad (9.6)$$

Скорость в конце первой фазы (9.3) равна постоянной скорости во второй фазе (9.4)

$$\ddot{q}_c t_c = \frac{q_M - q_c}{t_M - t_c}. \quad (9.7)$$

Вставив уравнение (9.6) в уравнение (9.7) и учитывая выражение (9.1), получаем после перестановки следующее квадратное уравнение

$$\ddot{q}_c t_c^2 - \ddot{q}_c t_c f + q_f - q_i = 0. \quad (9.8)$$

Ускорение $\ddot{q}_c$ определяется выбранным приводом и динамическими свойствами механизма робота. Для выбранных q_i , q_f , $\ddot{q}_c$ и t_f интервал времени t_c равен

$$t_c = \frac{t_f}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{t_f^2 \ddot{q}_c}{\phi} - \frac{4(q_f - q_i)}{\ddot{q}_c}}. \quad (9.9)$$

Чтобы сгенерировать движение между начальным q_i и конечным положением q_f , в первой фазе должен быть сгенерирован следующий полином

$$q(t) = q_i + \ddot{q}_c t^2 \quad 0 \leq t \leq t_c. \quad (9.10)$$

На втором этапе необходимо создать линейную траекторию, начинающуюся в точке (t_c, q_c) , с наклоном $\dot{q}_c$

$$(q - q_c) = \dot{q}_c (t - t_c). \quad (9.11)$$

После перестановки получаем

$$t_c q(t) = q_i + \ddot{q} q t_c (t - t_f)^2 \quad \text{---} \quad t_c < t - (t_f - t_c). \quad (9.12)$$

В последней фазе параболическая траектория должна быть сгенерирована аналогично первой фазе, только теперь крайняя точка находится в (t_f, q_f) , а кривая перевернута вверх дном.

$$1 \quad q(t) = q_f - \ddot{q} (t - t_f)^2 \quad \text{---} \quad (t_f - t_c) < t - t_f. \quad (9.13)$$

Таким образом, мы получили аналитически временную зависимость угла или смещения вращательного или поступательного сустава, перемещающегося из точки в точку.

9.2 Интерполяция с использованием промежуточных точек

В некоторых роботизированных задачах необходимы более сложные движения исполнительного органа, чем движения от точки к точке. Например, при сварке необходимо следить за криволинейными поверхностями объектов. Такие траектории можно получить, задав, кроме начальной и конечной точки, еще и так называемые промежуточные точки, через которые должен двигаться рабочий орган робота.

В этой главе мы проанализируем задачу, где мы хотим интерполировать траекторию через n через точки $\{q_1, \dots, q_n\}$, которые робот должен пройти за интервалы времени $\{t_1, \dots, t_n\}$. Интерполяция будет производиться с помощью трапецевидных профилей скорости. Траектория будет состоять из последовательности линейных отрезков, описывающих движения между двумя промежуточными точками, и параболических отрезков, представляющих переходы через промежуточные точки. Чтобы избежать разрыва первой производной в момент t_k , траектория $q(t)$ должна иметь параболический ход в окрестности q_k . При этом вторая производная в точке q_k (ускорение) остается разрывной.

Интерполированная траектория, определяемая как последовательность линейных функций с параболическими переходами через промежуточные точки (время перехода t_k), аналитически описывается следующими ограничениями

$$D(t) = \begin{cases} a_{1,k}(t - t_k) + a_{0,k} & t_k + \frac{t_k}{2} \leq t < t_k + 1 - \frac{t_k + 1}{2} \\ b_{2,k}(t - t_k)^2 + b_{1,k}(t - t_k) + b_{0,k} & \frac{t_k}{2} \leq t < t_k + \frac{t_k}{2} \end{cases} \quad (9.14)$$

Коэффициенты $a_{0,k}$ и $a_{1,k}$ определяют линейные участки траектории, где k представляет собой индекс соответствующего линейного участка. Коэффициенты $b_{0,k}$, $b_{1,k}$ и $b_{2,k}$ принадлежат параболическим переходам. Индекс k представляет собой порядковый номер параболического сегмента.

Сначала будут рассчитаны скорости на линейных участках по заданным положениям и соответствующим временным интервалам, как показано на рис. 9.2. Предположим, что начальная и конечная скорости равны нулю. В этом случае у нас есть

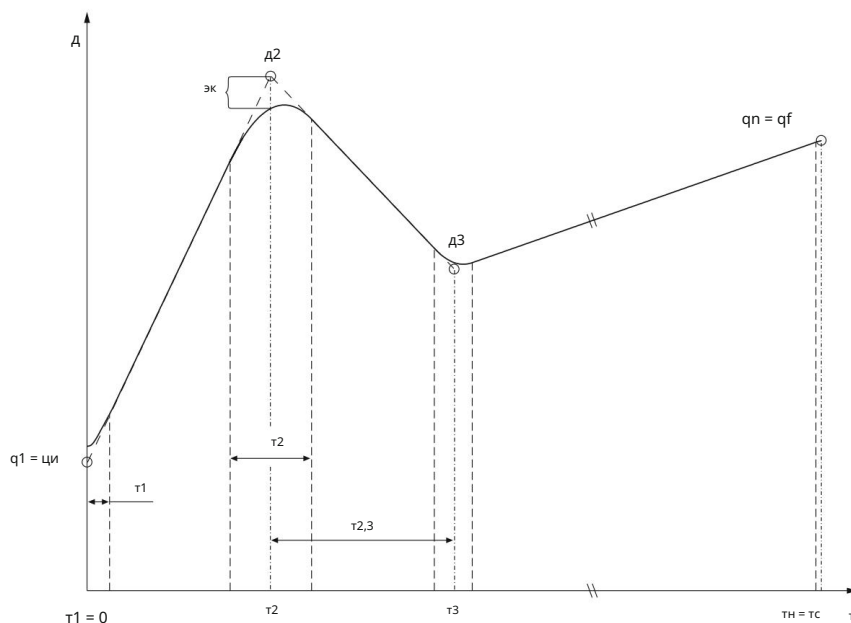


Рис. 9.2 Интерполяция траектории через n по точкам — линейные отрезки с параболическими переходами используются

$$q_k = \begin{cases} 0 & k = 1 \\ \frac{q_k q_{k-1}}{\tau_k - \tau_{k-1}} & k = 2, \dots, n \\ 0 & k = n + 1. \end{cases} \quad (9.15)$$

Далее необходимо определить коэффициенты линейных отрезков $a_{0,k}$ и $a_{1,k}$. коэффициент $a_{0,k}$ можно найти из линейной функции (9.14), учитывая известное положение в момент τ_k , когда сегмент робота приближается к точке q_k

$$q(\tau_k) = q_k = a_{1,k}(\tau_k - \tau_{k-1}) + a_{0,k} = a_{0,k}, \quad (9.16)$$

поэтому

$$a_{0,k} = q_k \quad k = 1, \dots, n. \quad (9.17)$$

Коэффициент $a_{1,k}$ можно определить из производной по времени линейной функции (9.14)

$$q'(t) = a_{1,k}. \quad (9.18)$$

Рассматривая заданные скорости в интервале времени τ_k, τ_{k+1} , получаем

$$a_{1,k} = q_k - q_{k+1} \quad k = 1, \dots, n-1. \quad (9.19)$$

Таким образом определяются коэффициенты линейных участков траектории, и мы можем перейти к коэффициентам параболических функций. Будем считать, что время перехода задано как t_k .

Если время перехода не задано, абсолютное значение ускорения $|\ddot{q}_k|$ в промежуточной точке должно быть сначала определено, а затем вычислено время перехода из ускорений и скоростей до и после промежуточной точки.

В этом случае необходимо определить только знак ускорения, учитывая знак разности скоростей в промежуточной точке.

$$\ddot{q}_k = \text{sign}(\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}) |\ddot{q}_k|, \quad (9.20)$$

где $\text{sign}(\cdot)$ означает знак выражения в скобках. Зная значения ускорений в промежуточных точках и скорости до и после промежуточной точки, вычисляют время движения через промежуточную точку t_k (замедление и ускорение)

$$t_k = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{\ddot{q}_k}. \quad (9.21)$$

Приступим к вычислению коэффициентов квадратичных функций. Требуемая непрерывность скорости при переходе от линейного к параболическому участку траектории в момент времени (t_k) и требуемая скорость $\dot{q}_{k,k+1}$

разностность при переходе от параболического к прямолинейному отрезку в точке $(t_k + t_k)$ представляет собой исходную точку для вычисления коэффициентов $b_{1,k}$ и $b_{2,k}$. Сначала вычислим производную по времени квадратичной функции (9.14)

$$\dot{q}(t) = 2b_{2,k}(t - t_k) + b_{1,k}. \quad (9.22)$$

Полагая, что скорость в момент (t_k) равна $\dot{q}_{k,k+1}$, равно $\dot{q}_{k-1,k}$, а при $(t_k + t_k)$, это можно написать

$$\begin{aligned} \dot{q}_{k-1,k} &= 2b_{2,k} t_k + b_{1,k} = -b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t &= t_k - \frac{t_k}{2} \\ \dot{q}_{k,k+1} &= 2b_{2,k} t_k + b_{1,k} = b_{2,k} t_k + b_{1,k} & t &= t_k + \frac{t_k}{2}. \end{aligned} \quad (9.23)$$

Добавляя уравнение (9.23) коэффициент $b_{1,k}$ можно определить

$$b_{1,k} = \frac{\dot{q}_{k,k+1} + \dot{q}_{k-1,k}}{2}, \quad k = 1, \dots, p \quad (9.24)$$

и вычитая уравнение (9.23) вычисляется коэффициент $b_{2,k}$

$$b_{2,k} = \frac{\dot{q}_{k,k+1} - \dot{q}_{k-1,k}}{2t_k} = \frac{\ddot{q}_k}{2}, \quad k = 1, \dots, p. \quad (9.25)$$

Принимая во внимание непрерывность положения в момент времени $(t_k + \frac{t_k}{2})$, коэффициент $b_{0,k}$ квадратичного полинома, можно вычислить. При $(t_k + \frac{t_k}{2})$, положение $q(t)$, вычисленное по линейной функции

$$t_k + \frac{t_k}{2} = a_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} t_k + a_{0,k} = q_{k,k+1} \frac{t_k}{2} + \frac{t_k}{2} + d_{k,2} \quad (9.26)$$

равно положению $q(t)$, вычисляемому по квадратичной функции

$$\begin{aligned} t_k + \frac{t_k}{2} = b_{2,k} t_k + \frac{t_k^2}{2} + b_{1,k} t_k + \frac{t_k}{2} t_k + b_{0,k} \\ \text{"="} \frac{q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k} t_k}{2} \frac{t_k}{2} + \frac{q'_{k,k+1} + q'_{k-1,k}}{2} \cdot \frac{t_k}{2} + b_{0,k}. \end{aligned} \quad (9.27)$$

Приравнявая (9.26) и (9.27), коэффициент $b_{0,k}$ определяется

$$b_{0,k} = q_k + (q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k}) \frac{t_k}{8}. \quad (9.28)$$

Можно проверить, что рассчитанный коэффициент $b_{0,k}$ обеспечивает также непрерывность положения в момент времени $(t_{k+1/2})$. Такой выбор коэффициента $b_{0,k}$ не позволяет совместной траектории проходить через точку q_k . Робот лишь более или менее приближается к этой точке. Расстояние расчетной траектории от точки отсчета зависит главным образом от интервала времени торможения и ускорения t_k , который задается требуемым ускорением $| \ddot{x}_{kk} |$. Погрешность e_k вычисляемой траектории можно оценить, сравнивая искомое положение q_k с фактическим положением $q(t)$ в момент t_k , которое получается подстановкой t_k в квадратичную функцию (9.14)

$$e_k = q_k - q(t_k) = q_k - b_{0,k} - (q'_{k,k+1} - q'_{k-1,k}) \frac{t_k}{8}. \quad (9.29)$$

Можно заметить, что ошибка e_k равна нулю только тогда, когда скорости линейных отрезков до и после промежуточных точек равны или когда интервал времени t_k равен нулю, что означает бесконечное ускорение (что в действительности невозможно).

Описанный подход к интерполяции траекторий имеет небольшой недостаток. Из уравнения (9.29) можно заметить, что робот не достигает промежуточной точки, а обходит ее. Поскольку начальная и конечная точки траектории также считаются промежуточными точками, в планирование траектории вносится ошибка. В начальной точке траектории фактическое и желаемое положение отличаются на ошибку e_1 (рис. 9.3, кривая блеска показывает траекторию без коррекции), возникающую из уравнения (9.29). Ошибка представляет собой шаг в сигнале положения, что нежелательно в робототехнике. Чтобы избежать этого резкого изменения положения, первая и последняя точки траектории должны обрабатываться отдельно от промежуточных точек.

Требуемые скорости в начальной и конечной точках должны быть равны нулю. Скорость в конце временного интервала t_1 должна быть равна скорости в первом

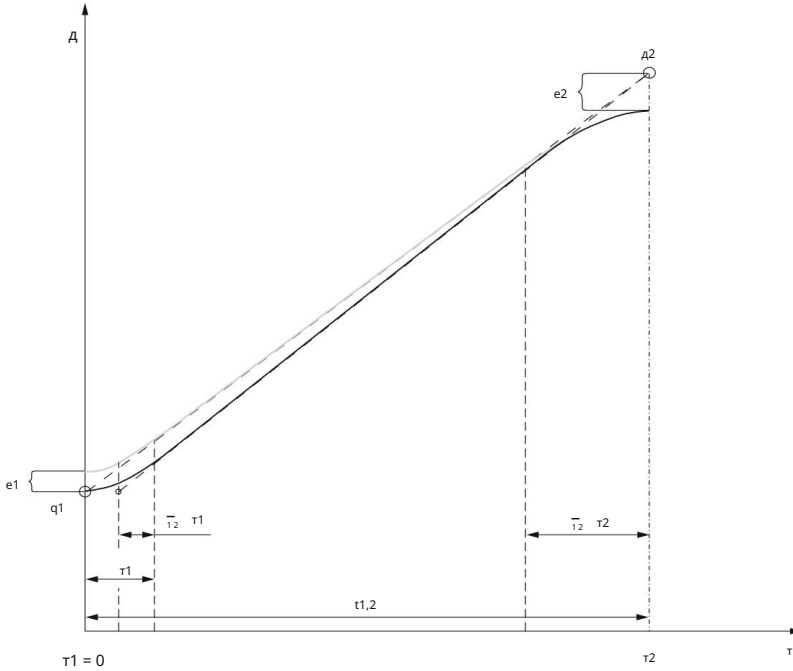


Рис. 9.3 Интерполяция траектории — увеличенное представление первого участка траектории, показанной на рис. 9.2. Светлая кривая представляет траекторию без коррекции, а более темная кривая показывает скорректированную траекторию.

линейный сегмент. Сначала вычисляем скорость в линейной части

$$\dot{q}_{1,2} = \frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2}t_1}. \quad (9.30)$$

Уравнение (9.30) аналогично уравнению (9.15), только то, что $\frac{1}{2}t_1$ теперь в знаменателе вычитается $2t_1$, так как на коротком временном интервале (начало параболического отрезка на рис. 9.3) положение робота изменяется лишь в очень незначительной степени. При этом достигается более высокая скорость на линейном участке траектории. В конце интервала ускорения t_1 имеем

$$\frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1 - \frac{1}{2}t_1} = \ddot{q}_1 t_1 \quad (9.31)$$

Мы должны определить также ускорение $\ddot{q}_1$ в начальной точке траектории. Предполагая, что его абсолютное значение $|\ddot{q}_1|$ было predetermined, только знак должен быть адекватно выбран. Выбор знака будет осуществляться на основе позиционной разницы. В принципе, следует учитывать разницу скоростей.

при определении знака ускорения, однако начальная скорость равна нулю, и поэтому знак может зависеть от разности положений.

$$q''1 = \text{знак}(q2 - q1) | - q1 |. \quad (9.32)$$

Из уравнения (9.31), интервал времени $t1$ вычисляется

$$1 (q2 - q1) = -q1 t1 (t2 - t1)^2 - t1). \quad (9.33)$$

После перестановки получаем

$$+ k - 1 t_1^2 + -q1 (t2 - t1) t1 - (q2 - q1) = 0, \quad (9.34)$$

поэтому интервал времени $t1$ равен

$$t1 = \frac{-q1(t2 - t1) \pm \sqrt{q1^2(t2 - t1)^2 - 2q''1(q2 - q1)}}{-q''1}, \quad (9.35)$$

и после упрощения уравнения. (9.35)

$$t1 = (t2 - t1) - (t2 - t1)^2 \frac{2(q2 - q1)}{q''1}. \quad (9.36)$$

В уравнении B (9.36) перед квадратным корнем выбран знак минус, так как интервал времени $t1$ должен быть меньше, чем $(t2 - t1)$. Из уравнения (9.30) можно вычислить скорость на линейном участке траектории. Как видно из рис. 9.3 (более темная кривая — исправленная траектория), введенная поправка устраняет ошибку в начальном положении.

Аналогично, как и для первого отрезка, поправку необходимо вычислить и для последнего отрезка между точками $qn - 1$ и qn . Скорость на последнем линейном участке равна

$$q'n - 1, n = \frac{qn - qn - 1}{tn - tn - 1} \frac{1}{2tn}. \quad (9.37)$$

В знаменателе уравнения (9.37) было вычтено значение $2tn$, так как непосредственно перед полной остановкой работа его положение меняется очень мало. При переходе из последнего линейного отрезка в последний параболический отрезок скорости равны

$$\frac{qn - qn - 1}{tn - tn - 1} \frac{1}{2tn} = -q'n n. tn \quad (9.38)$$

Ускорение (замедление) последнего параболического сегмента определяется на основе позиционной разницы

$$q''_n = \text{знак}(q_{n-1} - q_n) |q''_n|. \quad (9.39)$$

Подставив приведенное выше уравнение в уравнение (9.38), вычисляем так же, как и для первого параболического сегмента, а также продолжительность последнего параболического сегмента

$$t_n = (t_{n-1} - t_{n-2}) + (t_{n-1} - t_{n-2}) + 2 \frac{(q_n - q_{n-1})}{q''_n}. \quad (9.40)$$

Из уравнения (9.37) можно определить скорость последнего линейного участка. С учетом поправок в начале и в конце траектории ход времени через промежуточные точки. Таким образом, вся траектория была интерполирована в n точках.

Глава 10

Управление роботом



Проблема управления роботом может быть объяснена как вычисление сил или крутящих моментов, которые должны создаваться исполнительными механизмами для успешного выполнения задачи робота. Соответствующие условия труда должны быть обеспечены как в переходный период, так и в стационарном состоянии. Задача робота может быть представлена либо как выполнение движений в свободном пространстве, где осуществляется управление положением, либо в контакте с окружающей средой, где требуется управление контактной силой. Сначала мы изучим управление положением механизма робота, который не находится в контакте с окружающей средой. Затем, в дальнейшем тексте, мы модернизируем управление положением с помощью управления силой.

Проблема управления роботом не уникальна. Существуют различные методы, отличающиеся своей сложностью и эффективностью действий робота. Выбор метода управления зависит от задачи робота. Важным отличием является, например, задача, в которой рабочий орган робота должен точно следовать заданной траектории (например, лазерная сварка), и другой задачей, в которой требуется только, чтобы рабочий орган робота достиг нужного конечного положения, при этом детали траектории между начальной и конечной точкой не важны (например, укладка на поддоны). Механическая структура механизма робота также влияет на выбор соответствующего метода управления. Управление декартовым роботом-манипулятором в целом отличается от управления антропоморфным роботом.

Управление роботом обычно происходит в мировой системе координат, которая задается пользователем и называется также системой координат задачи робота. Вместо мировой системы координат мы часто используем более короткое выражение, а именно внешние координаты. Нас преимущественно интересует поза рабочего органа робота, выраженная во внешних координатах и редко в положениях суставов, которые также называются внутренними координатами. Тем не менее, мы должны осознавать, что во всех случаях мы напрямую контролируем внутренние координаты (т. е. суставные углы или смещения). Положение рабочего органа контролируется только косвенно. Он определяется кинематической моделью механизма робота и заданными значениями внутренних координат.

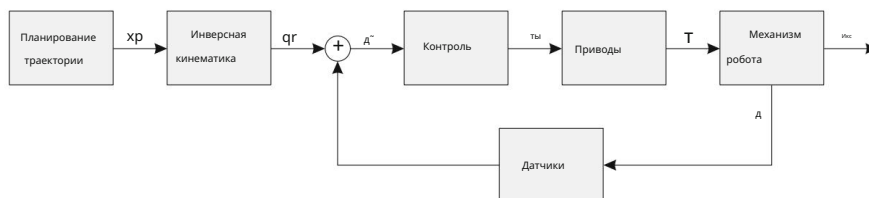


Рис. 10.1 Общая система управления роботом

На рис. 10.1 показана общая система управления роботом. Входными данными для системы управления является желаемое положение рабочего органа робота, которое получается с помощью методов интерполяции траектории, представленных в предыдущей главе. Переменная x_r представляет желаемое (т. е. эталонное положение) рабочего органа робота. Вектор x , описывающий фактическое положение рабочего органа робота, обычно содержит шесть переменных. Три из них определяют положение конечной точки робота, а остальные три определяют ориентацию рабочего органа робота. Таким образом, мы пишем $x = x_{uz} \varphi \psi T$.

Положение исполнительного органа робота определяется вектором от начала мировой системы координат до конечной точки робота. Ориентация концевой эффектора может быть представлена различными способами. Одним из возможных описаний является так называемая нотация RPY, пришедшая из авиации и показанная на рис. 4.4. Ориентация определяется углом φ вокруг оси z (Roll), углом ϑ вокруг оси y (Pitch) и углом ψ вокруг оси x (Yaw).

С помощью алгоритма инверсной кинематики рассчитываются внутренние координаты q_r , соответствующие желаемому положению рабочего органа. Переменная q_r представляет положение сустава (т. е. угол ϑ для вращательного сустава и расстояние d для поступательного сустава). Желаемые внутренние координаты сравниваются с фактическими внутренними координатами в системе управления роботом. На основе позиционной ошибки $\tilde{q} = q_r - q$ вычисляется выход системы управления u . Выходной сигнал u преобразуется из цифрового в аналоговый сигнал, усиливается и подается на приводы робота. Приводы обеспечивают силы или крутящие моменты, необходимые для требуемого движения робота. Движение робота оценивают датчики, которые были описаны в главе, посвященной датчикам роботов.

10.1 Управление роботом во внутренних координатах

Простейший подход к управлению роботом основан на контроллерах, в которых контур управления замыкается отдельно для каждой конкретной степени свободы. Такие регуляторы пригодны для управления независимыми системами второго порядка с постоянными инерционными и демпфирующими параметрами. Этот подход менее подходит для робототехнических систем, характеризующихся нелинейным и изменяющимся во времени поведением.

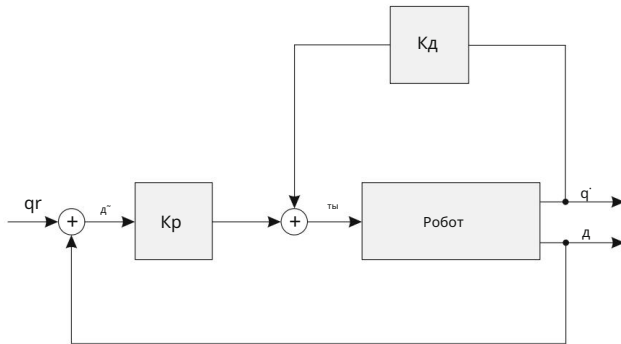


Рис. 10.2 Управление положением ПД с высоким демпфированием

10.1.1 PD-управление положением

Сначала будет проанализирован простой пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор. Базовая схема управления показана на рис. 10.2. Управление основано на вычислении позиционной ошибки и определении параметров управления, позволяющих уменьшить или подавить ошибку. Позиционная ошибка уменьшается для каждого шарнира отдельно, а значит, нужно разработать столько регуляторов, сколько степеней свободы. Исходные положения q_r сравниваются с фактическими положениями шарниров робота q .

$$\tilde{q} = q_r - q. \quad (10.1)$$

Позиционная ошибка $\tilde{q}$ усиливается пропорциональным усилением положения K_p . Так как робот-манипулятор имеет несколько степеней свободы, ошибка $\tilde{q}$ выражается в виде вектора, а K_p представляет собой диагональную матрицу коэффициентов усиления всех совместных регуляторов. Рассчитанный управляющий сигнал провоцирует движение робота в сторону уменьшения позиционной ошибки. Поскольку приведение в действие двигателей робота пропорционально ошибке, может случиться так, что робот не остановится в нужном положении, а промахнется. Такие перерегулирования не допускаются в робототехнике, так как могут привести к столкновениям с объектами в непосредственной близости от робота. Для обеспечения безопасных и устойчивых действий робота вводится замкнутый контур скорости с отрицательным знаком. Замкнутый контур скорости обеспечивает демпфирование системы. Она представлена фактическими скоростями суставов $\dot{q}$, умноженными на диагональную матрицу демпфирования. Закон управления можно записать в следующем виде

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q}, \quad (10.2)$$

где u представляет управляющие воздействия (т. е. объединенные силы или крутящие моменты), которые должны обеспечиваться исполнительными механизмами. Из уравнения (10.2) можно заметить, что при более высоких скоростях движений робота контур управления скоростью снижает срабатывание сустава и, демпфируя систему, обеспечивает устойчивость робота.

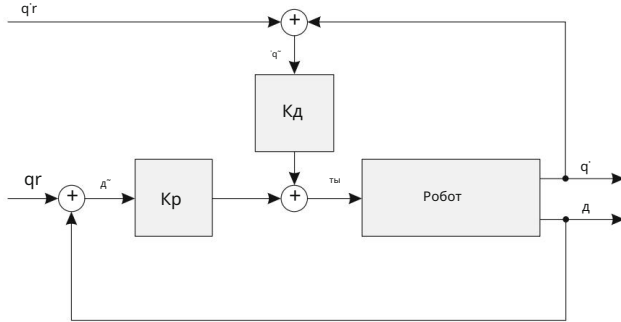


Рис. 10.3 Управление положением ПД

Способ управления, показанный на рис. 10.2, обеспечивает высокое демпфирование системы на самом быстром участке траектории, что обычно не требуется. Такого поведения контроллера можно избежать, модернизировав ПД-контроллер с эталонным сигналом скорости. Этот сигнал получается как числовая производная желаемого положения.

Ошибка скорости используется как управляющий вход

$$\ddot{q} = \dot{q}'r - \dot{q}'. \quad (10.3)$$

Алгоритм управления, показанный на рис. 10.3, можно записать в виде

$$u = K_p(qr - q') + K_d(\dot{q}'r - \dot{q}'). \quad (10.4)$$

Поскольку разница между эталонными скоростями $\dot{q}'r$ и $\dot{q}'$ используется вместо общей скорости $\dot{q}'$, эффект демпфирования уменьшается. Для положительной разницы контур управления может даже ускорить движение робота.

Синтез регулятора положения ПД заключается в определении матриц K_p и K_d .

Для быстрого отклика коэффициент усиления K_p должен быть высоким. При правильном выборе коэффициента усиления K_d достигается критическое демпфирование систем робота. Критическое демпфирование обеспечивает быструю реакцию без перерегулирования. Такие контроллеры нужно строить для каждого сустава отдельно. Поведение каждого контроллера совершенно не зависит от контроллеров, принадлежащих другим соединениям механизма робота.

10.1.2 PD-управление положением с компенсацией силы тяжести

В главе о динамике роботов мы обнаружили, что механизм робота находится под действием инерционных, кориолисовых, центробежных и гравитационных сил (5.56). В общем случае силы трения, возникающие в суставах робота, также должны быть включены в динамическую модель робота. В несколько упрощенной модели будет учитываться только вязкое трение, пропорциональное скорости соединения (F_v — диагональная матрица

коэффициент трения в суставах). Перечисленные силы должны преодолеваются исполнительными механизмами робота, что видно из следующего уравнения, аналогичного уравнению (5.56)

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + g(q) = \tau. \quad (10.5)$$

При разработке ПД-контроллера мы не обращали внимания на специфические силы, воздействующие на механизм робота. Контроллер робота рассчитывал необходимые усилия срабатывания исключительно на основе разницы между желаемым и фактическим положением сустава. Такой контроллер не может предсказать силу, необходимую для создания желаемого движения робота. Поскольку сила вычисляется из позиционной ошибки, это означает, что в общем случае ошибка никогда не равна нулю. Зная динамическую модель робота, мы можем предсказать силы, необходимые для выполнения конкретного движения робота. Затем эти силы генерируются двигателями робота независимо от сигнала позиционной ошибки.

В квазистатических условиях, когда робот стоит на месте или движется медленно, можно считать нулевыми ускорения $\ddot{q} = 0$ и скорости $\dot{q} = 0$. Динамическая модель робота упрощается следующим образом

$$\tau = g(q). \quad (10.6)$$

Согласно уравнению (10.6), двигатели роботов должны, прежде всего, компенсировать эффект гравитации. Модель гравитационных эффектов $\hat{g}(q)$ (окружность обозначает модель робота), которая является хорошей аппроксимацией реальных гравитационных сил $g(q)$, может быть реализована в алгоритме управления, показанном на рис. 10.4. Контроллер PD, показанный на рис. 10.2, был модернизирован дополнительным контуром управления, который вычисляет гравитационные силы из фактического положения робота и напрямую добавляет их к выходным данным контроллера. Алгоритм управления, показанный на рис. 10.4, можно записать следующим образом

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q} + \hat{g}(q). \quad (10.7)$$

Вводя гравитационную компенсацию, бремя уменьшения ошибок, вызванных гравитацией, снимается с ПД-контроллера. Таким образом, ошибки в отслеживании траектории значительно уменьшаются.

10.1.3 Управление роботом на основе обратной динамики

При изучении ПД-регулятора с гравитационной компенсацией мы исследовали динамическую модель робота с целью повышения эффективности метода управления. При использовании метода управления, основанного на обратной динамике, эта концепция получит дальнейшее развитие. Из уравнений, описывающих динамическое поведение двухсегментного робота-манипулятора (5.56), ясно видно, что модель робота нелинейна. Поэтому линейный контроллер, такой как PD-контроллер, не лучший выбор.

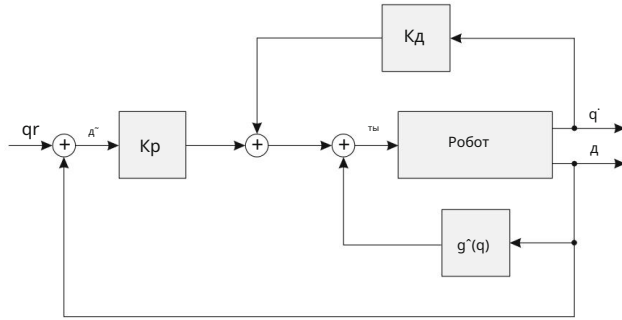


Рис. 10.4 Управление ЧР с компенсацией силы тяжести

Мы получим новую схему управления из описанной динамической модели робота. по уравнению (10.5). Предположим, что моменты τ , создаваемые двигателями, равны к управляющим выходам u . Уравнение (10.5) можно переписать

$$B(q)q'' + C(q, q')q' + Fvq' + g(q) = u. \quad (10.8)$$

На следующем шаге мы определим прямую динамическую модель робота, которая описывает движения робота под действием заданных моментов в суставах. Сначала мы выражаем ускорение q'' из уравнения (10.8)

$$q'' = B^{-1}(q)(u - (C(q, q')q' + Fvq' + g(q))). \quad (10.9)$$

Интегрируя ускорение с учетом начального значения скорости, получена скорость движения робота. Интегрируя скорость, принимая с учетом начального положения вычисляем фактические положения в суставах робота. Прямая динамическая модель механизма робота представлена на рис. 10.5.

Для упрощения динамических уравнений определим новую переменную $n(q, q')$, включая все динамические компоненты, кроме инерционной

$$n(q, q') = C(q, q')q' + Fvq' + g(q). \quad (10.10)$$

Динамическая модель робота может быть описана следующим более коротким уравнением

$$B(q)q'' + n(q, q') = \tau. \quad (10.11)$$

Таким же образом уравнение (10.9) также можно записать в более короткой форме

$$q'' = B^{-1}(q)(u - n(q, q')). \quad (10.12)$$

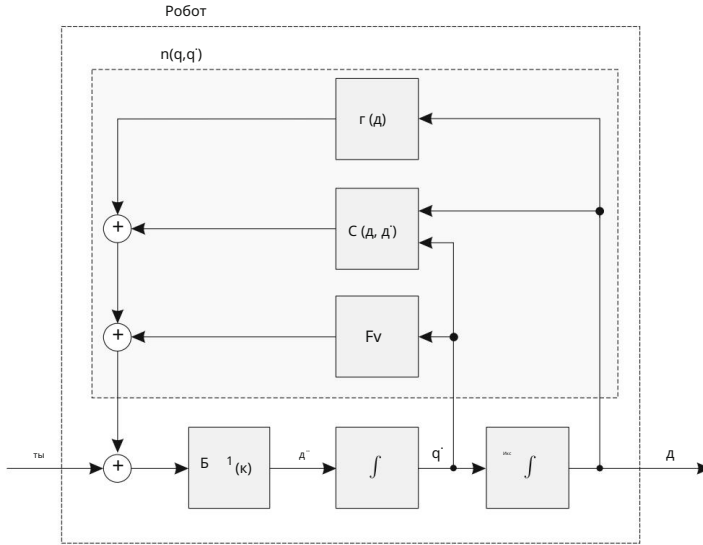


Рис. 10.5 Прямая динамическая модель механизма робота

Предположим, что известна динамическая модель робота. Инерционная матрица $\hat{B}(q)$ является аппроксимацией реальных значений $B(q)$, тогда как $\hat{n}(q, q')$ представляет собой аппроксимацию $n(q, q')$, следующим образом

$$\hat{n}(q, q') = C(q, q')q' + F^v vq' + g(q). \quad (10.13)$$

Выход контроллера u определяется следующим уравнением

$$u = \hat{B}(q)y + \hat{n}(q, q'), \quad (10.14)$$

где использовалась приближенная обратная динамическая модель робота. Система, объединяющая уравнения (10.12) и (10.14), показан на рис. 10.6.

Предположим эквивалентность $\hat{B}(q) = B(q)$ и $\hat{n}(q, q') = n(q, q')$. На рис. 10.6 мы видим, что сигналы $\hat{n}(q, q')$ и $n(q, q')$ вычитаются, так как один представлен с положительным, а другой с отрицательным знаком. Аналогично произведение матриц $\hat{B}(q)$ и $B^{-1}(q)$ приводит к единичной матрице, которую можно опустить. Упрощенная система показана на рис. 10.7. Реализуя обратную динамику (10.14), система управления линеаризуется, так как между входом u и выходом q имеется только два интегратора. Система не только линейна, но и несвязана (например, первый элемент вектора u влияет только на первый элемент вектора положения q).

Из рис. 10.7 также нетрудно понять, что переменная u имеет характеристики ускорения, поэтому

$$y = q''. \quad (10.15)$$

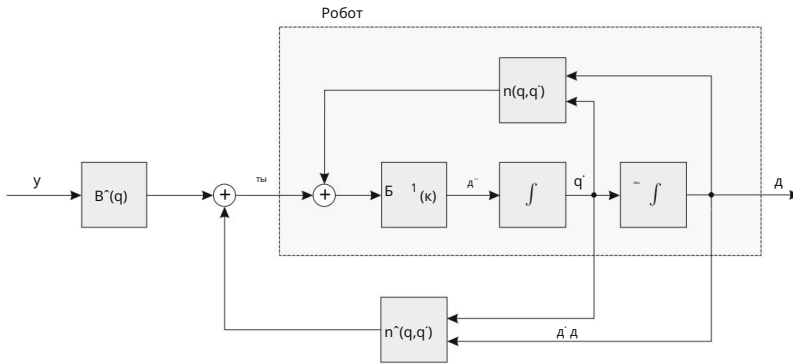


Рис. 10.6 Линеаризация системы управления путем реализации обратной динамической модели

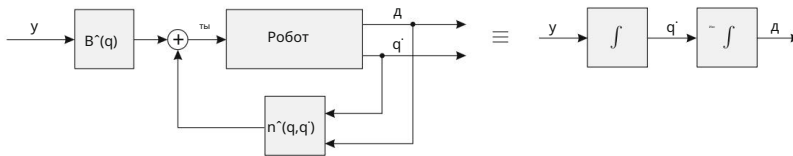


Рис. 10.7 Линеаризованная система

В идеальном случае достаточно определить желаемые ускорения суставов как вторые производные от желаемых положений суставов, и система управления будет отслеживать заданные траектории суставов. Поскольку у нас никогда не будет полностью точной динамической модели робота, разница между желаемым и фактическим положением суставов всегда будет возникать и будет увеличиваться со временем. Позиционная ошибка определяется

$$\ddot{q}^* = \ddot{q}_r - \ddot{q}, \quad (10.16)$$

где $\ddot{q}_r$ представляет желаемое положение робота. Аналогичным образом можно определить и погрешность скорости как разницу между желаемой и фактической скоростью.

$$\dot{q}^* = \dot{q}_r - \dot{q}. \quad (10.17)$$

Вектор y , имеющий характеристики ускорения, теперь может быть записан как

$$y = \ddot{q}^* r + K_p(\ddot{q}_r - \ddot{q}) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}). \quad (10.18)$$

Он состоит из эталонного ускорения $\ddot{q}^* r$ и двух дополнительных сигналов, зависящих от ошибок положения и скорости. Эти два сигнала подавляют ошибку, возникающую из-за несовершенного моделирования динамики. Полная схема управления показана на рис. 10.8.

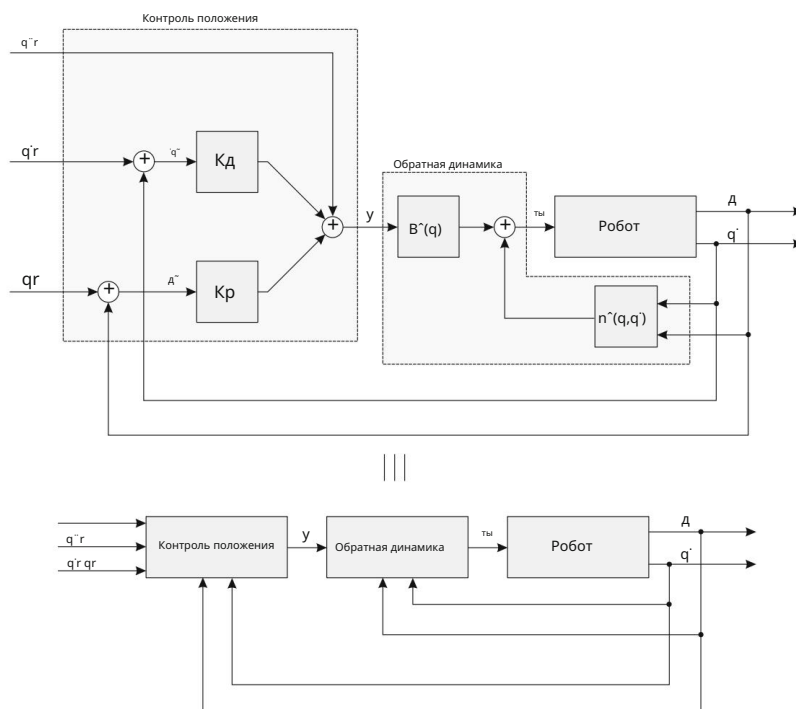


Рис. 10.8 Управление роботом на основе обратной динамики

Рассматривая уравнение (10.18) и равенстве $y = \ddot{q}$ дифференциальное уравнение, описывающее динамику робота, можно записать в виде

$$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0, \quad (10.19)$$

где введена ошибка ускорения $\ddot{q} = \ddot{q}'' - \ddot{q}''_r$. Дифференциальное уравнение (10.19) описывает зависимость ошибки управления от времени при ее приближении к нулю. Динамика отклика определяется коэффициентами усиления K_p и K_d .

10.2 Управление роботом во внешних координатах

Все изученные до сих пор схемы управления основывались на управлении внутренними координатами (т. е. положениями шарниров). Желаемые положения, скорости и ускорения определялись переменными суставов робота. Обычно нас больше интересует движение исполнительного органа робота, чем перемещения конкретных суставов робота.

На кончике робота прикреплены различные инструменты для выполнения различных задач робота. В дальнейшем тексте мы сосредоточимся на управлении роботом во внешних координатах.

10.2.1 Управление на основе транспонированной матрицы Якоби

Метод управления основан на уже известном уравнении. (5.18), связывающее силы, действующие на рабочий орган робота, с вращающимися моментами в суставах. Отношение определяется использованием транспонированной матрицы Якоби

$$\tau = D^T J^T(q) f, \quad (10.20)$$

где вектор τ представляет крутящие моменты в суставах, а f — сила в конечной точке робота.

Нашей целью является управление положением рабочего органа робота, где его желаемое положение определяется вектором x_d , а фактическое положение задается вектором x . Векторы x_d и x в целом содержат шесть переменных, три из которых определяют положение конечной точки робота и три определяют ориентацию рабочего органа, таким образом, $x = x_{xyz} \phi \psi \theta$.

Роботы обычно не оснащены датчиками, оценивающими положение исполнительного органа; Датчики робота измеряют совместные переменные. Поэтому положение рабочего органа робота должно быть определено с помощью уравнений прямой кинематической модели $x = k(q)$, представленной в главе о кинематике робота (5.4). Позиционная ошибка рабочего органа робота рассчитывается как

$$\tilde{x} = x_d - x = x_d - k(q). \quad (10.21)$$

Позиционная ошибка должна быть сведена к нулю. Простая пропорциональная система управления с матрицей усиления K_p вводится

$$f = K_p \tilde{x}. \quad (10.22)$$

При анализе уравнения При ближайшем рассмотрении (10.22) находим, что оно напоминает уравнение, описывающее поведение пружины (во внешних координатах), где сила пропорциональна удлинению пружины. Это соображение помогает нам объяснить введенный принцип управления. Предположим, что к рабочему органу робота виртуально прикреплены шесть пружин, по одной пружине на каждую степень свободы (три для положения и три для ориентации). Когда робот отходит от желаемого положения, пружины удлиняются и тянут рабочий орган робота в желаемое положение с силой, пропорциональной позиционной ошибке. Таким образом, сила f толкает концевой захват робота в нужное положение. Поскольку перемещение робота может быть вызвано только двигателями в шарнирах, переменные, управляющие двигателями, должны быть рассчитаны из силы f . Этот расчет выполняется с помощью транспонированной матрицы Якоби, как показано в уравнении. (10.20)

$$u = D^T J^T(q) f. \quad (10.23)$$

Вектор u представляет желаемые крутящие моменты в суставах. Метод управления на основе транспонированной матрицы Якоби показан на рис. 10.9.

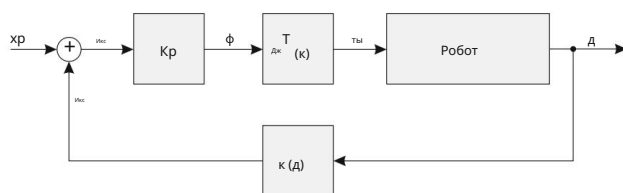


Рис. 10.9 Управление на основе транспонированной матрицы Якоби

10.2.2 Управление на основе обратной матрицы Якоби

Метод управления основан на связи между скоростями суставов и скоростями конечной точки робота (5.10), которая задается матрицей Якоби. В уравнении (5.10) подчеркнем производные по времени внешних координат $\dot{x}$ и внутренних координат $\dot{q}$

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad \frac{dx}{dt} \frac{dq}{dt} = J(q) \frac{dq}{dt} \quad (10.24)$$

Поскольку dt появляется в знаменателе с обеих сторон уравнения. (10.24), его можно опустить. Таким образом, мы получаем связь между изменениями внутренних координат и изменениями положения конечной точки робота.

$$dx = J(q)dq. \quad (10.25)$$

Уравнение (10.25) справедливо только для малых перемещений.

Как и в ранее изученном методе управления, основанном на транспонированной матрице Якоби, мы также можем в этом случае сначала вычислить ошибку положения конечной точки робота, используя уравнение. (10.21). Когда ошибка в позе мала, мы можем вычислить позиционную ошибку во внутренних координатах по обратной зависимости (10.25)

$$\tilde{q} = J^{-1}(q)\tilde{x}. \quad (10.26)$$

Таким образом способ управления транслируется в известный способ управления роботом во внутренних координатах. В простейшем примере, основанном на пропорциональном регуляторе, мы можем написать

$$\tau = K_p \tilde{q}. \quad (10.27)$$

Уравнение описывает поведение пружины (во внутренних координатах). Метод управления, основанный на обратной матрице Якоби, показан на рис. 10.10.

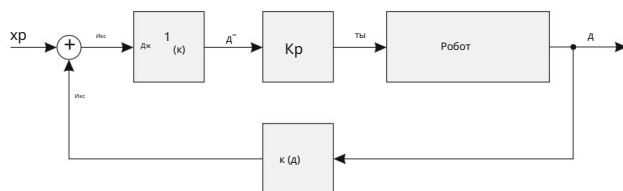


Рис. 10.10 Управление на основе обратной матрицы Якоби

10.2.3 PD-управление положением с компенсацией силы тяжести

PD-управление положением с гравитационной компенсацией уже было подробно изучено. для внутренних координат. Теперь выведем аналоговый алгоритм управления в внешние координаты. Отправной точкой будет уравнение (10.21), выражающее ошибку положения рабочего органа. Скорость конечной точки робота рассчитывается с помощью с помощью матрицы Якоби из совместных скоростей

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.28)$$

Уравнение, описывающее ПД-регулятор во внешних координатах, аналогично что записано во внутренних координатах (10.2)

$$f = K_p x_{\sim} - K_d \dot{x}. \quad (10.29)$$

В уравнении (10.29), ошибка положения умножается на матрицу позиционных выигрышей K_p , а ошибка скорости умножается на матрицу K_d . Отрицательный знак ошибка скорости вносит демпфирование в систему. Совместные крутящие моменты рассчитываются от силы f , действующей на наконечник робота, с помощью транспонированного якобиана матрицы (аналогично формуле (10.23)) и добавлением компенсирующей составляющей гравитация (как в уравнении (10.7)). Алгоритм управления записывается в виде

$$\tau = J^T(q)f + g(q). \quad (10.30)$$

Полная схема управления показана на рис. 10.11.

10.2.4 Управление роботом на основе обратной динамики

В главе об управлении роботами во внутренних координатах сказано следующее введен регулятор на основе обратной динамики

$$u = \ddot{y} + \ddot{n}(q, \dot{q}). \quad (10.31)$$

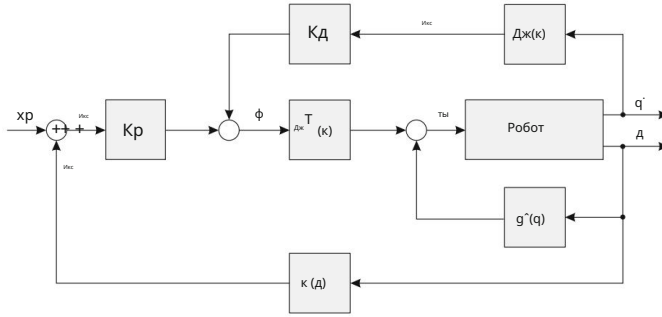


Рис. 10.11 ПД-управление с гравитационной компенсацией во внешних координатах

Мы также узнали, что вектор y имеет характеристики ускорения

$$y = \ddot{q}, \quad (10.32)$$

которая была определена таким образом, чтобы робот следовал заданной траектории выражается во внутренних координатах. Поскольку наша цель - разработать метод управления в внешние координаты, сигнал y должен быть соответствующим образом адаптирован. Уравнение (10.31), линеаризуя систему, остается неизменной.

Мы снова начнем с уравнения, связывающего суставные скорости с роботом конечные скорости

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}. \quad (10.33)$$

Вычисляя производную по времени уравнения (10.33), получаем

$$\ddot{x} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}. \quad (10.34)$$

Погрешность положения рабочего органа робота определяется как разница между его желаемой и фактической позы

$$\tilde{x} = x_r - x = x_r - J(q)\dot{q}. \quad (10.35)$$

Аналогичным образом определяется погрешность скорости рабочего органа робота.

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x}_r - \dot{x} = \dot{x}_r - J(q)\dot{q}. \quad (10.36)$$

Ошибка ускорения - это разница между желаемым и фактическим ускорением.

$$\ddot{\tilde{x}} = \ddot{x}_r - \ddot{x}. \quad (10.37)$$

При разработке регулятора на основе обратной динамики во внутренних координатах уравнение (10.19) получено, описывающее динамику ошибки управления в виде

$\ddot{q} + K_d \dot{q} + K_p q = 0$. Аналогичное уравнение можно записать для ошибки положения рабочего органа. Из этого уравнения можно выразить ускорение $\ddot{x}$ рабочего органа робота.

$$\ddot{x} + K_d \dot{x} + K_p x = 0 \quad \ddot{x} = \ddot{x}^r + K_d \dot{x} + K_p x. \quad (10.38)$$

Из уравнения (10.34) выразим $\ddot{q}$ с учетом равенства $y = \ddot{q}$

$$y = D^{-1}(q) \ddot{x} - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \quad (10.39)$$

Заменяя $\ddot{x}$ в уравнении (10.39) с выражением (10.38) получается алгоритм управления, основанный на обратной динамике во внешних координатах

$$y = D^{-1}(q) \ddot{x}^r + K_d \dot{x} + K_p x - J'(q, \dot{q}) \dot{q}. \quad (10.40)$$

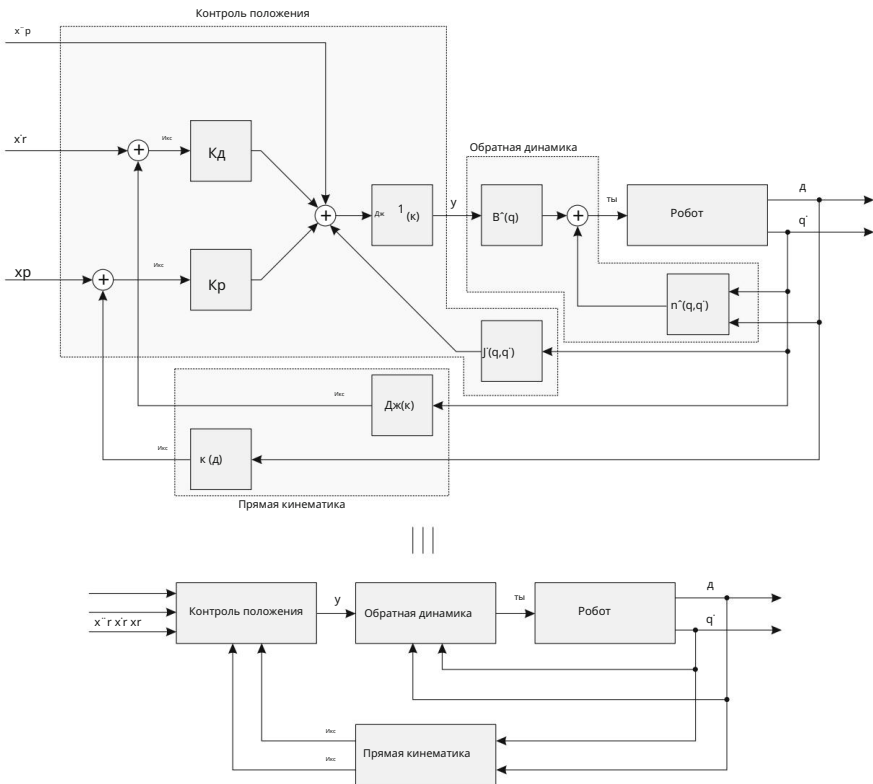


Рис. 10.12 Управление роботом на основе обратной динамики во внешних координатах

Схема управления, охватывающая линеаризацию системы на основе обратной динамики (10.31) и управления с обратной связью (10.40), показана на рис. 10.12.

10.3 Управление контактной силой

Контроль положения достаточен, когда робот-манипулятор следует траектории в свободном пространстве. Когда происходит контакт рабочего органа робота с окружающей средой, управление положением не является подходящим подходом. Представим себе робота-манипулятора, моющего окно губкой. Поскольку губка очень податлива, можно контролировать усилие между роботом и окном, контролируя положение между захватом робота и окном. Если губка достаточно податлива и мы достаточно точно знаем положение окна, робот надлежащим образом выполнит задачу.

Если соответствие робота-инструмента или его окружения меньше, то не так просто выполнить задачи, требующие контакта между роботом и его окружением. Давайте теперь представим робота, счищающего краску со стеклянной поверхности жестким инструментом. Любая неопределенность положения стеклянной поверхности или неисправность системы управления роботом помешают удовлетворительному выполнению задания; либо стекло разобьется, либо робот будет бесполезно махать в воздухе.

В обеих задачах робота, т. е. мытье окна или царапание гладкой поверхности, более разумно вместо положения стеклянной поверхности определять силу, которую робот должен оказывать на окружающую среду. Большинство современных промышленных роботов выполняют относительно простые задачи, такие как точечная сварка, окраска распылением и различные операции «точка-точка». Однако для некоторых приложений роботов требуется контроль контактной силы. Характерным примером является шлифовка или аналогичная задача роботизированной обработки. Важным направлением промышленной робототехники является также сборка роботов, где необходимо собрать несколько составных частей. В таких роботизированных задачах первостепенное значение имеет восприятие и контроль сил.

Точная работа робота-манипулятора в неопределенной, неструктурированной и изменчивой среде необходима для эффективного использования роботов в задаче сборки. Здесь несколько составных частей должны быть сведены вместе с высокой точностью. Измерение и контроль контактных усилий позволяют достичь требуемой точности позиционирования робота-манипулятора. Поскольку при управлении силой робота используются относительные измерения, абсолютные погрешности позиционирования как манипулятора, так и объекта не столь критичны, как при управлении положением робота. При работе с жесткими объектами уже небольшие изменения положения создают большие контактные усилия. Измерение и контроль этих сил могут привести к значительно более высокой позиционной точности движения робота.

Когда робот воздействует на окружающую среду, мы имеем дело с двумя типами роботизированных задач. В первом случае мы хотели бы, чтобы рабочий орган робота приводился в желаемое положение, пока робот находится в контакте с окружающей средой. Это случай сборки роботов. Характерным примером является вставка колышка в отверстие. Движение робота должно быть таким, чтобы контактное усилие уменьшалось до нуля или до минимально допустимого значения. Во втором типе задач робота мы требуем от робота

конечный эффектор для оказания заданной силы на окружающую среду. Это пример роботизированной шлифовки. Здесь движение робота зависит от разницы между желаемой и фактической измеренной контактной силой.

Метод управления силой робота будет основан на управлении роботом с помощью обратной динамики. Из-за взаимодействия робота с окружающей средой в обратной динамической модели появляется дополнительная составляющая, представляющая контактную силу f . Поскольку силы, действующие на рабочий орган робота, преобразуются в крутящие моменты в суставах с помощью транспонированной матрицы Якоби (5.18), мы можем записать динамическую модель робота в следующем виде

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q)f. \quad (10.41)$$

В правой части уравнения (10.5) мы добавили компоненту $J^T(q)f$ силы взаимодействия со средой. Можно видеть, что сила f действует через транспонированную матрицу Якоби так же, как и крутящие моменты в суставах (т. е. она пытается вызвать движение робота). Модель (10.41) можно переписать в более короткой форме, введя

$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + g(q), \quad (10.42)$$

что дает нам следующую динамическую модель робота, находящегося в контакте с окружающей средой

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) = \tau - J^T(q)f. \quad (10.43)$$

10.3.1 Линеаризация роботизированной системы посредством обратной динамики

Обозначим управляющий выход, представляющий требуемые моменты срабатывания в шарнирах робота, вектором u . Уравнение (10.43) можно записать следующим образом

$$B(q)\ddot{q} + n(q, \dot{q}) + J^T(q)f = u. \quad (10.44)$$

Из уравнения (10.44) выразим прямую динамическую модель

$$\ddot{q} = B^{-1}(q)u - n(q, \dot{q}) - J^T(q)f. \quad (10.45)$$

Уравнение (10.45) описывает реакцию роботизированной системы на управляющий вход u . Путем интегрирования ускорения с учетом начального значения скорости получается фактическая скорость движения робота. Интегрируя скорость с учетом начального положения, мы вычисляем фактические положения в суставах робота. Описываемая модель представлена блоком Робот на рис. 10.13.

Аналогично тому, как при разработке метода управления на основе обратной динамики, будем линеаризовать систему, включив обратную динамическую модель в замкнутый контур

$$u = B^*(q)u + n^*(q, \dot{q}) + J^T(q)f, \quad (10.46)$$

Использование циркумфлекса обозначает предполагаемые параметры робототехнической системы. Разница между уравнениями (10.46) и (10.14), представляющие управление на основе обратной динамики во внутренних координатах, $J^T(q)f$, компенсируя влияние есть составляющая J воздействия внешних сил на механизм робота. Схема управления, объединяющая уравнения (10.45) и (10.46), показан на рис. 10.13. Предполагая, что оцениваемые параметры равны фактическим параметрам робота, можно заметить, что при введении замкнутого контура (10.46) система линеаризуется, поскольку между входом u и выходом q есть только два интегратора, как уже показано на рис. 10.7.

10.3.2 Управление силой

После линеаризации системы управления необходимо определить входной вектор u . Управление силой будет преобразовано в управление положением рабочего органа. Упрощенно это можно объяснить следующими рассуждениями: если мы хотим, чтобы робот увеличил силу, воздействующую на окружающую среду, рабочий орган робота должен быть смещен в направлении действия силы. Теперь мы можем использовать систему управления, которая была разработана для управления роботом во внешних координатах (10.4). Схема управления рабочим органом робота с учетом линеаризации с учетом контактного усилия представлена на рис. 10.14.

До этого момента мы в основном обобщали знания об управлении положением рабочего органа робота, как объяснялось в предыдущих главах. На следующем этапе мы определим желаемое положение, скорость и ускорение рабочего органа робота на основе силы, измеренной между конечной точкой робота и окружающей его средой.

Предположим, что мы хотим контролировать постоянную желаемую силу f_r . Датчик силы на запястье измеряет контактную силу f . Разница между желаемой и измеренной силой представляет собой погрешность силы.

$$\tilde{f} = f_r - f, \quad (10.47)$$

Искомое движение робота будем рассчитывать исходя из предположения, что сила $\tilde{f}$ должна смещать виртуальный объект с инерцией B_s и демпфированием F_s . В нашем случае виртуальный объект на самом деле является исполнительным органом робота. Для простоты понимания рассмотрим систему только с одной степенью свободы. При воздействии силы на такую систему начнется ускоренное движение. Движение будет определяться силой, массой объекта и демпфированием. Таким образом, рабочий орган робота ведет себя как система, состоящая из массы и демпфера, которые находятся под действием

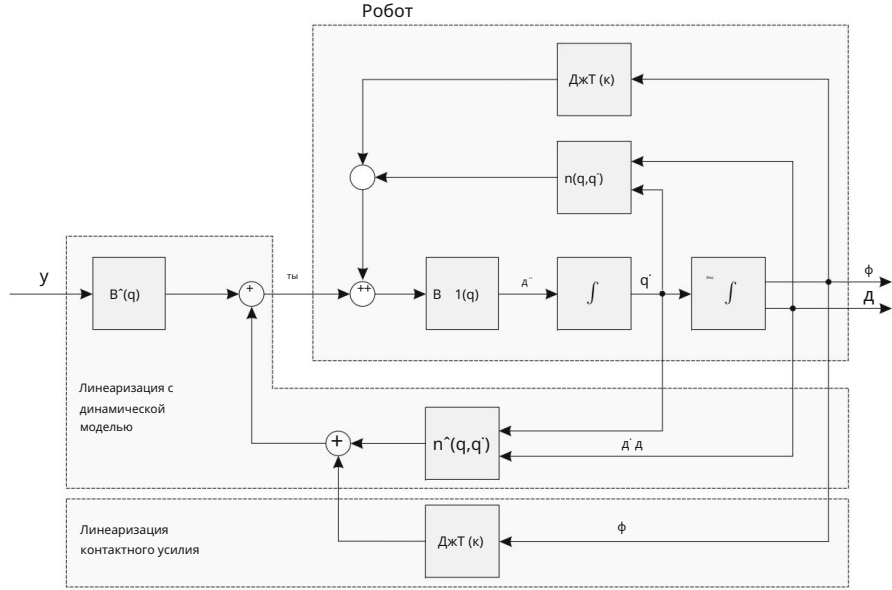


Рис. 10.13 Линеаризация системы управления путем реализации обратной динамической модели и измеренного контактного усилия

Робот



Рис. 10.14 Управление роботом на основе обратной динамики во внешних координатах с учетом контактного усилия

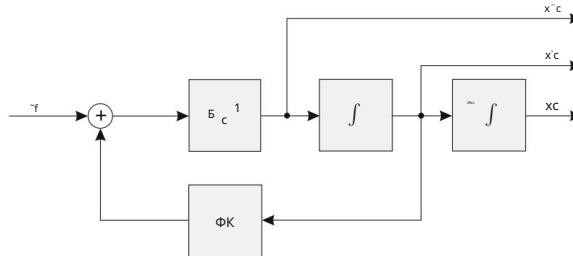


Рис. 10.15 Управление силой, преобразованное в управление положением рабочего органа робота

сила $\hat{f}$. Для большего количества степеней свободы мы можем написать следующее дифференциальное уравнение, описывающее движение объекта

$$\ddot{x} = B_c \ddot{x}_c + F_c \dot{x}_c. \quad (10.48)$$

Матрицы B_c и F_c определяют движение объекта под действием силы $\hat{f}$. Из уравнения (10.48) можно вычислить ускорение виртуального объекта

$$\ddot{x}_c = B_c^{-1} \hat{f} - F_c \dot{x}_c. \quad (10.49)$$

Интегрируя уравнение (10.49), вычисляются скорости и положение объекта, как показано на рис. 10.15. Таким образом, исходное положение x_c , исходная скорость $\dot{x}_c$ и исходное ускорение $\ddot{x}_c$ определяются по ошибке силы. Рассчитываемые переменные являются входными данными для системы управления, показанной на рис. 10.14. Таким образом, силовое управление трансформировалось в уже известное управление роботом во внешних координатах.

Для одновременного управления положением рабочего органа робота включена параллельная композиция. Параллельная композиция предполагает, что эталонные управляющие переменные получаются путем суммирования эталонов для управления силой ($\ddot{x}_c$, $\dot{x}_c$, x_c) и эталонов для управления позой ($\ddot{x}_d$, $\dot{x}_d$, x_d). Параллельная композиция определяется уравнениями

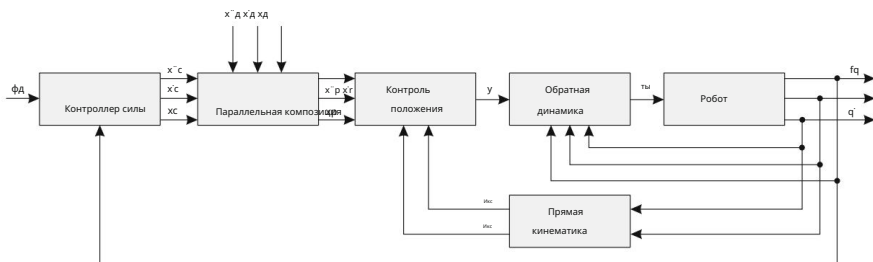


Рис. 10.16 Прямое управление силой во внешних координатах

$$\begin{aligned}
 x\Gamma &= x_d + x_c \\
 x'r &= x'd + x'c \\
 x''r &= x''d + x''c
 \end{aligned}
 \tag{10.50}$$

Система управления, включающая управление контактной силой, параллельную композицию и управление роботом на основе обратной динамики во внешних координатах, представлена на рис. 10.16. Управление усилием достигается путем выбора

$$\begin{aligned}
 x\Gamma &= x_c \\
 x'r &= x'c \\
 x''r &= x''c
 \end{aligned}
 \tag{10.51}$$

Описанный метод управления позволяет контролировать силу. Однако он не позволяет независимо контролировать положение рабочего органа робота, так как оно определяется ошибкой в силовом сигнале.

Глава 11

Робот Окружающая среда



В этой главе будет показано окружение роботов на примере процессов сборки изделий, в которых роботы являются частью производственной линии или полностью независимыми единицами. Этот пример можно легко воспроизвести и для других задач, таких как проверка и испытания продукции, сварка, покраска, операции захвата и размещения и т. д.

На самом деле роботы представляют собой идеальное решение многих проблем промышленной безопасности и здоровья, главным образом потому, что они способны выполнять тяжелые и утомительные задачи в опасных условиях. Сварочные и покрасочные роботы позволяют людям избегать токсичных паров и паров. Роботы также загружают силовые прессы, которые в прошлом часто приводили к травмам рабочих. Роботы работают в литейных цехах и в радиоактивных средах. Однако с увеличением числа роботов в промышленных процессах возрастает опасность, создаваемая самими роботами. Таким образом, обеспечение безопасности имеет первостепенное значение при проектировании роботизированной рабочей ячейки.

11.1 Безопасность робота

Промышленные роботы — это прочные устройства, которые быстро перемещаются в своем рабочем пространстве. Несчастный случай в большинстве случаев происходит только тогда, когда рабочий-человек входит в рабочее пространство робота. Человек оказывается в непосредственной близости от робота либо случайно, либо даже не зная об этом, либо с целью перепрограммирования или обслуживания робота. Человеку-оператору часто бывает трудно определить, каким будет следующий шаг робота. Особенно опасны неожиданные движения робота, которые являются следствием либо отказа робота, либо ошибки программирования. Многие государственные организации и крупные компании совместно с производителями роботов разработали стандарты безопасности. Подходы, обеспечивающие безопасное сотрудничество людей и промышленных роботов, можно разделить на три основные группы: (1) средства безопасности роботов, (2) меры безопасности на рабочем месте роботов и (3) обучение и контроль персонала.

Современные роботы уже в значительной степени имеют встроенные функции безопасности для всех трех режимов работы: нормальная работа, программирование и техническое обслуживание. Функции предотвращения сбоев повышают надежность и безопасность робота. Такая функция, например, предотвращает проникновение робота в пресс до того, как он будет открыт. Функции безопасности, встроенные в блок управления роботом, обычно обеспечивают синхронизацию между роботом и другими машинами в среде робота. Проверка сигналов, указывающих, когда устройство готово принять активное участие в ячейке робота, должна быть частью безопасного программирования робота. Использование надежных датчиков играет важную роль при проверке состояния машин в рабочей зоне робота. Важными функциями безопасности любой робототехнической системы также являются программное обеспечение и электрические стопоры.

При программировании или обучении робота человек-оператор должен находиться в рабочей зоне робота. На этапе программирования скорость движений робота должна быть значительно ниже, чем при нормальной работе. Скорость робота должна быть снижена до такого значения, чтобы человек-оператор мог избежать неожиданных движений робота. Рекомендуемая максимальная скорость робота при наличии человека в рабочей зоне составляет 0,25 м/с.

Подвесной блок обучения может быть важным компонентом безопасной работы робота. Ошибки программирования во время обучения робота часто вызывают неожиданные движения робота. Конструкция подвешенного обучающего устройства может оказать существенное влияние на безопасную работу. Использование джойстика оказалось более безопасным, чем использование кнопок управления. Размер аварийных кнопок также оказывает большое влияние на время реакции человека-оператора.

Специальные функции безопасности облегчают безопасное обслуживание робота. Такой особенностью является, например, возможность включения системы управления при обесточенном манипуляторе робота. Другая функция обеспечивает пассивное ручное перемещение сегментов робота, когда приводы робота отключены. Некоторые функции робота заставляют робота останавливаться как можно скорее, а некоторые позволяют системе управления выполнять текущую команду и затем останавливаться.

Большинство несчастных случаев с роботами происходит, когда люди преднамеренно или неосторожно входят в рабочую зону робота. Средства защиты рабочего пространства робота предотвращают такой вход в роботизированную ячейку. Существует три основных подхода к защите рабочего пространства роботов: (1) барьеры и ограждения, (2) датчики присутствия и (3) предупреждающие знаки, сигналы и световые сигналы.

Чаще всего используются металлические барьеры или заборы для предотвращения несанкционированного доступа рабочих в рабочую зону робота. Цвет ограждения играет важную роль, эффективно предупреждая неосведомленный персонал. Ограждения также являются адекватной защитой от различных транспортных средств, которые используются для транспортировки материалов в производственном цеху. Также должно быть обеспечено безопасное открывание ворот, позволяющих въехать на огороженную территорию. Человек-оператор может войти только после отключения роботизированной системы с помощью панели управления за барьерами. Хорошо спроектированные защитные барьеры также могут защитить прохожих от предметов, вылетающих из рук робота.

Важную защиту обеспечивают устройства, определяющие присутствие человека в рабочей зоне робота. Это могут быть чувствительные к давлению напольные коврики, световые завесы, концевые датчики, различные ультразвуковые, емкостные, инфракрасные или микроволновые датчики внутри роботизированной ячейки и компьютерное зрение. Инструментальные напольные коврики или световые завесы могут обнаруживать вход человека в рабочую зону робота. В таком

случае, когда срабатывает предупредительный сигнал и нормальная работа робота может быть остановлена. Датчики конечных эффекторов обнаруживают неожиданные столкновения с объектами в среде робота и вызывают аварийную остановку. Бесконтактные датчики и компьютерное зрение обнаруживают различные вторжения в рабочую зону робота.

Предупреждающие знаки, сигналы и световые сигналы могут в значительной степени повысить безопасность работы робототехнических модулей. Эти предупреждающие знаки предупреждают операторов о наличии опасной ситуации. Инструкции по эксплуатации и надлежащее обучение также важны для эффективного использования предупреждающих знаков. Такие знаки более эффективны для людей, которые непреднамеренно входят в рабочую зону робота, чем для операторов, знакомых с работой роботизированной ячейки. Опытные операторы часто пренебрегают предупреждениями и намеренно входят в рабочее пространство робота, не выключая робота, чтобы сэкономить небольшое количество времени. Такие перемещения часто становятся причиной несчастных случаев. Ложные срабатывания могут также снизить эффективность предупреждений.

Подбор квалифицированных рабочих, обучение технике безопасности и надлежащий контроль являются предпосылками для безопасной работы с роботами. Особенно ответственными моментами являются запуск и остановка роботизированной ячейки. Точно так же обслуживание и программирование роботов может быть опасным. Некоторые применения роботов (например, сварка) включают в себя особые опасные ситуации, о которых рабочие должны быть хорошо осведомлены. Те, кто работает в среде роботов, должны соответствовать как физическим, так и умственным требованиям для своей работы. Подбор подходящих работников является важным первым шагом. Второй шаг, который не менее важен, — обширное обучение технике безопасности. Удовлетворительная безопасность достигается только при постоянном контроле сотрудников. Дополнительное обучение является важной составляющей применения промышленных роботов. На курсах обучения рабочие должны быть ознакомлены с возможными опасностями и их серьезностью. Они должны научиться определять и избегать опасных ситуаций. Общие ошибки, которые являются причинами несчастных случаев, должны быть подробно объяснены. Такие учебные курсы обычно готовятся с помощью производителей роботов.

Ожидается, что будущие роботы не будут работать за ограждениями с запертыми дверями или световыми барьерами. Вместо этого они будут работать в тесном сотрудничестве с людьми, что приводит к фундаментальной озабоченности тем, как обеспечить безопасное физическое взаимодействие человека и робота. Ожидается значительный прогресс в разработке легких гибких сегментов роботов, податливых соединений, новых приводов и усовершенствованных алгоритмов управления.

Роботизированная установка может быть отдельной роботизированной ячейкой или частью более крупной промышленной производственной линии. Промышленные роботы управляются по положению и часто не имеют датчиков для определения их окружения. По этой причине роботы должны быть изолированы от человеческого окружения в случае неправильной работы робота или его периферийных частей, чтобы предотвратить травмы человека или столкновения с другим оборудованием в рабочей ячейке робота. Необходимо определить риск безопасности для каждой отдельной роботизированной ячейки, чтобы можно было принять соответствующие меры предосторожности. Неправильное поведение робота может быть результатом сбоя системы робота или человеческой ошибки, например:

- непредсказуемое поведение робота из-за сбоя в системе управления,
- неисправность кабельного соединения из-за движения робота,
- ошибка передачи данных, вызывающая непредсказуемое движение робота,
- неисправность инструмента робота, например, сварочного пистолета,

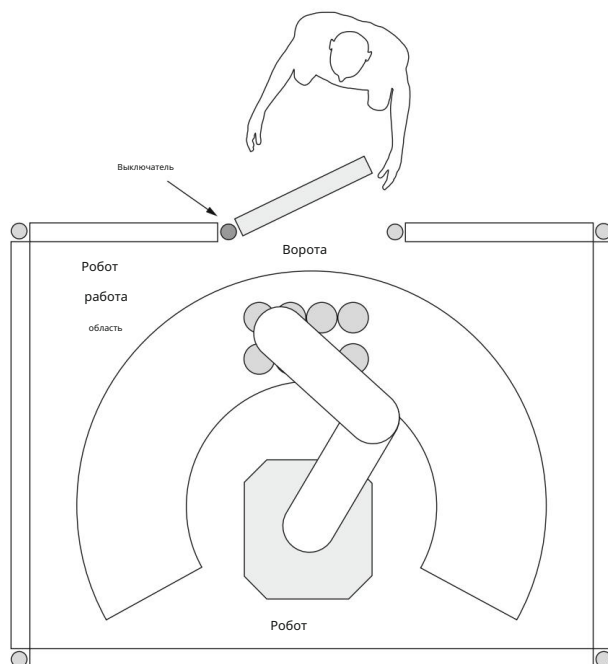


Рис. 11.1 Уровень 1: механическая защита ячейки робота

- программные
- ошибки, • изношенные механические компоненты робота.

Потенциальные опасности системных сбоев, возникающие из-за этих ошибок, можно разделить на три категории:

- Риск столкновения — это вероятность того, что движущийся робот или инструмент, прикрепленный к роботу бьет оператора.
- Опасность защемления – это ситуация, когда робот при движении вблизи объектов в ячейке робота (например, транспортных механизмов) сдавливает оператора.
- Другие опасности, характерные для каждого применения робота, такие как риск поражения электрическим током, воздействие сварочной дуги, ожоги, воздействие токсичных веществ, радиация, чрезмерный уровень шума.

По всем этим причинам требования безопасности роботов можно разделить на три уровня.

Уровень 1 — это уровень защиты всей роботизированной ячейки. Обычно это достигается физической защитой с помощью комбинации механических ограждений, перил и ворот (рис. 11.1). Наряду с физической защитой также может быть установлен датчик присутствия человека (например, лазерная завеса).

Уровень 2 включает в себя уровень защиты во время нахождения оператора в рабочей зоне робота. Обычно защиту выполняют датчики присутствия. В отличие от предыдущего уровня, основанного в основном на механической защите, уровень 2 основан на восприятии присутствия операторов (рис. 11.2).

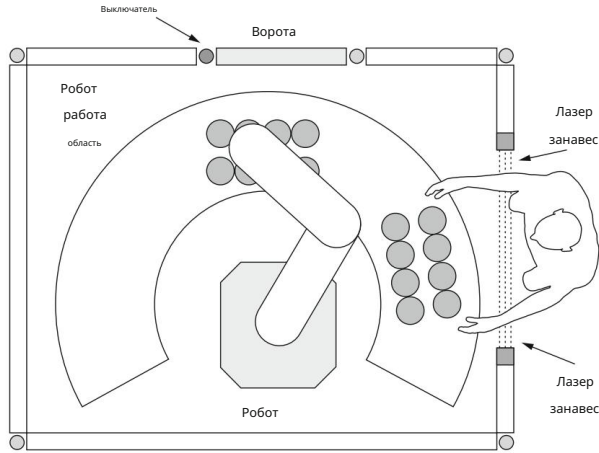


Рис. 11.2 Уровень 2: оптоэлектрическая защита роботизированной ячейки

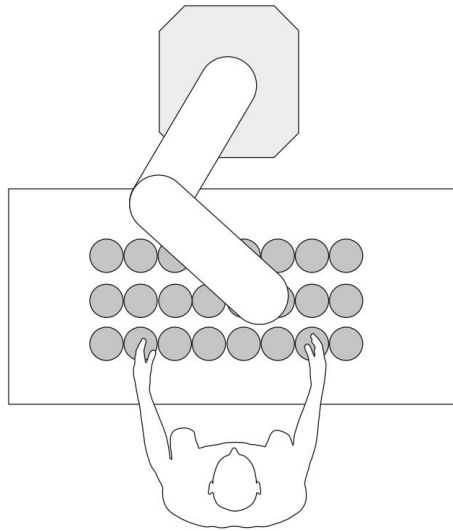


Рис. 11.3 Уровень 3: сотрудничество человека и робота

Уровень 3 — это уровень защиты, при котором люди контактируют с роботом, называемым коллаборативными роботами. Безопасность на этом уровне осуществляется путем обнаружения присутствия человека или препятствий рядом с роботом или при взаимодействии робота и человека (рис. 11.3). В опасных ситуациях роботизированная система должна снизить скорость или остановиться. Эти системы включают в себя датчики для отслеживания человека, различные датчики силы и крутящего момента, а также контактные или сенсорные датчики. Коллаборативные роботы более подробно описаны в гл. 12.

11.2 Периферийные устройства робота в процессах сборки

Роботизированные системы, установленные в промышленности, обычно являются частью более крупных специализированных производственных линий. Производственные линии используются для крупносерийного производства деталей, где необходимо несколько операций обработки. Производственная линия разделена на рабочие станции, на которых рабочие, специализированные машины или роботы выполняют необходимые задачи. Другие периферийные устройства также могут быть включены для увеличения производительности производственной линии. Правильно подобранные периферийные устройства также повышают надежность, гибкость и эффективность системы.

11.2.1 Конфигурации сборочной производственной линии

Сборочные производственные линии в промышленности состоят из конвейерных лент, поддонов, перемещающихся по конвейерным лентам, систем технического зрения, пневматических цилиндров, различных датчиков и роботов или манипуляторов. Поддоны позволяют индексировать, находить и отслеживать отдельные изготовленные детали, проходящие через процесс автоматизации. Роботы обеспечивают гибкость и могут быть интегрированы в любую конфигурацию производственной линии. Наиболее распространенные конфигурации производственной линии сборки с помощью робота:

- Поточный (прямой, Г-образный, П-образный, круговой, прямоугольный), •
- Поворотный,
- Гибридный.

На рис. 11.4 представлен пример круговой поточной производственной линии. Линейные рабочие станции обслуживаются людьми, специальными машинами и роботами. Детали для сборки

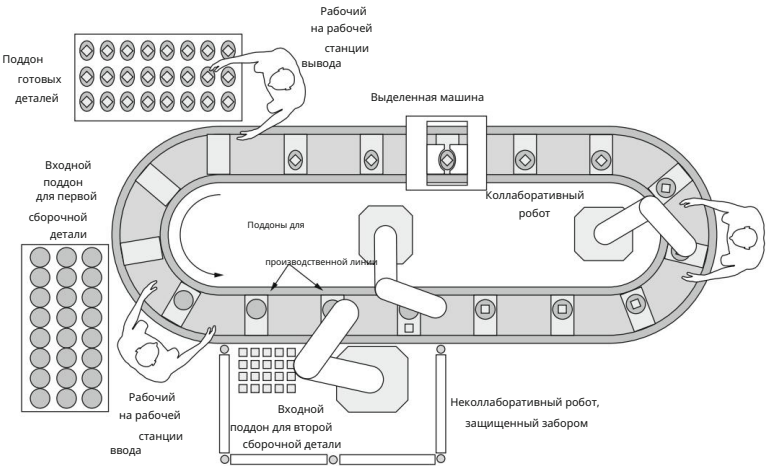


Рис. 11.4 Пример круглой поточной сборочной линии с рабочими местами человека, машины и робота

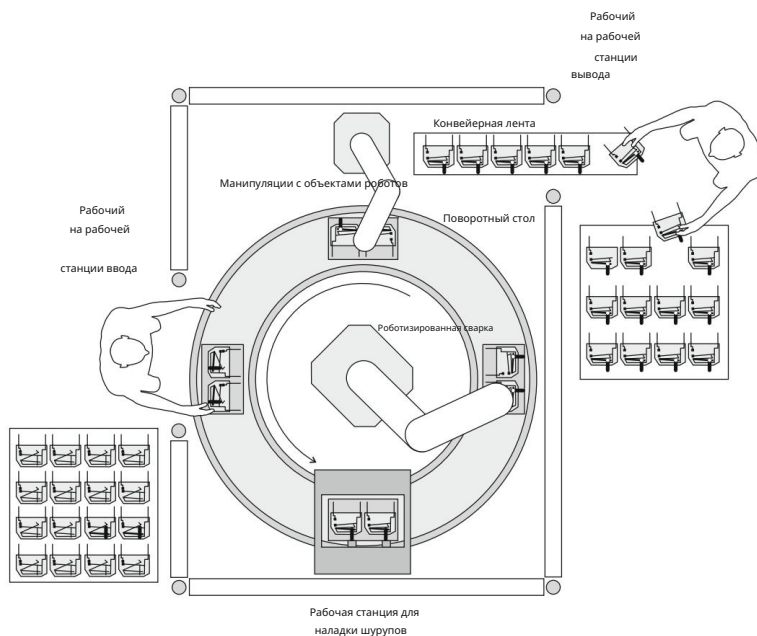


Рис. 11.5 Пример производственной линии с поворотным столом с рабочими местами человека, машины и робота

манипулируют вручную или роботом и перемещают между рабочими местами на поддонах по конвейерной ленте. Расстояние между поддонами не обязательно является постоянным, и их положение контролируется датчиками положения, обычно емкостными или индуктивными датчиками присутствия. Эти датчики необходимы для подачи сигнала роботам или специальной машине о том, что поддон находится в правильном положении и можно выполнять операции на рабочей станции. Время цикла транспортировки детали с одной рабочей станции на другую обычно постоянно, что делает рабочие станции синхронными. В некоторых случаях разработчики производственной линии интегрируют детали для буферизации поддонов, что делает производственную линию асинхронной. Необходимость в буфере возникает в тех случаях, когда некоторые рабочие станции имеют переменное время цикла; буфер не влияет на общее время цикла производственной линии.

Другой очень распространенной конфигурацией сборочной линии является поворотный или поворотный стол (рис. 11.5), обычно приводимый в действие электродвигателями. Скорость и повторяемость позиционирования высокие. Поворотный стол часто называют циферблатным столом или делительной машиной. Преимущество роторной конфигурации заключается в том, что она требует меньше площади и часто дешевле, чем другие конфигурации производственных линий. Поворотный стол всегда выполняет синхронную передачу деталей между рабочими местами с постоянным временем цикла.

Как и в предыдущем примере, эта конфигурация также может обслуживаться людьми, роботами или специальными машинами. Поворотный стол имеет круглую форму, вокруг которой перемещаются поддоны или держатели деталей и транспортируют детали, в свою очередь, в каждое ручное управление.

или автоматизированное рабочее место, где выполняются производственные операции. Поворотный стол можно разделить на несколько рабочих мест (минимум 2), сделав угол поворота 90°.

Более распространены поворотные столы с более чем двумя рабочими местами, например, 4, 5, 6 рабочих мест. Размер поворотного стола определяется размером детали, размером оборудования и количеством рабочих мест поворотной производственной линии. Также доступны поворотные столы с замкнутым контуром.

Обычно устанавливается комбинация вышеуказанных конфигураций, которая называется конфигурацией гибридной производственной линии. Несколько факторов определяют общую конфигурацию производственной линии, например:

- площадь, необходимая для производственной линии,
- стоимость установки производственной линии,
- время цикла производственной линии.

11.3 Подающие устройства

Задача подающих устройств состоит в том, чтобы доставить детали или сборки к роботу или специальной машине таким образом, чтобы положение детали было известно. Надежная работа устройств подачи имеет первостепенное значение в робототехнических модулях без машинного зрения. Положение детали должно быть точным, так как рабочий орган робота всегда движется по одной и той же траектории, и ожидается, что деталь всегда будет в одном и том же месте.

Требования к устройствам подачи роботов намного строже, чем при ручной сборке, если только роботизированная ячейка не оснащена системой технического зрения робота. Устройства подачи робота не должны деформировать детали, должны работать надежно, точно позиционировать детали, работать с достаточной скоростью, требовать минимального времени загрузки и содержать достаточное количество деталей.

Подающее устройство не должно повреждать обрабатываемые детали, так как поврежденные детали впоследствии будут вставлены роботом в узлы, которые не смогут функционировать должным образом. Стоимость таких поврежденных узлов выше стоимости более надежного питающего устройства. Подающее устройство должно надежно обрабатывать все детали, размеры которых находятся в пределах допуска. Оно также должно быть достаточно быстрым, чтобы соответствовать требованиям времени цикла всей производственной линии, и никогда не должен замедлять его работу. Кроме того, подающее устройство должно требовать как можно меньше времени для загрузки деталей. Желательно сразу засыпать в подающее устройство большое количество деталей, чем вставлять их вручную по одной. Подающие устройства должны содержать как можно большее количество деталей. Таким образом, количество загрузок, необходимых в день, уменьшается.

Простейшими подающими устройствами являются поддоны и приспособления; повседневным примером являются картонные или пластиковые поддоны, используемые для яиц. Поддоны хранят детали, определяя их положение, а иногда и ориентацию. В идеальной ситуации один и тот же поддон используется для доставки деталей от поставщика и последующего использования в роботизированной ячейке потребителя. Поддоны загружаются либо автоматически машиной, либо вручную. Хрупкие детали, гибкие объекты или детали необычной формы необходимо загружать вручную. Загрузка

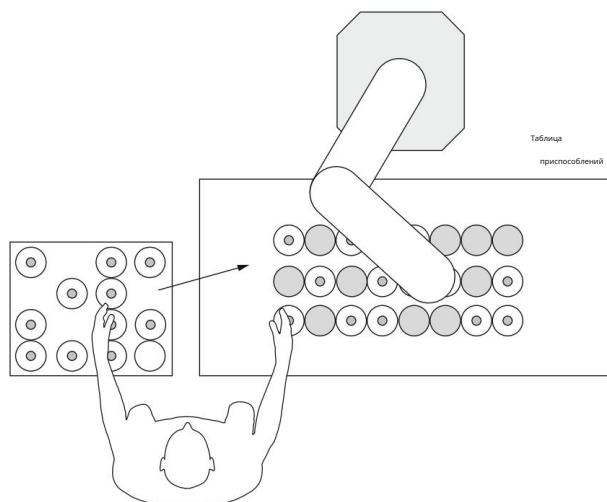


Рис. 11.6 Одновременная загрузка таблицы приспособлений

поддоны представляют собой самое слабое место паллетирования. Еще одним недостатком поддонов является их довольно большая поверхность, занимающая значительную площадь в рабочем пространстве робота.

Самый простой способ занести детали в роботизированную ячейку представляет собой крепежный стол. Человек-оператор берет деталь из контейнера, в котором детали не рассортированы, и кладет ее на фиксирующий стол внутри рабочего пространства робота (рис. 11.6). Стол приспособления должен иметь специальные пазы, обеспечивающие надежное позиционирование детали в рабочем пространстве робота. Такой крепежный стол часто используется при сварке, когда детали также должны быть закреплены на столе до начала сварки роботом. Время, необходимое для роботизированной сварки, значительно больше, чем для загрузки и разгрузки, что может оправдать использование стола для крепления.

Поддоны могут быть загружены заранее в другом месте, а затем доставлены в роботизированную ячейку (рис. 11.7). Это позволяет избежать длительного ожидания робота, пока оператор загружает поддоны. Работник-человек должен только внести поддон в рабочее пространство робота и правильно расположить его с помощью специальных штифтов в рабочем столе. Важно, чтобы поддон содержал достаточное количество деталей для обеспечения непрерывной работы робота. Замена поддонов в рабочей зоне робота представляет собой проблему безопасности, поскольку оператор должен выключить робота или роботизированная ячейка должна быть оснащена другими решениями безопасности (например, поворотным столом или коллаборативным роботом).

На поворотном столе можно разместить большее количество поддонов (рис. 11.8). Поворотный стол позволяет загружать поддоны с одной стороны, а действия робота выполняются с другой стороны поворотного стола. Таким образом, бездействие роботизированной ячейки значительно снижается, а человек-оператор защищен от движений робота.

Обычно используются три типа поддонов: вакуумно-формованные или отлитые под давлением пластиковые и металлические поддоны. Поскольку стоимость вакуумно-формованных поддонов низкая,

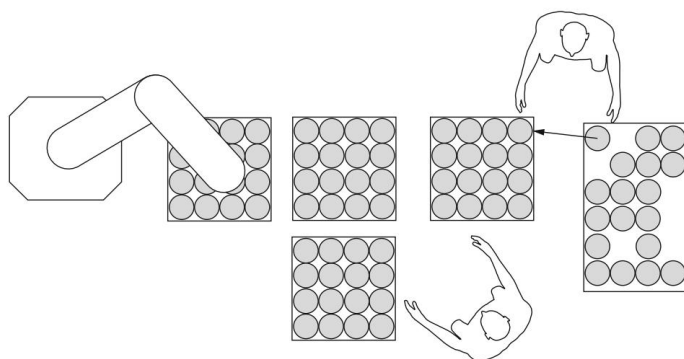


Рис. 11.7 Предварительная загрузка поддонов

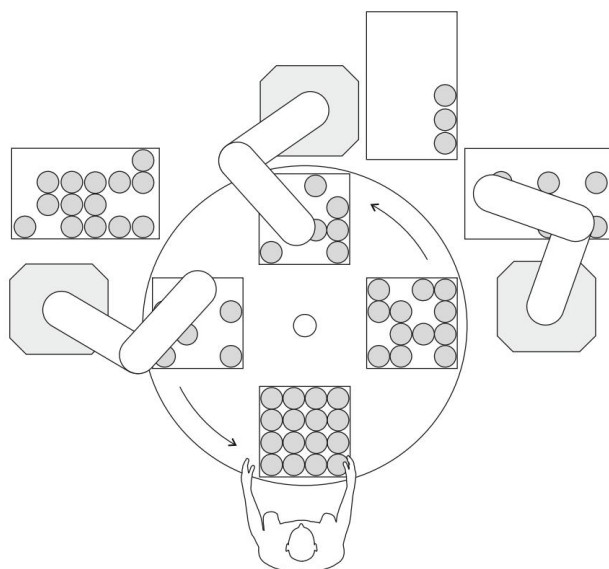


Рис. 11.8 Поворотный стол с поддонами

они используются как для упаковки и транспортировки деталей, так и для использования в ячейке робота. Во все поддоны должны быть встроены контрольные отверстия, соответствующие штифтам в рабочем столе, чтобы обеспечить простое и быстрое позиционирование. Так как вакуумформованные поддоны недороги, нетрудно понять, что они не самые точные, надежные и прочные. Они сделаны из тонкого листа пластика, который нагревают и формуют в вакууме над формой. Неточность поддона является следствием его малой жесткости. Пластиковые поддоны, изготовленные методом литья под давлением, используются, когда требуются более точные и прочные поддоны. Производство пресс-формы достаточно дорогое, а себестоимость изготовления одного поддона невелика. Мы должны иметь в виду, что большинство вакуумных и формованных пластиковых поддонов легко воспламеняются. Металлические поддоны единственные

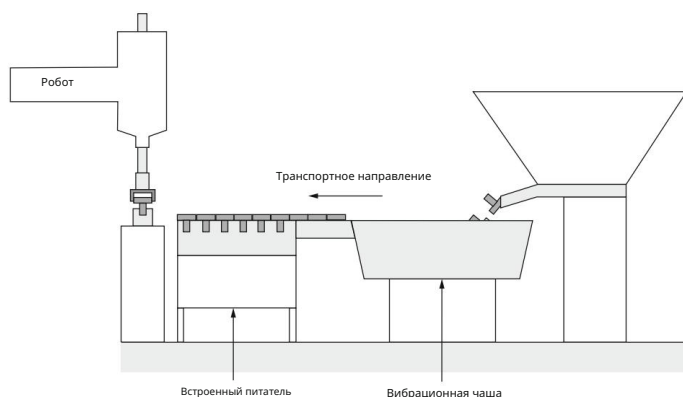


Рис. 11.9 Вибропитатель

которые негорючие. Они производятся с использованием различных подходов к механической обработке. Металлические поддоны самые надежные и долговечные, при этом их стоимость выше, чем у пластиковых. Поэтому они используются только в процессе сборки роботов.

Устройство подачи деталей представляет собой еще одно интересное семейство подающих устройств, которые используются не только для хранения деталей, но также для их позиционирования и даже ориентации в положение, подходящее для захвата роботом. Наиболее распространены вибрационные питатели (рис. 11.9). Здесь детали беспорядочно загружаются в чашу. Вибрация чаши и встроенного питателя производится электромагнитом, а надлежащая вибрация достигается за счет прикрепления вибрационных питателей к большой массе, обычно к толстому стальному столу. Вибрации заставляют детали вылетать из чаши. Специально сформированные спиралевидные ограждения заставляют их принимать требуемую ориентацию. Одна и та же чаша подачи может использоваться для разных частей, но не одновременно. Еще одним преимуществом является то, что чаша может вмещать большое количество деталей, занимая лишь небольшую площадь в рабочем пространстве робота. Чашеобразные кормушки не подходят для таких деталей, как предметы из мягкой резины или пружины. Еще одним недостатком является возможное повреждение, вызванное застреванием деталей в чаше. Шум вибрационных питателей также может вызывать беспорядок.

Простой магазинный питатель состоит из трубки, в которой хранятся детали, и скользящей пластины, приводимой в действие пневматически или электрически, которая извлекает детали из магазина одну за другой (рис. 11.10). Магазин загружается вручную, так что ориентация деталей известна. Сила тяжести вдавливают детали в скользящую пластину. Механизм выдвигной пластины должен быть устроен таким образом, чтобы он предотвращал заклинивание деталей, при этом из питателя за один раз выдавалась только одна деталь. Скользящая пластина должна блокировать все части, кроме нижней.

Магазинные питатели — отличное решение для работы с интегральными схемами (рис. 11.11). Интегральные схемы уже поставляются в трубках, которые можно использовать для питания. Питатель магазина для интегральных схем обычно состоит из

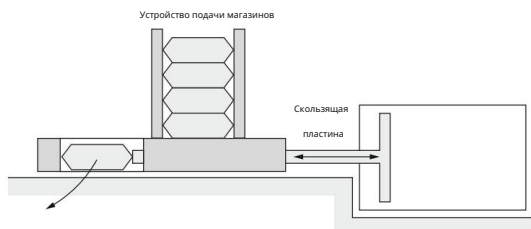


Рис. 11.10 Устройство подачи магазина

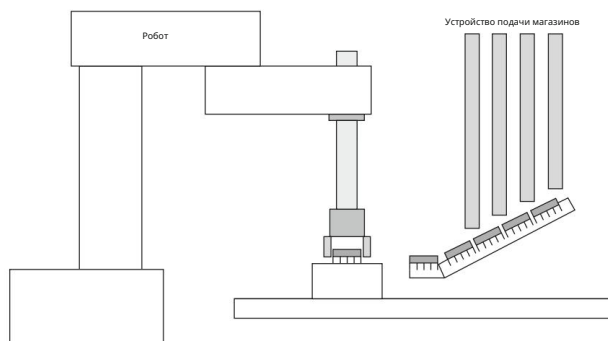


Рис. 11.11 Устройство подачи магазина с интегральной схемой

несколько трубок. Трубы выравниваются вдоль вибрационного питателя. Основным недостатком магазинных питателей является ручное зарядание. Они также не подходят для работы с крупными предметами.

11.4 Конвейеры

Конвейеры используются для транспортировки деталей, сборок или поддонов между ячейками роботов. В простейшем конвейере используется пластиковая или металлическая цепь, толкающая поддоны по металлической направляющей (рис. 11.12). Электрический двигатель приводит цепь в движение с постоянной скоростью. Движущая сила представлена трением между цепью и поддоном. Поддон останавливается специальными штифтами, приводимыми в действие пневмоцилиндрами. Цепь продолжает скользить по дну поддона. Когда приходит другой поддон, его останавливает первый. Таким образом, перед роботизированной ячейкой получается очередь из поддонов.

Поворот конвейера производится загибанием металлической направляющей. Преимуществом скользящего цепного конвейера является низкая стоимость и простота в обращении с поддонами и выполнении поворотов. Недостаток в том, что нельзя делать перпендикулярные пересечения. Также повороты должны выполняться широкими дугами, что занимает значительный пол.

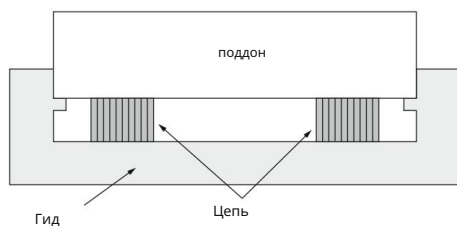


Рис. 11.12 Цепной скользящий конвейер (вид с торца)

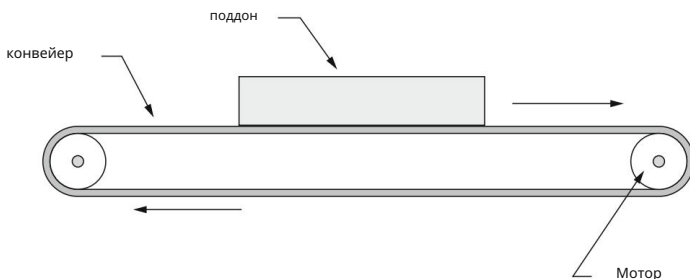


Рис. 11.13 Ленточный конвейер

место в производственном помещении. Скользящий цепной конвейер лучше всего подходит для использования в качестве системы подачи с одной петлей.

В конвейере с ленточным приводом верхняя часть ленты приводит в движение поддоны или другие предметы или материал (рис. 11.13). Поворот или пересечение осуществляется с помощью специального устройства, позволяющего поднимать, перемещать и поворачивать поддоны.

Конвейер также может состоять из роликов, приводимых в действие общим приводным валом (рис. 11.14). Ведущий вал передает крутящий момент через приводной ремень на вал ролика. Преимущество конвейера с роликами заключается в низких силах столкновения, возникающих между поддонами или объектами, перемещаемыми конвейером. Они являются следствием низкого трения между роликами и поддонами. Повороты выполняются с помощью подъемно-транспортных устройств. Недостатками конвейеров с роликами являются высокая стоимость и малые ускорения.

11.5 Роботизированные захваты и инструменты

Точно так же, как роботы-манипуляторы являются копиями человеческой руки, захваты роботов имитируют человеческую руку. В большинстве случаев захваты роботов значительно проще, чем человеческая рука, охватывая запястье и пальцы, всего 22 степени свободы.

Захваты промышленных роботов сильно различаются, поэтому нетрудно понять, что их стоимость варьируется от практически незначительной до более высокой, чем стоимость робота-манипулятора.

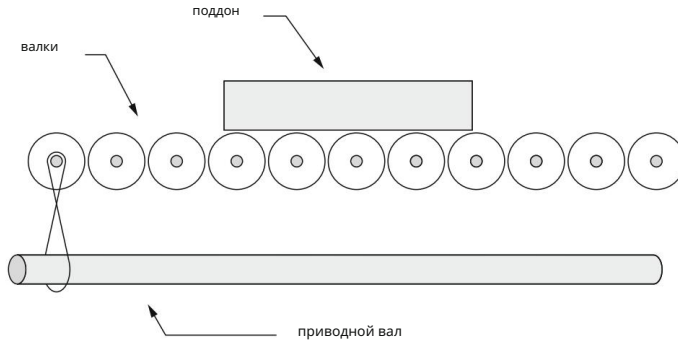


Рис. 11.14 Конвейер с роликами

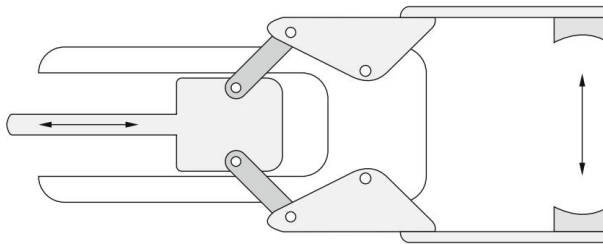


Рис. 11.15 Захват робота с двумя пальцами

усилитель. Хотя в продаже имеется множество различных захватов для роботов, часто необходимо разработать специальный захват для удовлетворения требований конкретной роботизированной задачи.

Наиболее характерными захватами для роботов являются захваты с пальцами. Их можно разделить на захваты с двумя пальцами (рис. 11.15) и захваты с несколькими пальцами. Большинство многопальцевых захватов имеют три пальца (рис. 11.16) для лучшего захвата. В промышленных приложениях мы обычно сталкиваемся с захватами с двумя пальцами. Простейшие двухпальцевые захваты управляются только между двумя состояниями, открытым и закрытым. Также доступны захваты с двумя пальцами, в которых можно контролировать расстояние или усилие между пальцами. Многопальцевые захваты обычно имеют три пальца, каждый из которых состоит из трех сегментов. Такой захват имеет 9 степеней свободы, что больше, чем у робота-манипулятора. Стоимость таких захватов высока. В многопальцевых захватах двигатели часто не размещаются в суставах пальцев, так как пальцы могут стать тяжелыми или недостаточно сильными. Вместо этого все двигатели помещаются в ладонь захвата, а сухожилия соединяют их со шкивами в суставах пальцев. Помимо захватов с пальцами, в промышленной робототехнике есть захваты вакуумные, магнитные, перфорационные и клеевые. Различные рабочие инструменты, используемые при окраске распылением, отделке или сварке, не считаются роботизированными захватами.

Двухпальцевые захваты используются для захвата деталей в процессе роботизированной сборки. Пример такого захвата показан на рис. 11.15. Различные конечные точки могут

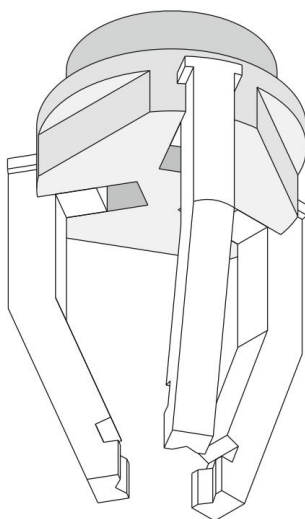


Рис. 11.16 Захват робота с тремя пальцами

быть прикреплены к пальцам, чтобы приспособить захват робота к форме и поверхности детали или узла, который необходимо захватить. В двухпальцевых роботизированных захватах используются пневматические, гидравлические или электрические двигатели. Гидравлический привод обеспечивает более высокое усилие захвата и, следовательно, работу с более тяжелыми предметами. Различные конструкции двухпальцевых захватов представлены на рис. 11.17. Простые кинематические представления позволяют выбрать подходящий захват для выбранной задачи. Захват на правой стороне рис. 11.17 позволяет захватывать параллельные пальцы.

В промышленных процессах работы-манипуляторы часто используются для загрузки машин. В таких случаях робот более эффективен при использовании двойного захвата. Робот может одновременно заносить в станок незавершенную деталь и вынимать из нее готовую деталь. Двойной захват показан на рис. 11.18.

Специальные захваты используются для захвата горячих предметов. Здесь приводы расположены далеко от пальцев. При манипулировании горячими предметами применяется воздушное охлаждение, при этом часто захват погружают в воду в рамках цикла манипулирования. Крайне важно также выбрать подходящий материал для пальцев.

При захвате легких и хрупких предметов можно использовать захваты с пружинными пальцами. Таким образом ограничивается максимальное усилие захвата, и в то же время обеспечивается простое раскрытие и смыкание пальцев. Пример простого захвата с двумя пружинными пальцами показан на рис. 11.19.

Форма объекта требует тщательной разработки двухпальцевого захвата робота. Надежный захват может быть обеспечен либо формой, либо силой смыкания двух пальцев. Возможна также комбинация двух режимов захвата (рис. 11.20).

При выполнении захвата робота двумя пальцами также важно положение пальцев по отношению к объекту. Сила захвата может быть приложена только к внешней

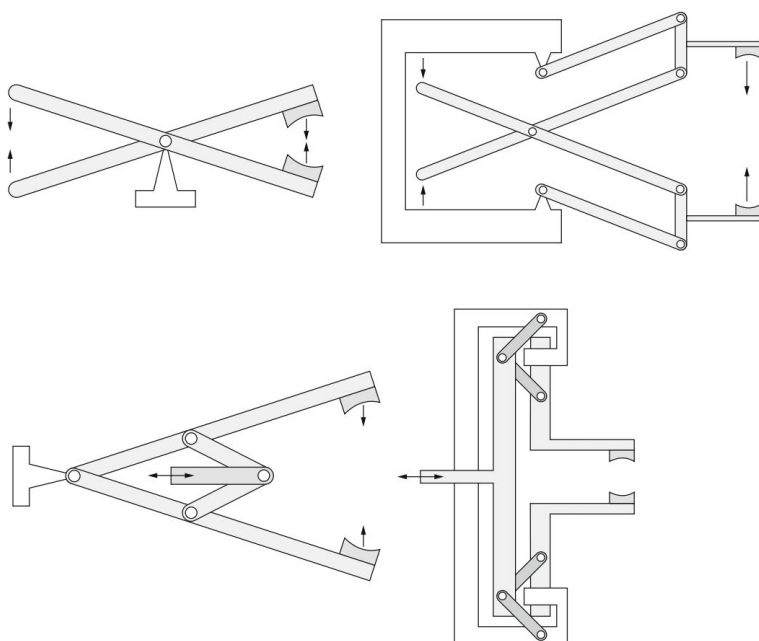


Рис. 11.17 Кинематические представления двухпальцевых захватов

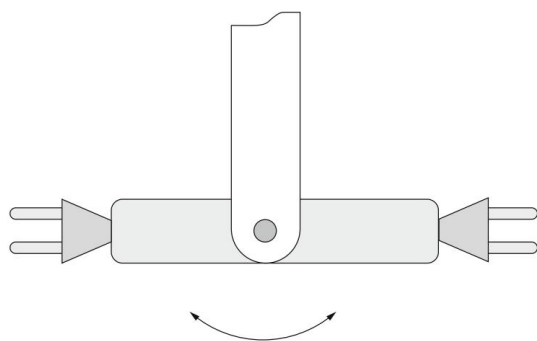


Рис. 11.18 Двойной захват робота

поверхности или только на внутренних поверхностях заготовки. Возможен также промежуточный захват, когда предмет захватывается за внутреннюю и внешнюю поверхности (рис. 11.21).

Среди захватов роботов без пальцев вакуумные захваты используются чаще всего. Вакуумные захваты или захваты с отрицательным давлением успешно применяются в тех случаях, когда поверхность захватываемого объекта плоская или равномерно изогнутая, гладкая, сухая и относительно чистая. Преимуществами данных захватов являются надежность, низкая стоимость и малый вес. В продаже имеются всасывающие головки различной формы.

Часто несколько всасывающих головок используются вместе, образуя схему, подходящую для конкретного случая.

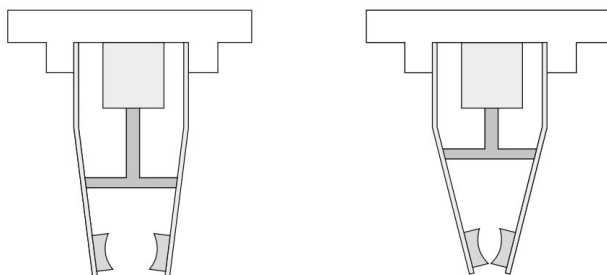


Рис. 11.19 Захват с пружинными пальцами

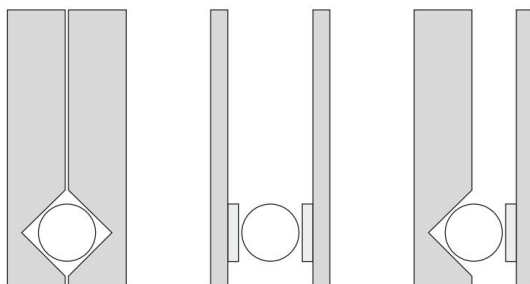


Рис. 11.20 Формальное закрытие, принудительное закрытие и комбинированный захват

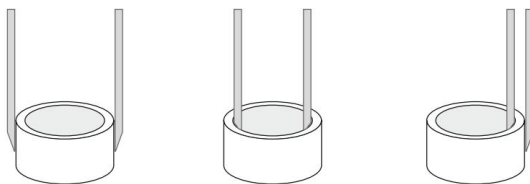


Рис. 11.21 Внешний, внутренний и промежуточный захват

форму предмета, который нужно схватить. На рис. 11.22 показана форма двух часто используемых всасывающих головок. Головка слева уместна в тех случаях, когда поверхность не совсем гладкая. Мягкий материал головы адаптируется к форме объекта.

Маленькие nipples на головке, представленные в правой части рис. 11.22, предотвращают повреждение поверхности объекта. Вакуум создается с помощью насосов Вентури или вакуумных насосов. Насос Вентури требует большей мощности и создает только 70% вакуума. Однако он часто используется в промышленных процессах из-за его простоты и низкой стоимости. Вакуумные насосы обеспечивают 90% вакуума и производят значительно меньше шума. Во всех захватах требуется быстрый захват и освобождение объектов. Высвобождение очень легких и липких предметов может иметь решающее значение для вакуумных захватов. В этом случае мы освобождаем объекты с помощью положительного давления, как показано на рис. 11.23.

Магнитные захваты - еще один пример захватов без пальцев: в них используются либо постоянные магниты, либо электромагниты. Электромагниты используются в большей степени.

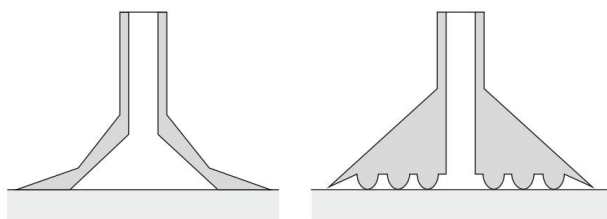


Рис. 11.22 Всасывающие головки вакуумных захватов

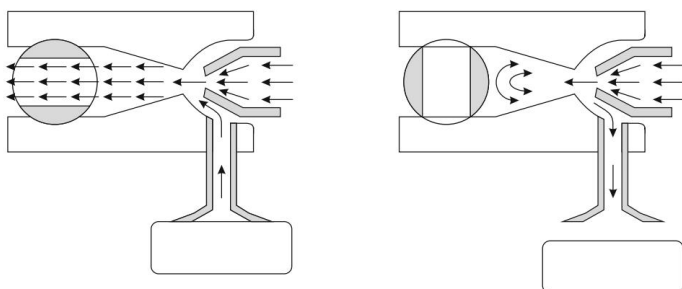


Рис. 11.23 Захват и освобождение предмета с помощью отрицательного и положительного давления

С постоянными магнитами освобождение объекта представляет трудность. Задача решается за счет использования специально спланированной траектории рабочего органа, при которой объект удерживается ограждением в рабочем пространстве робота. В магнитных захватах используется несколько магнитов, которые размещаются в различных узорах, соответствующих форме объекта. Уже небольшие воздушные щели между магнитом и объектом значительно уменьшают магнитную силу. Поэтому поверхности захватываемых предметов должны быть ровными и чистыми.

Перфорационные захваты считаются специальными роботизированными захватами. Здесь объекты просто протыкаются захватом. Обычно они используются для обработки таких материалов, как текстиль или поролон. Такие захваты можно использовать только в тех случаях, когда перфорация не приводит к повреждению объекта. Листы ткани можно захватывать большими щетками из жесткого нейлонового ворса или просто ремнями на липучке.

Клеевые захваты можно использовать при захвате очень легких деталей. Освобождение деталей должно решаться специальными траекториями конечной точки робота, где деталь сталкивается с ограждением в рабочей области робота и, таким образом, удаляется из клеевого захвата. Достаточная адгезионная сила обеспечивается с помощью клейкой ленты, которая должна двигаться во время операции.

Помимо захватов, к концу робота могут быть прикреплены и другие инструменты. Форма и функция инструмента зависят от задачи роботизированной ячейки. Наиболее частой операцией, которую выполняют роботы, является сварка. Для целей сварки можно использовать несколько различных подходов. Среди них наиболее часто прикрепляемый к роботу инструмент

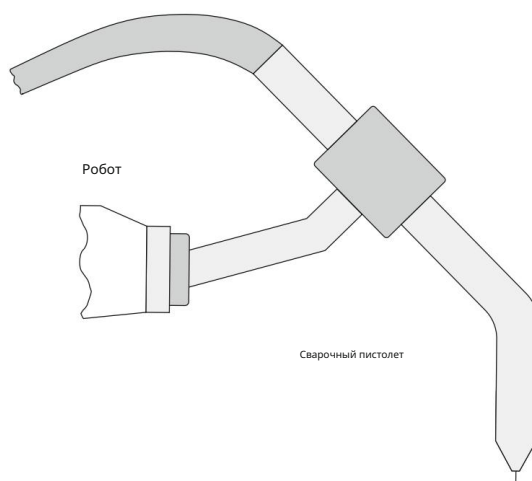


Рис. 11.24 Робот со сварочным пистолетом на конце

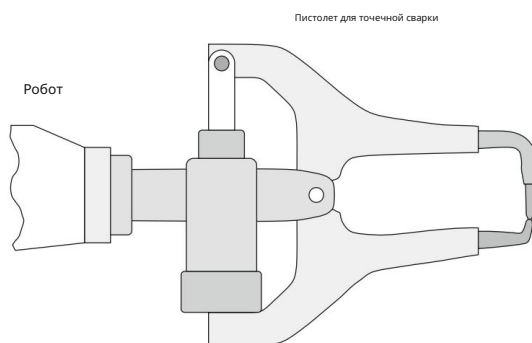


Рис. 11.25 Робот с прикрепленным к его концу пистолетом для точечной сварки

концевой является дуговой сварочный пистолет или горелка (рис. 11.24) для передачи сварочного тока от кабеля к электроду. Задача выполняется во многих различных областях производства. Помимо дуговой сварки, в производственных процессах, главным образом в автомобильной промышленности, часто можно встретить пистолеты для точечной сварки (рис. 11.25).

Глава 12

Коллаборативные роботы



В 1942 году Айзек Азимов опубликовал научно-фантастический роман «Я, робот», где были представлены три закона робототехники. Первое правило гласило: «Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинен вред».

До сих пор промышленные роботы всегда были быстрыми и надежными устройствами, выполняющими конкретные задачи, предназначенные для них. Чтобы оставаться в соответствии с вышеупомянутым правилом, они работали за фиксированными и заблокированными охранниками и чувствительным защитным оборудованием, чтобы предотвратить вторжение человека в их рабочее пространство. С появлением коллаборативных роботов клетки не используются, поскольку эти роботы предназначены для работы с людьми. Они оснащены различными функциями безопасности для предотвращения столкновений, но в случае столкновения механизм будет двигаться в противоположном направлении или полностью остановится, чтобы избежать травм.

Техническая спецификация ISO/TS 15066:2016: Роботы и роботизированные устройства. Коллаборативные роботы дополняет требования и рекомендации по совместной работе промышленных роботов, представленные в ISO 10218-1:2011 и ISO 10218-2:2011 (ANSI/RIA R15.06). :2012). Он устанавливает требования безопасности для систем промышленных роботов для совместной работы и рабочей среды. В частности, ISO/TS 15066:2016 содержит исчерпывающие рекомендации по оценке рисков в приложениях для совместных роботов.

12.1 Совместная система промышленных роботов

Коллаборативный робот — это робот, который может использоваться в совместной работе, когда специально разработанная робототехническая система и человек-оператор работают в прямом взаимодействии в пределах определенного рабочего пространства. Термин «робот» определяет манипулятор робота и управление роботом и не включает рабочий орган робота или его часть. С помощью термина «роботизированная система» мы описываем робота, рабочий орган и заготовку.

Для системы коллаборативных роботов мы можем определить различные рабочие пространства (рис. 12.1):

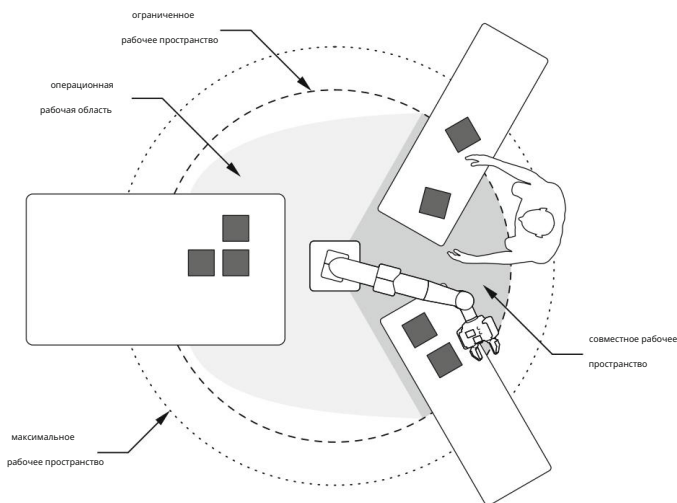


Рис. 12.1 Максимальное рабочее пространство (ограничено пунктирной линией), ограниченное рабочее пространство (ограничено пунктирной линией), рабочее пространство (серые области) и рабочее пространство для совместной работы (темно-серая область)

- максимальное рабочее пространство: пространство, которое может быть охвачено движущимися сегментами робота, как определено производителем, плюс пространство, которое может быть охвачено конечным рабочим органом и заготовкой;
- ограниченное рабочее пространство: часть максимального пространства, ограниченного ограничивающими устройствами, которые устанавливают пределы, которые не будут превышены;
- рабочее пространство: часть ограниченного пространства, которое фактически используется во время работы. выполнение всех движений, заданных программой-задачей;
- рабочее пространство для совместной работы: часть рабочего пространства, где роботизированная система и человек могут одновременно выполнять задачи во время производственной операции.

Совместное рабочее пространство должно быть спроектировано таким образом, чтобы оператор мог выполнять все намеченные задачи. Расположение машин и оборудования не должно создавать дополнительных угроз безопасности. В совместном рабочем пространстве применяются строгие ограничения скорости, пространства и измерения крутящего момента, чтобы гарантировать безопасность оператора.

Вне коллективного рабочего пространства робот может действовать как традиционный промышленный робот без особых ограничений, за исключением тех, которые связаны с задачами.

Термин «оператор» включает в себя весь персонал, контактирующий с роботизированной системой, а не только производственных операторов. Он включает в себя техническое обслуживание, поиск и устранение неисправностей, настройку, очистку и производственный персонал.

Эксплуатационные характеристики коллаборативных робототехнических систем значительно отличаются от характеристик традиционных промышленных робототехнических систем, представленных в ISO 10218-1:2011 и ISO 10218-2:2011. При работе с совместными роботами операторы могут работать в непосредственной близости от роботизированной системы, пока система активна, и физический контакт между оператором и роботизированной системой может происходить в пределах совместной рабочей области. В связи с этим должны быть приняты адекватные защитные меры для сотрудничества.

рациональные роботизированные системы для обеспечения безопасности оператора в любое время во время совместной работы. работа робота.

12.2 Совместный робот

Конструкция коллаборативных роботов движется от тяжелых, жестких и жестких промышленных роботов к легким устройствам с активной и/или пассивной податливостью.

Использование легких высокопрочных металлов или композитных материалов для звеньев роботов.

способствует малой инерции движения, что дополнительно влияет на энергопотребление

моторы. Серийные манипуляторы могут быть оснащены двигателями большой мощности/крутящего момента с шестернями с высоким передаточным числом в каждом соединении или двигателями, расположенные в основании, в то время как мощность передается через сухожилия. Если передаточное число мало, система по своей сути задний ход.

Использование внутренне гибких приводов позволяет создавать биологически вдохновленные роботы, так как приводы имитируют работу мышц человека/животных.

приводы могут иметь фиксированное механическое сопротивление, управляемое с помощью активного управления, например как последовательный эластичный привод (SEA), или импеданс можно регулировать, изменяя параметры механического соединения, как в приводе переменной жесткости (VSA). MOPE - это комбинация двигателя, редуктора и пружины, где измеряется крутка пружины для управления выходной силой, в то время как используется измерение крутки пружины как датчик силы. VSA можно использовать, чтобы сделать робота более безопасным в случае столкновения так как жесткость сустава и инерция удара уменьшаются. Концептуальные проекты СЭО и VSA представлены на рис. 12.2.

Коллаборативные роботы также имеют особую геометрию, минимизирующую контактную энергию.

передача за счет увеличения площади удара. Роботы имеют круглую форму и интегрированы функции, снижающие риск защемления и силу удара. Основной особенности коллаборативного робота представлены на рис. 12.3.

Для обеспечения высокого уровня безопасности система роботов должна включать в себя различные датчики. для мониторинга состояния робота и его рабочего пространства, представленного в гл. 7.

Роботы могут быть оснащены датчиками крутящего момента в суставах, датчиками силы/крутящего момента на концевом эффекторе и различными тактильными датчиками, используемыми в качестве мягкой кожи или твердой оболочки для робота.

Все эти датчики позволяют роботу обнаруживать контакт с окружающей средой (оператором).

или избежать столкновения, предвидя его и реагируя соответствующим образом. Некоторые роботы используют

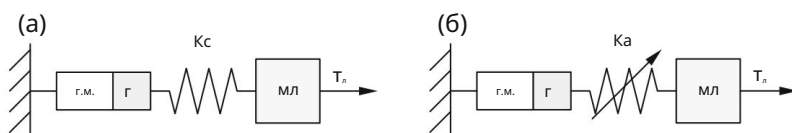


Рис. 12.2 а) серийный упругий привод (SEA), б) привод переменной жесткости (VSA); g_m и g_g представляют двигатель и редуктор, податливый элемент K_s с фиксированной жесткостью, регулируемый податливый элемент K_a , m_l масса подвижного звена и τ_l крутящий момент в соединении, приводящий к перемещению звена

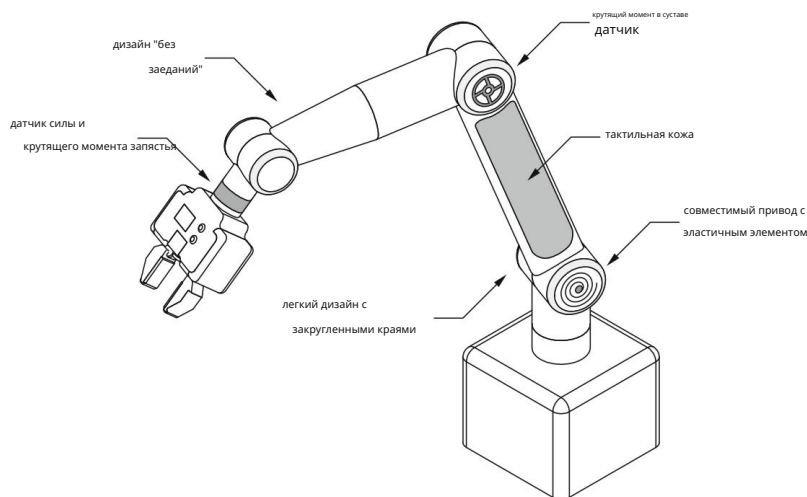


Рис. 12.3 Конструктивные особенности коллаборативного робота

дублирующие энкодеры в каждом сочленении для замены дорогостоящих крутящих моментов сочленений; сила может быть получена из известного тока двигателя и положения шарнира. Роботизированные системы могут включать в себя другие датчики с рейтингом безопасности, например, камеры слежения, лазерные сканеры, лазерные шторы, коврики безопасности и другое электрочувствительное защитное оборудование для обнаружения присутствия оператора в окружении робота. Затем эту информацию можно использовать для правильной реакции робота, чтобы предотвратить зажим, сдавливание или раздавливание оператора.

Встроенные датчики могут использоваться для безопасного управления роботом. Основная парадигма заключается в том, как справиться с физическим контактом между механизмом и окружающей средой. Одной из самых популярных схем управления является управление импедансом, основанное на динамической модели робота (5.56). Динамическая модель используется для оценки необходимых крутящих моментов в суставах для правильного движения робота. Если измеренные крутящие моменты в суставах отклоняются от оценочных, то разница определяется как столкновение. При обнаружении столкновения следует активировать соответствующую стратегию реагирования, чтобы предотвратить потенциальную опасность для оператора. Робот может игнорировать контакт и следовать по опорной траектории, либо робот может быть остановлен. Другие возможности включают переключение с управления положением на управление крутящим моментом в невесомости (очень высокая податливость робота), переход на управление крутящим моментом с использованием сигналов от совместных крутящих моментов для минимизации инерции звена и двигателя (даже «более легкий» робот) или использовать внешние измеренные крутящие моменты и переключиться на контроль проводимости, где робот и сталкивающийся объект действуют как два магнита, обращенные друг к другу одними полюсами.

Цель коллаборативных роботов состоит в том, чтобы объединить лучшее из роботов и человека-оператора: точность, мощность и выносливость робота в сочетании с превосходной способностью человека-оператора решать неточные задачи. Поскольку робот и оператор сотрудничают в одном рабочем пространстве, контакт между роботами и людьми разрешен. Если случайный контакт все же произошел, то этот контакт не должен

привести к боли или травме. Таким образом, коллаборативные роботы могут использоваться вместе с операторами и повышать производительность рабочих. Роботы легкие и занимают небольшую площадь, поэтому их можно легко перемещать по цеху, что повышает их универсальность. Программирование коллаборативных роботов простое, в основном выполняется вручную, поэтому использование робота очень гибкое; робот может работать на новом рабочем месте за очень короткое время.

12.3 Совместная работа

Совместная работа не определяется использованием одного робота, а обусловлена задачей, тем, что делает роботизированная система, и пространством, в котором выполняется задача. В совместную работу могут быть включены четыре основных метода (один или комбинация нескольких):

- безопасный контролируемый останов; • ручное управление; • контроль скорости и эшелонирования; • ограничение мощности и усилия.

Все четыре приема робот выполняет в автоматическом режиме. Основные детали всех четырех методов представлены в таблице 12.1. Более подробные описания доступны ниже.

Таблица 12.1 Типы совместных операций Скорость Моменты

			Техника управления оператором	
Контролируемый останов с рейтингом безопасности	Ноль, пока оператор находится в совместной рабочей области	Только гравитация и компенсация нагрузки	Нет, пока оператор находится в совместной рабочей области	Никаких движений в присутствии оператора
Ручное руководство	Безопасная контролируемая скорость	Как при непосредственном вводе оператора	Аварийный останов, превышающее устройство, вход движения	Движение только прямым вводом оператора
Мониторинг скорости и разделения	Безопасная контролируемая скорость	При необходимости поддерживать мин. расстояние разделения и выполнить приложение	Нет, пока оператор находится в совместной рабочей области	Предотвращение контакта между роботизированной системой и оператором
Ограничение мощности и силы	Макс. определенная скорость для ограничения силы удара	Макс. определенный крутящий момент для ограничения статических сил	По требованию приложения	Робот не может прикладывать чрезмерную силу (по конструкции или управлению)

12.3.1 Контролируемый останов с рейтингом безопасности

В этом методе роботизированная система должна быть оснащена безопасными устройствами, которые обнаруживают присутствие оператора в рабочем пространстве для совместной работы (например, световые завесы или лазерные сканеры). Оператору разрешается взаимодействовать с роботизированной системой в совместном рабочем пространстве только в том случае, если активирована функция контролируемой остановки робота с рейтингом безопасности и движение робота остановлено до того, как оператор войдет в общее рабочее пространство. Во время совместной задачи робот находится в состоянии покоя с включенными двигателями. Движение системы робота может возобновиться только после того, как оператор покинет рабочее пространство для совместной работы. Если в коллективном рабочем пространстве нет оператора, робот может работать как классический промышленный робот, например, не в коллаборативном режиме.

Операции контролируемого останова с рейтингом безопасности представлены в таблице 12.2. Когда оператор находится вне рабочего пространства для совместной работы, робот может работать без каких-либо ограничений. Но в случае, если робот находится в рабочей зоне одновременно с оператором, должен быть активен безопасный контролируемый останов робота. В противном случае робот должен выполнить защитный останов категории 0 (неконтролируемая остановка робота путем немедленного отключения питания приводов) в случае неисправности (IEC 60204-1).

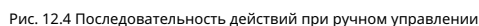
Этот метод может применяться к приложениям ручной загрузки или разгрузки рабочего органа, проверкам незавершенного производства и приложениям, в которых только один перемещается в совместном рабочем пространстве (например, робот или оператор). Контролируемые остановки с рейтингом безопасности также могут быть интегрированы с другими совместными методами.

12.3.2 Ручное управление

Для ручного управления робот должен быть оснащен специальным направляющим устройством, расположенным на концевом рабочем органе робота или рядом с ним, которое служит для передачи команд движения системе робота. Устройство должно включать в себя аварийный останов и разрешающее устройство, если робототехническая система не соответствует конструктивным мерам безопасности по своей сути или функциям ограничения безопасности. Расположение направляющего устройства должно позволять оператору

Таблица 12.2 Действия робота для безопасного контролируемого останова

		Близость оператора к рабочему пространству для совместной работы	
		Снаружи	Внутри
Близость робота к совместной работе Рабочее пространство	Снаружи	Продолжать	Продолжать
	Внутри и в движении	Продолжать	Защитная остановка
	Внутри контролируемая остановка с классом безопасности	Продолжать	Продолжать



Роботизированная система готова к ручному управлению, когда она входит в рабочее пространство для совместной работы и производит контролируруемую остановку с рейтингом безопасности. В этот момент оператор может войти в рабочее пространство для совместной работы и взять на себя управление роботизированной системой с помощью ручного направляющего устройства. Если оператор входит в рабочее пространство для совместной работы до того, как система будет готова к ручному управлению, должна быть выдана защитная остановка. После того, как останов, контролируемый безопасностью, отключен, оператор может выполнять задачу ручного управления. Когда оператор отпускает направляющее устройство, срабатывает контролируемый останов с классом безопасности. Работа без совместной работы возобновляется, когда оператор покидает рабочее пространство для совместной работы. Последовательность действий при ручном управлении представлена на рис. 12.4.

Этот метод совместной работы подходит для реализации в приложениях, где роботизированная система действует как усилитель мощности, в приложениях с высокой степенью вариативности,

где роботизированная система используется в качестве инструмента, а также в приложениях, где требуется координация ручных и частично автоматизированных шагов. Сотрудничество с ручным управлением может быть успешно реализовано в ограниченном или мелкосерийном производстве.

12.3.3 Контроль скорости и эшелонирования

В этом методе оператор и роботизированная система могут одновременно перемещаться в совместном рабочем пространстве. Во время совместных операций всегда поддерживается минимальное защитное расстояние между оператором и роботизированной системой. Защитное разделительное расстояние — это кратчайшее допустимое расстояние между любой движущейся опасной частью робототехнической системы и оператором в совместной рабочей зоне.

Защитное расстояние S_p в момент времени t_0 может быть описано выражением (12.1):

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r, \quad (12.1)$$

где S_h — вклад в защитное расстояние, связанный с изменением местоположения оператора. Формула учитывает тормозной путь S_r , который представляет собой расстояние, обусловленное временем реакции робота, и S_s , описывающий расстояние, обусловленное тормозным путем робототехнической системы. C представляет собой расстояние проникновения, то есть расстояние, на которое часть тела может проникнуть в поле восприятия, прежде чем она будет обнаружена. Защитное разделяющее расстояние S_p также включает в себя неопределенность положения оператора Z_d , возникающую из-за допусков измерений, и неопределенность положения роботизированной системы Z_r , возникающую из-за точности системы измерения положения робота. Максимально допустимые скорости и минимальные защитные расстояния в приложении могут быть переменными или постоянными. Различные вклады в защитное расстояние показаны на рис. 12.5.

Робот должен быть оснащен функцией контролируемой скорости с безопасным классом безопасности и контролируемым остановом с классом безопасности. Роботизированная система также включает в себя дополнительные безопасные периферийные устройства для наблюдения за человеком (например, безопасные системы камер). Роботизированная система может поддерживать минимальное защитное расстояние за счет снижения скорости, за которым может последовать контролируемая остановка с рейтингом безопасности, или выполнение альтернативного пути, не нарушающего защитное расстояние, как показано на рис. 12.6. Если фактическое разделяющее расстояние между робототехнической системой и оператором падает ниже защитного разделительного расстояния, роботизированная система должна инициировать защитную остановку и инициировать связанные с безопасностью функции, связанные с робототехнической системой (например, отключить все опасные инструменты). Когда оператор отходит от робота, фактическое разделяющее расстояние соответствует защитному разделительному расстоянию и превышает его; в этот момент робот может возобновить движение автоматически.

Мониторинг скорости и разделения полезен в приложениях, где роботизированная система и задачи оператора выполняются одновременно.

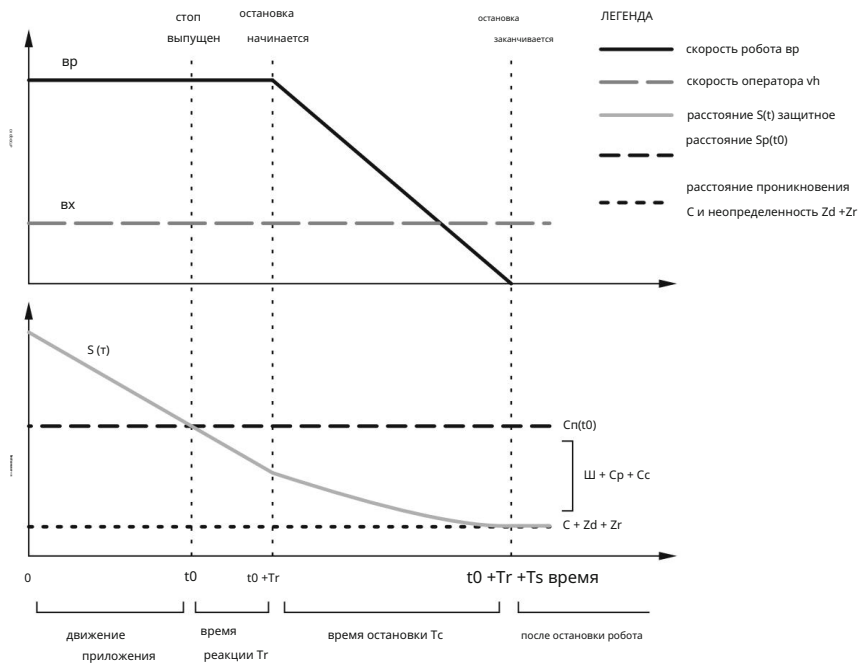


Рис. 12.5 Графическое представление вкладов в защитное расстояние между оператором и роботом

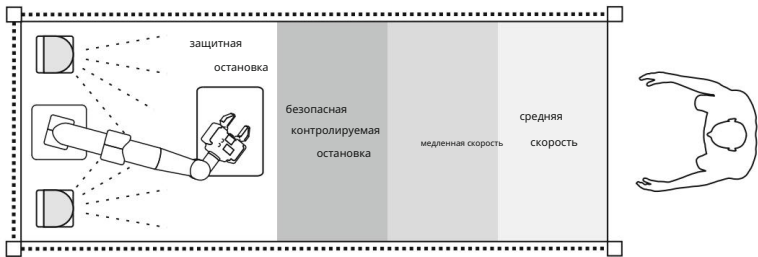


Рис. 12.6 Уровни безопасности для поддержания минимального защитного разделительного расстояния

12.3.4 Ограничение мощности и усилия

Метод ограничения мощности и силы допускает физический контакт между роботизированной системой и оператором, который может происходить как преднамеренно, так и непреднамеренно. Метод требует, чтобы роботы были специально спроектированы с учетом низкой инерции, подходящей геометрии (закругленные края и углы, гладкие и податливые поверхности), материалов (набивка, амортизация, деформируемые компоненты) и функций управления. Первый включает в себя методы проектирования активной безопасности, такие как ограничивающие силы и крутящие моменты,

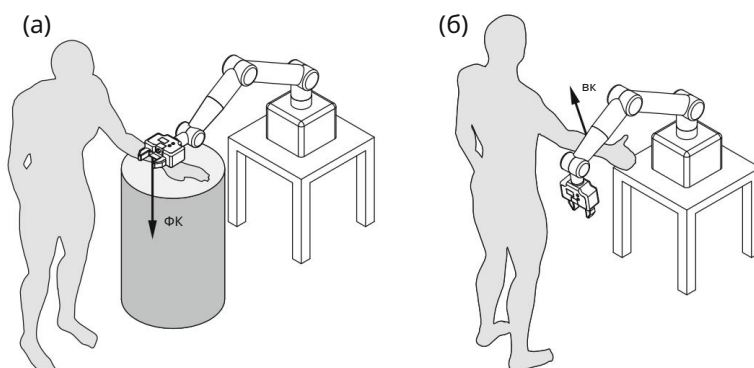


Рис. 12.7 а Квзистатический и б переходный контакт

ограничение скорости движущихся частей, ограничение количества движения за счет ограничения движущихся масс и ограничение механической мощности или энергии в зависимости от массы и скорости. Конструкция робота также может включать использование безопасных мягких осей, функций ограничения пространства и безопасных функций контролируемой остановки. Некоторые роботы также включают в себя датчики, чтобы предвидеть или обнаруживать контакт.

Контакт между коллаборативным роботом и частями тела оператора может быть:

- предназначен как часть последовательности приложений; •
- случайно из-за несоблюдения порядка работы, но без технических сбоев
- уре;
- режим отказа, приводящий к контактным ситуациям.

Существует два возможных типа контакта между движущейся частью робототехнической системы и областями на теле оператора. Квзистатический контакт (рис. 12.7а) включает ситуацию зажима или раздавливания, в которой часть тела оператора зажата между подвижной частью роботизированной системы и другой неподвижной или подвижной частью рабочей ячейки. В этой ситуации давление или сила F_c робототехнической системы применяется в течение продолжительного периода времени, пока условия не улучшатся. Переходный контакт (т. е. динамическое воздействие, рис. 12.7б) описывает контакт между движущейся частью робототехнической системы и частью тела оператора без зажима или захвата этой части.

Фактический контакт короче, чем вышеупомянутый квзистатический контакт (<50 мс), и зависит от инерции робота, инерции части тела оператора и их относительной скорости v_c .

Роботизированная система должна быть соответствующим образом спроектирована, чтобы снизить риск для оператора, не превышая применимые пороговые предельные значения силы и давления для квзистатического и переходного контакта. Ограничения могут применяться к силам, крутящим моментам, скоростям, импульсу, механической мощности, суставным диапазонам движения или пространственным диапазонам. Пороговые предельные значения для соответствующего события контакта с открытым участком тела определяются для наихудшего сценария для обоих типов контакта.

Предельные значения, представленные в ISO/TS 15066:2016, основаны на консервативной оценке и научных исследованиях болевых ощущений. Некоторые информативные значения для

Таблица 12.3 Биомеханические ограничения для квазистатического контакта

Площадь тела	Максимально допустимый давление pQS/H/см2	Максимально допустимый усилие FQS/H
Седьмая мышца шеи	210	150
Плечевой сустав	160	210
Грудина	120	140
Брюшная полость	140	110
Таз	210	180
плечевая кость	220	150
Предплечье	180	160
Ладонь	260	140
Подушечка указательного пальца	300	140
Концевой сустав указательного пальца	280	140
Тыльная сторона ладони	200	140
Бедро	250	220
Коленная чашечка	220	220
Шин	220	130
Теленок	210	130

максимально допустимое давление и максимально допустимое усилие между часть и область тела оператора в квазистатическом контакте представлены в таблице 12.3. Значения давления и силы для кратковременного контакта (pT , FT) могут быть не менее чем в два раза больше значения для квазистатического контакта (pQS, FQS).

$$pT = 2 \cdot pQS \quad FT = 2$$
 (12.2)

$$\cdot FQS .$$
 (12.3)

Контакт с лицом, черепом или лбом недопустим и должен быть предотвращен.

Для правильной реакции системы робота должны быть приняты ограничения как по давлению, так и по силе. во внимание, в зависимости от ситуации. В случае зажатия тела оператора часть (например, рука оператора), результирующая сила может быть значительно ниже предельного порога поэтому предел давления будет ограничивающим фактором. С другой стороны, если контакт находится между двумя довольно большими и мягкими областями (например, мягкой частью робота и местом оператора). брюшной полости), результирующее давление будет ниже предельного порога и предельного фактором будет предел силы.

В случае контакта роботизированная система должна реагировать таким образом, чтобы эффект идентифицированный контакт остается ниже идентифицированных пороговых предельных значений, как представлено на рис. 12.8. В случае зажима или защемления части тела между сегментами робота и какой-либо другой объект, робот должен ограничить скорость, чтобы соответствовать защитным пределы. Робот также должен иметь встроенную опцию, позволяющую оператору вручную отделить пораженный участок тела.

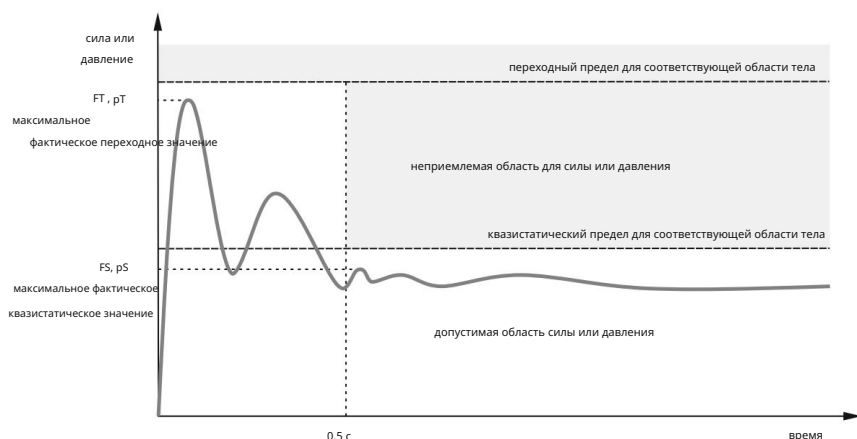


Рис. 12.8 Графическое представление допустимых и недопустимых усилий или давлений в случае квазистатического или переходного контакта

Метод ограничения мощности и усилия можно использовать в совместных приложениях, где часто требуется присутствие оператора, в операциях, зависящих от времени (когда задержка из-за безопасных остановок нежелательна, но может иметь место физический контакт между роботизированной системой и оператором).), а также приложений с небольшими деталями и высокой вариативностью сборки.

12.4 Совместные роботизированные захваты

Конструкция и управление коллаборативным роботом обеспечивают безопасность робота при совместной работе с оператором. Но сам робот — это всего лишь часть системы роботов. Захваты представляют собой важную часть робототехнической системы, поскольку они используются для манипулирования объектами в непосредственной близости от оператора. Таким образом, захваты должны обеспечивать высокий уровень безопасности.

Захваты обычно жестко крепятся к уже безопасному роботу со встроенными ограничениями скорости и силы. Форма и материалы захвата должны соответствовать защитной конструкции, предотвращающей превышение допустимого давления на контактную поверхность тела оператора. Кроме того, захваты на конце робота должны создавать как можно меньше инерции, чтобы минимально влиять на функции безопасности робота.

Конструкция захватов должна предотвращать застревание пальцев оператора в захватах или соединительных кабелях. В захватах должен быть реализован безопасный режим при аварийной остановке, функция которого зависит от приложения. Если есть захваченная часть, оператор обычно хочет, чтобы эта часть оставалась надежно захваченной. При обучении и закрытии захвата оператор хочет, чтобы захват перестал прикладывать усилие.

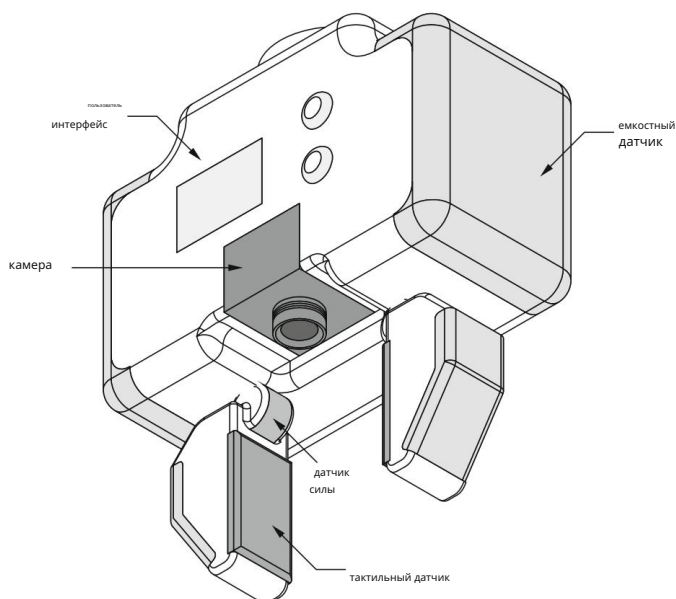


Рис. 12.9 Концептуальная конструкция захвата для коллаборативного захвата

Когда захват взаимодействует с деталью, оператору нужен надежный захват.

Рукоятка также должна быть надежной при аварийной остановке или отключении питания, поскольку упавшая деталь может представлять опасность для оператора, робота или окружающей среды. Если робот движется быстро, упавшая часть может стать снарядом.

Захваты могут быть оснащены различными датчиками для повышения безопасности оператора (рис. 12.9). Емкостные датчики используются для раннего обнаружения оператора и, таким образом, предотвращения нежелательных контактов. Системы камер могут обнаруживать окружение робота и помогают в поиске объектов. Тактильные датчики используются для различения между заготовкой и оператором. Для установки адекватной силы захвата можно интегрировать различные датчики силы.

Конструкция захвата также может включать в себя различные пользовательские интерфейсы, такие как ЖК-экран, сигнальные лампы и кнопки управления.

Захваты, используемые в системах коллаборативных роботов, должны быть просты в установке и программировании. Будущая конструкция захватов стремится уйти от пользовательского программирования к захватам, которые будут способны автоматически адаптироваться в зависимости от деталей и областей применения.

12.5 Применение совместной роботизированной системы

В документе ISO 10218-2:2011 предусмотрено разделение приложений для совместной работы на пять категорий, представленных на рис. 12.10.

Приложение с окном передачи (см. рис. 12.10a) охватывает погрузку/разгрузку, испытания, стендовые испытания, очистку и обслуживание. Робот расположен позади неподвижного или

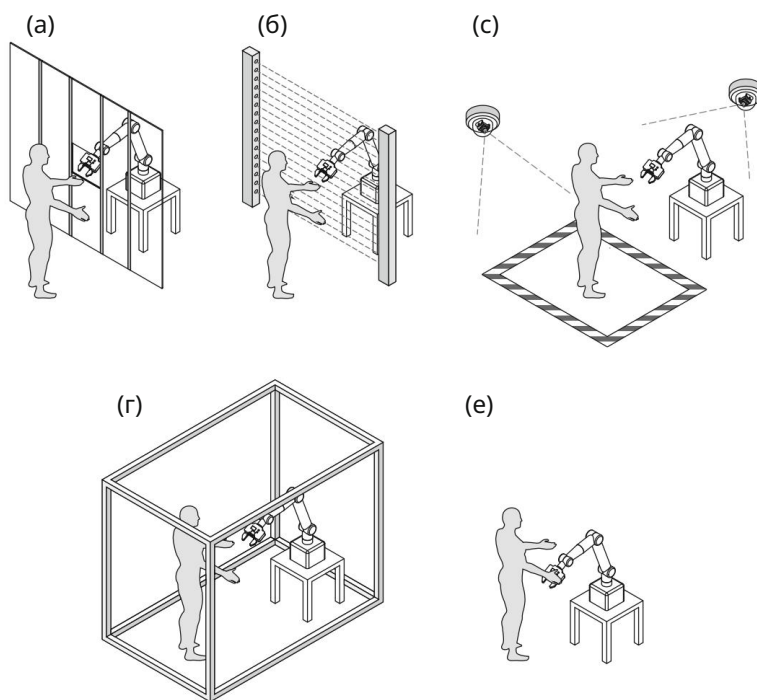


Рис. 12.10 Концептуальное применение коллаборативных роботов: а окно передачи, б окно интерфейса, с совместное рабочее пространство, d обзор и e робот с ручным управлением (ISO 10218-2:2011)

чувствительные охранники вокруг рабочей области, где приложение выполняется в автоматическом режиме без ограничений. Взаимодействие с оператором осуществляется через окно. Вблизи окна робот снижает скорость. Окно также выступает в качестве ограничения рабочего пространства робота.

Окно интерфейса (рис. 12.10б) выступает в качестве барьера для робототехнической системы. На Со стороны робота робот может выполнять автономные автоматические операции. Система роботов также охраняется стационарными или чувствительными охранниками вокруг рабочего места. Робот останавливается в окне интерфейса, а затем его можно вручную переместить за пределы интерфейса. Для управляемое движение робот должен быть оборудован ручным направляющим устройством. Этот метод используется для автоматической укладки, управляемой сборки, управляемого заполнения, испытаний, стендовых испытаний, и уборка.

Приложения, включая простую сборку и обработку, могут использовать преимущества совместное рабочее пространство (рис. 12.10в). В общем рабочем пространстве робот может выполнять автоматические операции. Когда оператор входит в рабочее пространство для совместной работы, робот снижает скорость и/или останавливается. В этом типе приложений необходимы дополнительные системы обнаружения людей, использующие один или несколько датчиков.

Приложения, включающие проверку и настройку параметров (например, сварка, см. рис. 12.10д), требуют охраняемого рабочего места и систем обнаружения присутствия людей.

Когда оператор входит в общую рабочую область, робот продолжает работу с сниженной скоростью. Приложение должно иметь дополнительные меры для предотвращения неправильного использования.

Роботы с ручным управлением (рис. 12.10e) используются для приложений с ручным управлением (например, сборка или покраска). Робот оснащен ручным направляющим устройством. Оператор вручную направляет робота по траектории в рабочем пространстве для конкретной задачи с уменьшенной скоростью. Площадь совместного рабочего пространства в основном зависит от опасности требуемое приложение.

Глава 13

Мобильные роботы



Мобильный робот — это устройство, способное передвигаться. Он может передвигаться по окружающей среде, используя колеса, гусеницы, ноги или их комбинацию. Он также может летать, плавать, ползать или кататься. Мобильные роботы используются для различных применений на заводах (автоматизированные транспортные средства), дома (устройства для мытья полов), больницах (перевозка продуктов и лекарств), в сельском хозяйстве (сбор фруктов и овощей, внесение удобрений, посадка), для военных, а также поисковых и спасательных работ. Они учитывают потребность в гибкой обработке материалов, потребность в том, чтобы роботы могли работать на больших конструкциях, и потребность в быстрой реконфигурации рабочих зон.

Хотя мобильные роботы передвигаются по-разному, в этой главе основное внимание будет уделено устройствам, использующим колеса для передвижения (ходячие роботы представлены в главе 14). В промышленных применениях автоматизированные управляемые транспортные средства (AGV) представляют особый интерес для перемещения материалов по производственному объекту или складу. Буксировщики обычно тянут тележки (рис. 13.1а), погрузчики используют плоскую платформу для транспортировки штучных грузов, сложенных на платформе (рис. 13.1б), а мобильные вилочные погрузчики используются для автоматического подъема и опускания грузов с различной высоты (рис. 13.1в). AGV обычно следуют маркерам или проводам в полу или используют зрение, магниты или лазеры для перемещения по объекту. Это организованное движение называется навигацией; процесс или действие для планирования и направления робота по маршруту или пути для безопасного перемещения из одного места в другое, не теряясь и не сталкиваясь с другими объектами.

Навигация обычно представляет собой сложную задачу, состоящую из локализации, планирования пути и управления движением. Локализация означает способность робота устанавливать собственное положение и ориентацию в глобальной системе координат. Автономное планирование пути представляет собой определение пути без столкновений для робота между начальной и конечной позициями между препятствиями, загроможденными в рабочей области. Это также включает взаимодействие между мобильными роботами и людьми, а также между группами мобильных роботов. Управление движением должно гарантировать выполнение движения по намеченной траектории с одновременным обходом препятствия.

В условиях совместной работы люди и роботы делят рабочее пространство, что приводит к необходимости улучшения связи между человеком и роботом и повышения осведомленности роботов о людях вокруг него. Обычно робот должен держаться на безопасном расстоянии от людей. Однако такие устройства, как

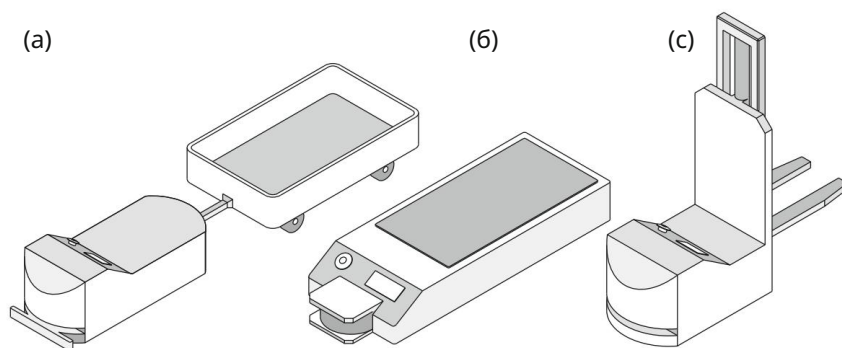


Рис. 13.1 Транспортные средства с автоматическим управлением: а буксир, б погрузчик и в вилочный мобильный погрузчик.

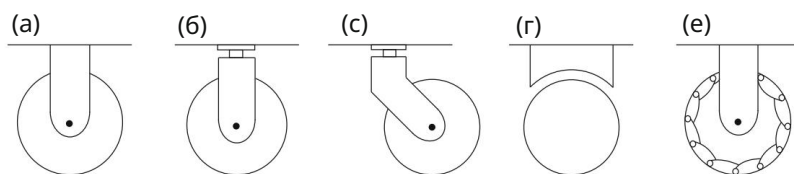


Рис. 13.2 Конструкции колес: а стандартное неподвижное колесо, б стандартное управляемое колесо, в самоустанавливающееся колесо, г сферическое колесо и д шведское колесо

роботы по уходу за собой требуют непосредственной близости между человеком и роботом и эти машины являются примерами передовых интерактивных систем человек-робот.

13.1 Кинематика мобильного робота

Благодаря простой механической конструкции колесо является наиболее популярным механизмом передвижения в мобильной робототехнике. Колеса обеспечивают сцепление, а три колеса гарантируют устойчивость баланс робота. Колеса могут быть выполнены в различных формах, как показано на рис. 13.2.

Неподвижное колесо, стандартное управляемое колесо и самоустанавливающееся колесо имеют первичную оси вращения и являются направленными. Движение в другом направлении невозможно без предварительного поворота колеса вокруг вертикальной оси. Сферическое колесо это всенаправленный, поскольку он позволяет двигаться во всех направлениях без предварительного руления. Шведское колесо пытается добиться всенаправленного поведения с прикрепленными пассивными роликами. по окружности колеса. Таким образом, колесо может двигаться по разным траектории, а также вперед и назад.

Выбор типа колес, количества колес, а также их привязка к роботу шасси существенно влияет на кинематику мобильного робота. Примеры кинематических схем показаны на рис. 13.3. Они варьируются от двухколесных до четырехколесных конфигураций. Две платформы в правой колонке являются всенаправленными.

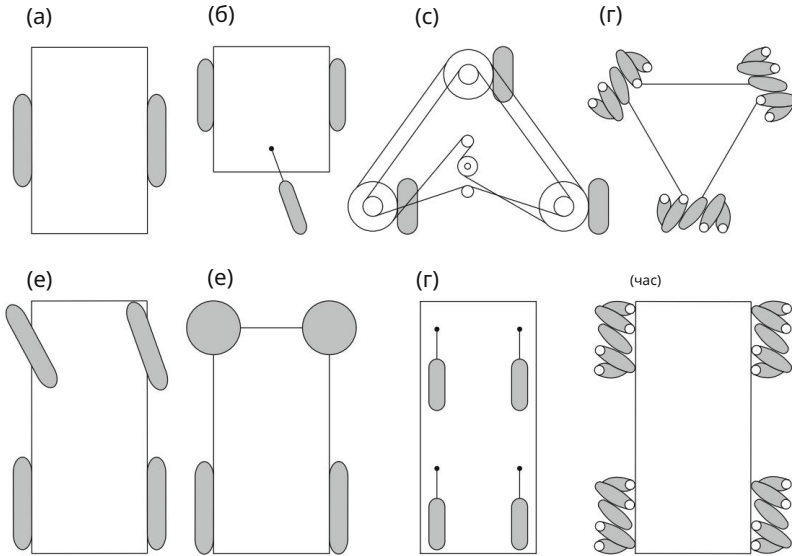


Рис. 13.3 Примеры конфигурации мобильного робота: а двухколесный дифференциальный привод, б дифференциальный привод с самоустанавливающимся колесом, с тремя синхронно моторизованными и управляемыми колесами, d тремя всенаправленными колесами в треугольнике, е четыре колеса с рулевым управлением как у автомобиля, f два дифференциальных ведущих колеса и два всенаправленные колеса, g четыре моторизованных и управляемых самоориентирующихся колеса, и h четыре всенаправленных колеса прямоугольной формы

Для целей анализа мобильный робот будет представлен в виде твердого тела на колеса, способные двигаться только в горизонтальной плоскости. С этими предположениями поза робота можно определить тремя координатами, две из которых представляют положение в горизонтальной плоскости и один, описывающий ориентацию вокруг вертикальной оси. связи представлены на рис. 13.4 для простого механизма дифференциального привода. Оси x_G и y_G определить глобальную систему координат. Локальная система координат робота определяется с помощью оси x_m и y_m . Ось x_m указывает направление движения робота вперед.

Положение и ориентация робота определяются следующим вектором

$$\mathbf{x} = \begin{matrix} x \\ y \\ \phi \end{matrix} \quad (13.1)$$

где координаты x и y определяют положение робота относительно глобальной координаты кадра и угол ϕ определяет его ориентацию (вращение вокруг вертикальной оси). Робот ориентация может быть описана также в виде матрицы поворота

$$P = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13.2)$$

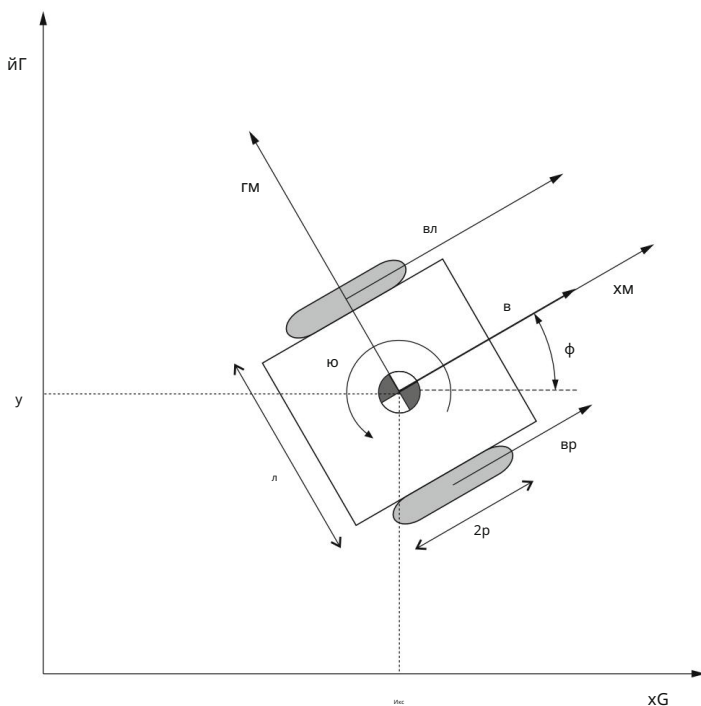


Рис. 13.4 Положение и ориентация мобильного робота — пример робота с дифференциальным приводом

Однородная матрица преобразования, описывающая положение мобильного робота, затем

$$T = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13.3)$$

Робот с дифференциальным приводом, представленный на рис. 13.4, имеет простую механическую конструкцию. Его движение основано на двух колесах с независимым приводом, прикрепленных по обеим сторонам корпуса робота. Робот меняет свое направление, изменяя относительную скорость вращения своих колес. Таким образом, он не требует дополнительного поворота руля. Если колеса движутся в одном направлении и с одинаковой скоростью, робот будет двигаться по прямой. Если колеса вращать с одинаковой скоростью в противоположные стороны, робот будет вращаться вокруг средней точки между колесами. В общем случае центр вращения робота может лежать где угодно на линии, проходящей через оси колес, и будет зависеть от скорости вращения каждого колеса и его направления.

Благодаря простой кинематике это идеальная модель для изучения движения роботов. Представляя ширину робота (расстояние между точками контакта шин с землей) как l и радиус колеса как r , можно проанализировать движение робота. Колеса вращаются с

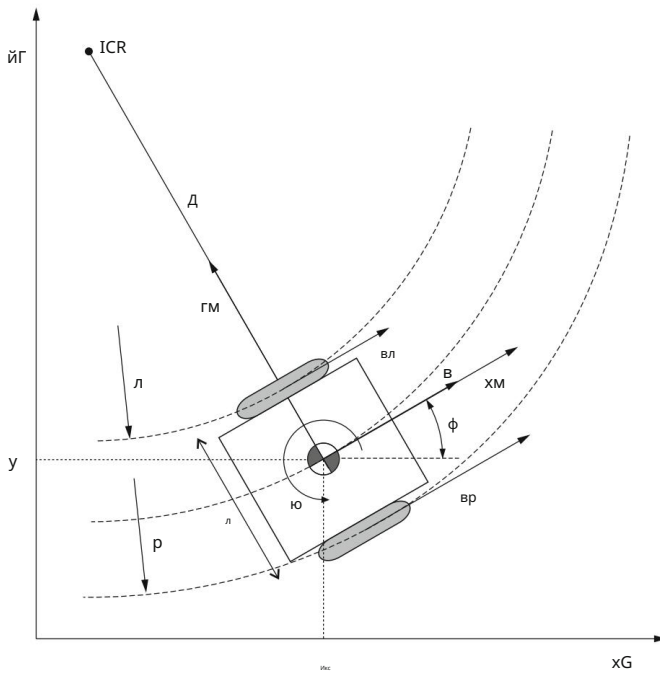


Рис. 13.5 Кинематика робота с дифференциальным приводом

угловые скорости ω_r (правое колесо) и ω_l (левое колесо), в результате чего скорости v_r и v_l правого и левого колеса соответственно

$$\begin{aligned} v_r &= \omega_r r, \\ v_l &= \omega_l r. \end{aligned} \quad (13.4)$$

Два вращения колеса приводят к поступательной скорости робота вдоль оси x_M робота и угловой скорости вокруг его вертикальной оси. Со ссылкой на рис. 13.5 угловая скорость может быть определена как

$$\omega = \frac{v_l}{D - \frac{r}{2}} = \frac{v_r}{D + \frac{r}{2}}, \quad (13.5)$$

где D — расстояние между средней точкой робота (в данном случае началом координат x_M - y_M) и точкой, определяющей мгновенный центр вращения (ICR). ICR — это точка в горизонтальной плоскости, вокруг которой вращается робот в конкретный момент времени. Из равенства в (13.5) можно вывести следующее соотношение

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{l} = \frac{r}{l} (\omega_r - \omega_l). \quad (13.6)$$

Тогда поступательная скорость вдоль оси x_M может быть определена как

$$v = \omega D = \frac{v r + \omega l}{2} \quad (13.7)$$

Уравнения (13.6) и (13.7) определяют связи между угловыми скоростями колес и скоростью мобильного робота. Однако с точки зрения управления более релевантной является обратная зависимость, которая определяет угловые скорости колес от желаемой скорости робота. Комбинируя (13.6) и (13.7), получаются следующие соотношения

$$\begin{aligned} \omega r &= \frac{2v + \omega l}{2r}, \\ \omega l &= \frac{2v - \omega r}{2r}. \end{aligned} \quad (13,8)$$

Скорость робота, определяемая парой $[v, \omega]$, определяется относительно локальной системы координат мобильного робота x_m-y_m . Скорость робота в глобальной системе координат x_G-y_G , определяемая как производная по времени вектора положения робота x (13.1), может быть вычислена путем вращения локально выраженной скорости с использованием матрицы вращения R (13.2) как

$$\begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \phi \\ v \sin \phi \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13,9)$$

Объединив поступательную и вращательную части приведенных выше уравнений и исключив элементы, равные нулю, скорость мобильного робота в глобальной системе координат можно записать как

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \phi \\ v \sin \phi \\ \omega \end{pmatrix} \quad (13.10)$$

Из уравнения (13.10) видно, что релевантными величинами для описания движения мобильного робота являются поступательная скорость робота вдоль оси x_m v , скорость вращения вокруг вертикальной оси ω и ориентация робота относительно глобальной системы координат ϕ . Имея это в виду, мы можем дополнительно упростить робота с дифференциальным приводом до модели одноколесного велосипеда (как показано на рис. 13.6). Теперь вышеупомянутые три величины описывают движение одноколесного велосипеда, представленного в виде одиночного колеса с отмеченным направлением вперед в середине робота с дифференциальным приводом на рис. 13.6. Одноколесный велосипед можно легко преобразовать обратно в робота с дифференциальным приводом на основе уравнения. (13.8).

Привлекательным свойством модели одноколесного велосипеда является ее простота. Поэтому он будет использоваться на протяжении всей этой главы для анализа. Однако в общем случае модель может быть преобразована обратно в любой другой кинематически более сложный мобильный робот. В качестве примера рассмотрим мобильную платформу, основанную на принципе управления автомобилем, показанном на рис. 13.7.

Геометрия рулевого управления автомобиля решает проблему колес внутри и снаружи поворота, которым необходимо описывать круги разного радиуса. Поэтому углы поворота левого и правого передних колес различны. В модели одноколесного велосипеда ориентация одноколесного велосипеда определяется углом ϕ , таким же, как ориентация робота с дифференциальным приводом.

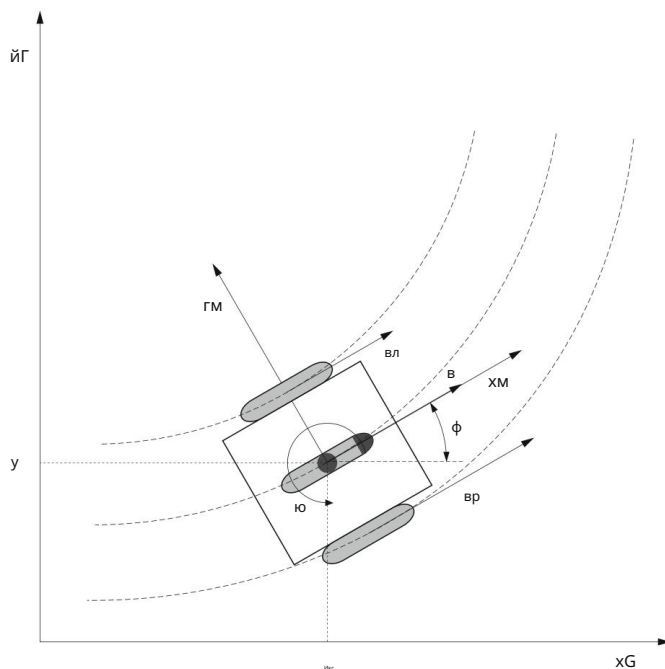


Рис. 13.6 Одноколенная модель мобильного робота с дифференциальным приводом

В задаче об автомобиле ориентация мобильного робота определяется углом ϕ . Модель одноколенного велосипеда расположена посередине передних колес, и ее ориентация определена таким образом, чтобы достичь того же мгновенного центра вращения, который определяется ориентацией левого и правого колес автомобиля. Уницикл теперь является третьим передним колесом, а ICR расположен в точке пересечения всех трех линий, перпендикулярных передним колесам. Угол ψ теперь определяется как отклонение ориентации уницикла от оси x_M робота (как показано на рис. 13.7). Вычислив угол ψ , мы установим связь между автомобильным роботом и одноколенным велосипедом.

Следуя тому же принципу, что и в (13.7), поступательная скорость одноколенного велосипеда можно определить как

$$v = D\omega, \quad (13.11)$$

где D — расстояние между унициклом и ICR. Затем расстояние D можно вычислить как

$$D = \frac{v}{\omega}. \quad (13.12)$$

Кривизна пути для одноколенного велосипеда K_v может быть определена как величина, обратная мгновенному радиусу вращения как

$$K_v = \frac{1}{D} = \frac{\omega}{v}. \quad (13.13)$$

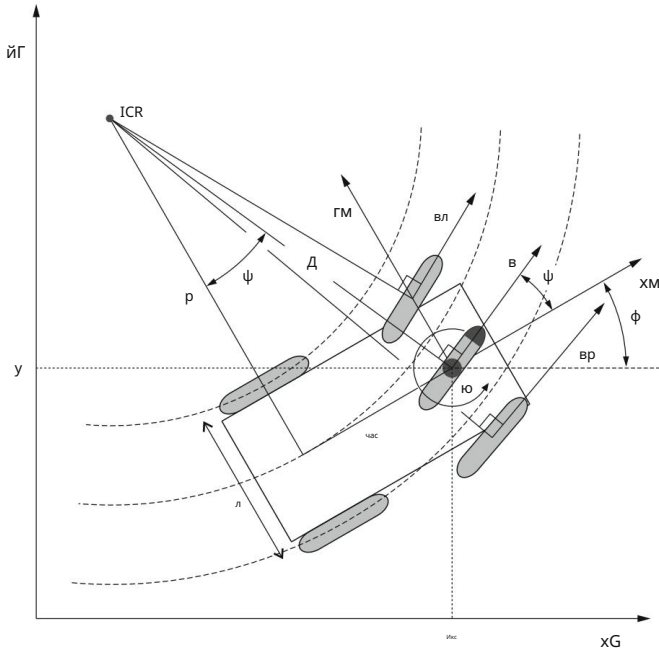


Рис. 13.7. Одноколенная модель автомобильного рулевого мобильного робота.

Рассматривая кинематику вагона, из рис. 13.7 можно записать следующее соотношение.

$$h = D \sin \psi, \quad (13.14)$$

где угол ψ — это также угол между прямыми D и R (расстояние между ICR и средней точкой между задними колесами транспортного средства), а h — расстояние между центром одноколесного велосипеда и средней точкой между задними колесами транспортного средства. робот. Затем расстояние D можно вычислить как

$$D = \frac{h}{\sin \psi} \quad (13.15)$$

и тогда кривизна автомобиля K_c определяется как

$$K_c = \frac{1}{D} \frac{h}{\sin \psi} \quad (13.16)$$

При равных K_c и K_u можно получить следующее соотношение

$$K_c = K_u \quad \sin \psi = \frac{\omega l}{V} \quad (13.17)$$

Наконец, угол ψ равен

$$\psi = \arcsin \frac{\omega l}{v} \quad (13.18)$$

Угол ψ — это желаемый угол поворота автомобиля, и его можно вычислить, зная скорость v , угловую скорость ω и ширину автомобиля l .

При определенной связи между одноколесным велосипедом и мобильным роботом с другой кинематикой анализ может быть основан на простой модели одноколесного велосипеда и обобщен на другого робота.

13.2 Навигация

Мобильные роботы часто работают в неизвестной и неструктурированной среде, и им необходимо самостоятельно локализоваться, планировать путь к цели, строить и интерпретировать карту среды, а затем управлять своим движением в этой среде.

13.2.1 Локализация

Важное различие между манипулятором и мобильным роботом заключается в оценке положения. Манипулятор имеет неподвижное основание, и, измеряя положения суставов робота и зная его кинематическую модель, можно определить положение его концевой эффектора. Мобильный робот может двигаться как единое целое в окружающей среде, и нет прямого способа измерить его положение и ориентацию. Общее решение состоит в том, чтобы оценить положение и ориентацию робота путем интегрирования движения (скорости) во времени.

Однако обычно требуются более точные, а часто и более сложные подходы. Если карта окружающей среды известна заранее, можно заранее спланировать маршруты движения мобильных роботов. Это особенно полезно, когда среда относительно статична и требуется надежная работа, например, в промышленных приложениях. Более сложные подходы основаны на динамическом планировании пути на основе информации датчиков и распознавания особенностей окружающей среды. Сначала робот определяет собственное положение и планирует свое движение по проходимым участкам. Когда рабочее пространство или задачи часто меняются, обычно лучше планировать динамически. Часто требуется компромисс между предварительным планированием и динамическим созданием планов. Чтобы упростить задачу, в окружении можно разместить маркеры. Эти маркеры легко распознаются датчиками робота и обеспечивают точную локализацию.

Автоматизированные транспортные средства в промышленных условиях используют различные технологии навигации/наведения: магнитную ленту, провод, магнитное пятно, лазер и естественные.

Локализация и планирование пути часто основаны на электрифицированных проводах, встроенных в пол, с использованием индуктивного наведения. На транспортном средстве установлен датчик направляющего пути. Провод можно заменить магнитной лентой или нарисованной линией (рис. 13.8а). В последнем

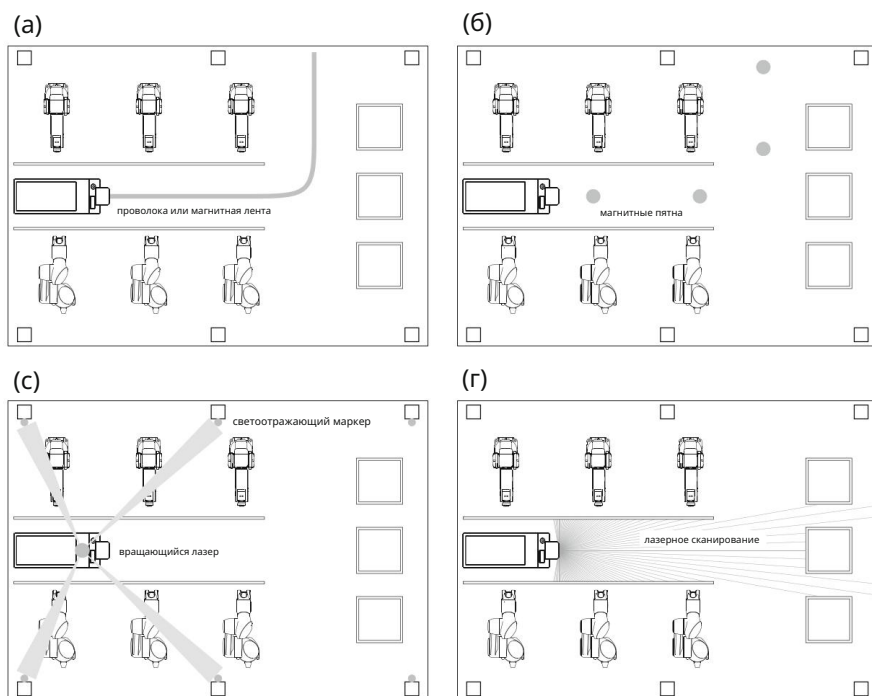


Рис. 13.8 Диск отвода датчиков от комплекта датчиков на борту робота

случае, когда робот использует камеру для определения своего положения относительно линии пола. Пути фиксированы и непрерывны. Уникальные маркеры могут быть размещены вдоль линии для обозначения конкретных позиций. Вместо того, чтобы размещать линии и маркеры на полу, маркеры (двухмерные узоры) также могут быть нанесены на потолок, чтобы их можно было идентифицировать с помощью бортовой камеры. Магнитное точечное наведение использует траекторию, отмеченную магнитными шайбами (рис. 13.8б). Пути открыты и изменчивы.

Напольные методы локализации часто заменяются лазерными методами.

Методы лазерной триангуляции, при которых вращающийся лазер измеряет дальность и азимут до настенных отражателей, обеспечивают точную информацию о местоположении без необходимости следовать определенным линиям на полу. Технология лазерного наведения использует несколько фиксированных опорных точек (отражающих полос), расположенных в пределах рабочей зоны, которые могут быть обнаружены лазерной головкой, установленной на транспортном средстве (рис. 13.8в). Поскольку объект нанесен на карту заранее, пути можно легко изменить и расширить.

Естественная навигация основана на информации о существующей среде, сканируемой лазерными сканерами с помощью нескольких фиксированных ориентиров (рис. 13.8д). Район наносится на карту заранее. Естественная навигация гибкая и одноразовая. Он подходит для сред, которые меняются часто, но незначительно. В замкнутых пространствах робот может следовать за стеной через окружающую среду, базируясь от стены.

Также внедряются системы внутреннего позиционирования на основе радио, которые позволяют локализовать робота так же, как и система глобального позиционирования на открытом воздухе. Локализация основана на триангуляции с фиксированными маяками, установленными на объекте, и датчиком, установленным на роботе. Расстояния рассчитываются путем измерения времени прохождения радиоволн от маяка до датчика.

13.2.1.1 Одометрия

Простой и часто используемый подход к локализации роботов заключается в том, чтобы полагаться на одометрию, которая использует информацию от датчиков движения (обычно колесных энкодеров) для оценки изменения положения с течением времени. Эти изменения положения накапливаются с использованием принципов интегрирования, обеспечивающих положение робота относительно начального положения. Метод чувствителен к ошибкам из-за интегрирования измерений скорости во времени для получения оценок положения.

Анализ движения робота начинается с понимания вклада каждого колеса в скорость робота. Для конкретного случая робота с дифференциальным приводом эти соотношения определены в (13.6) и (13.7). Скорость вращения колеса можно измерить непосредственно с помощью тахометра. Если такой датчик недоступен, скорость можно оценить путем численного дифференцирования положения, полученного от энкодеров.

В этом случае скорости для правого и левого колеса могут быть вычислены как

$$\begin{aligned} 2\pi r \frac{nr(t) - nr(t - \Delta t)}{N \Delta t} &= v_r, \\ 2\pi r \frac{nl(t) - nl(t - \Delta t)}{N \Delta t} &= v_l, \end{aligned} \quad (13.19)$$

где r — радиус колеса, N — разрешение энкодера в отсчетах на оборот, nr и nl — отсчеты энкодера правого и левого колеса в момент времени t соответственно, а $nr(t - \Delta t)$ и $nl(t - \Delta t)$ — те же самые величины в предыдущий момент дискретизации.

Затем можно оценить положение и ориентацию робота с помощью численного интегрирования. Уравнения (13.10) и рассмотрение (13.6) и (13.7) как

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t - \Delta t) + v \cos \phi(t - \Delta t) \Delta t, & \frac{v_r + v_l}{2} \\ y(t) &= y(t - \Delta t) + v \sin \phi(t - \Delta t) \Delta t, & \frac{v_r + v_l}{2} \\ \phi(t) &= \phi(t - \Delta t) + \omega \Delta t = \phi(t - \Delta t) + \frac{v_r - v_l}{l} \Delta t. \end{aligned} \quad (13.20)$$

Различные факторы снижают эффективность методов на основе одометрии для оценки положения робота. Очень важным фактором является проскальзывание колес, что значительно снижает точность определения положения. Производительность может быть улучшена за счет использования моделей ошибок и транспортного средства. Пятна на полу или магниты могут использоваться для исправления ошибок одометрии, которые накапливаются между этими точками. Одометрия также может

быть дополнена сенсорными измерениями с помощью лазеров, камер, систем радиочастотной идентификации и радиомаяков.

13.2.1.2 Одновременная локализация и сопоставление

Более продвинутые системы используют алгоритмы, которые одновременно выполняют подзадачи навигации (локализация, планирование пути). Подход, связанный с задачей построения карты неизвестной среды мобильным роботом при одновременной навигации по среде с использованием карты, называется одновременной локализацией и картографированием (SLAM). Наблюдая за одними и теми же объектами в нескольких проекциях с помощью датчиков, которые движутся вместе с транспортным средством, алгоритм SLAM накапливает и объединяет данные датчиков. Объединив оценку положения робота с собранной информацией, можно построить локальную карту, объединив имеющиеся данные. Со временем можно нанести на карту всю окружающую среду, а карты можно использовать для планирования маршрутов роботов.

SLAM состоит из нескольких частей, таких как извлечение ориентира, сопоставление данных, оценка состояния, обновление состояния и обновление ориентира. Есть много способов решить каждую из более мелких частей, но они выходят за рамки этой книги.

13.2.1.3 Диск абстракции датчиков

Когда мобильный робот движется в окружающей среде, он также должен наблюдать за своим окружением. Датчики на борту робота выявляют препятствия или неожиданные объекты на пути транспортного средства, и робот может планировать их обход, прежде чем вернуться на заранее запланированный маршрут. Типичный набор датчиков включает в себя инфракрасные датчики приближения, ультразвуковые датчики расстояния, лазерные сканеры, датчики зрения, тактильные датчики и датчики глобального позиционирования. Датчики стратегически размещены на борту робота и по его периметру. Каждый датчик предоставляет различную информацию с точки зрения количества, качества, диапазона и разрешения. Однако обычно информация со всех датчиков объединяется для получения точного изображения среды робота. Не занимаясь конкретно анализом отдельных датчиков и интеграцией сенсорной информации, можно предположить, что расстояние и направление ко всем препятствиям с точки зрения робота могут быть получены из комплекта датчиков. Диск абстракции датчика, представленный на рис. 13.9, является примером сенсорной интеграции, предоставляющей информацию о препятствиях в радиусе диска вокруг робота.

По известному положению do и ориентации ϕ_o препятствия и известному можно определить положение робота $[x, y, \phi]^T$, положение препятствия (x_o, y_o) глобальной системе координат как

$$\begin{aligned} x_o &= x + do \cos(\phi + \phi_o), y_o = y \\ &+ do \sin(\phi + \phi_o). \end{aligned} \quad (13.21)$$

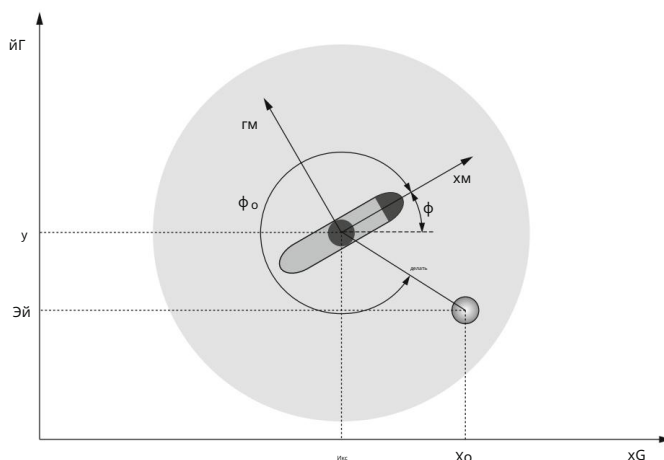


Рис. 13.9 Диск отвода датчиков от комплекта датчиков на борту робота

Следующий анализ будет основан на предположениях о модели одноколесного велосипеда. и информация об объектах, полученная с диска абстракции датчика.

13.2.2 Планирование пути

Планирование пути позволяет автономным мобильным роботам отслеживать оптимальный путь без столкновений от исходного положения до цели, не сталкиваясь с препятствиями в рабочей области. Идеальный планировщик пути должен уметь справляться с неопределенностями в воспринятой модели мира, минимизировать влияние объектов на робота и находить оптимальный путь за минимальное время, особенно если этот путь необходимо преодолевать регулярно.

В общем, планирование пути должно привести к пути с наименьшей возможной стоимостью, оно должно быть быстрым и надежным, а также универсальным по отношению к различным картам.

Для планирования маршрута (в режиме реального времени) доступны различные алгоритмы. Простой метод состоит в объединении отрезков прямых, соединенных вершинами. Другим стандартным методом поиска оптимального пути является алгоритм A* с его модификациями. Алгоритм находит направленный путь между несколькими точками, называемыми узлами. Среда робота, представленная картой, может быть разложена на свободное и занятое пространство. Затем можно выполнить поиск A*, чтобы найти кусочно-линейный путь через свободные узлы.

Для обхода препятствий можно использовать алгоритм искусственного потенциального поля. Алгоритм использует отталкивающие потенциальные поля вокруг препятствий, чтобы оттолкнуть робота, подверженного этому потенциалу, и использует притягивающее потенциальное поле вокруг цели, чтобы привлечь робота к цели. Отталкивающие и притягивающие поля изменяют траекторию движения робота. Алгоритм обеспечивает работу мобильного робота в режиме реального времени в сложной среде.

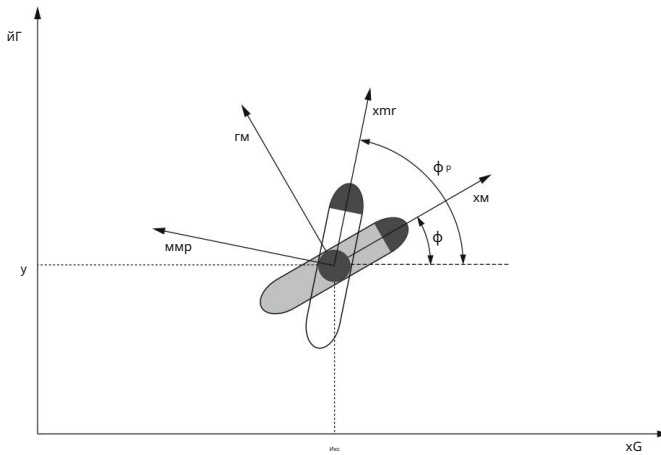


Рис. 13.10 Управление ориентацией моноцикла; серый одноколесный велосипед представляет собой настоящего робота, а белый одноколесный велосипед представляет желаемую ориентацию

13.2.3 Управление путем

Чтобы выполнить задачу, мобильному роботу необходимо переместиться из своего начального положения в желаемое конечное положение и ориентацию. Для управления транспортным средством на его пути требуется система управления.

13.2.3.1 Контроль ориентации

На основе модели одноколесного велосипеда, представленной на рис. 13.10, сначала будет рассмотрено управление ориентацией. Аналогичный подход был бы справедлив для мобильных роботов, которые могут менять ориентацию, не меняя своего положения (робот с дифференциальным приводом является таким транспортным средством, а автомобиль - нет).

Цель управления – минимизировать ошибку ориентации

$$\phi^- = \phi_r - \phi, \quad (13.22)$$

где ϕ_r — желаемая ориентация, а ϕ — фактическая ориентация. Мы предполагаем, что управление основано на пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) подходе управления.

$$PID(\phi)^- = K_p \phi^- + K_i \int \phi^- dt + K_d \dot{\phi}^- \quad (13.23)$$

или одна из его подверсий, например, пропорционально-дифференциальный контроллер. Тогда желаемая угловая скорость мобильного робота может быть вычислена как

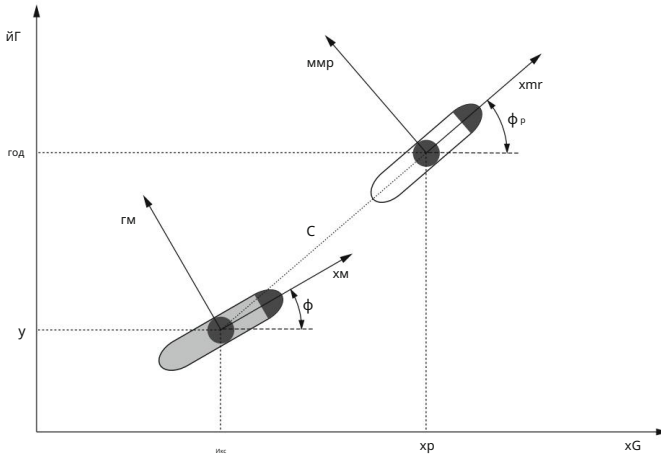


Рис. 13.11 Управление положением и ориентацией моноцикла; серый одноколесный велосипед представляет собой настоящего робота, а белый одноколесный велосипед представляет собой цель

$$\omega = K_p \ddot{\phi} + K_i \dot{\phi} + K_d \phi \quad (13.24)$$

Следует отметить, что углы являются периодическими функциями, и если мы примем конфигурацию

$$\phi = 0 \quad \phi = 2\pi \quad \ddot{\phi} = -2\pi, \quad (13.25)$$

робот совершит один оборот, прежде чем достигнет конечной ориентации. Обычно это нежелательное поведение робота. Следовательно, ошибка ориентации должна быть ограничена, чтобы требовалось максимальное вращение на π радиан в любом направлении.

$$\ddot{\phi} \in [-\pi, \pi]. \quad (13.26)$$

Простое решение состоит в том, чтобы использовать четырехквadrантную функцию арктангенса в качестве

$$\ddot{\phi} = \arctan(\sin \phi, -\cos \phi) \in [-\pi, \pi]. \quad (13.27)$$

При сочетании (13.27) и (13.24) робот достигнет желаемой ориентации, не поворачиваясь более чем на половину окружности в положительном или отрицательном направлении.

13.2.3.2 Управление положением и ориентацией

Мобильный робот обычно перемещается из своего начального местоположения в конечное (целевое) местоположение, что требует изменения положения и ориентации. Поскольку роботу необходимо переместиться в целевое местоположение, мы будем называть эту задачу переходом к цели. На рис. 13.11 представлены такие

условия. Фрейм координат $x_m - y_m$ определяет текущее положение робота, а кадр $x_{mr} - y_{mr}$ определяет целевое положение. Отрезок линии S представляет кратчайший путь для выполнения задачи.

Желаемая ориентация робота для выполнения задачи может быть определена как угол между отрезком линии S и горизонтальной осью глобальной системы координат. Зная требуемое положение (x_r, y_r) и текущее положение робота (x, y) , угол ϕ_r можно вычислить в каждый момент времени во время движения робота как

$$\phi_r = \arctg x_r \frac{y_r - y}{x} . \quad (13.28)$$

Предполагая, что робот движется с постоянной скоростью поступательного движения v_0 , движение робота в глобальной системе координат можно описать следующей системой уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_0 \cos \phi, \dot{y} \\ &= v_0 \sin \phi, \dot{\phi} = \omega \\ \omega &= \text{PID}(\phi). \end{aligned} \quad (13.29)$$

При таком подходе целью управления является поддержание постоянной скорости v_0 и отслеживание желаемого угла ϕ_r , вычисляемого по (13.28). Если мы предположим робота с дифференциальным приводом, угловые скорости колес можно вычислить из (13.8) как

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{2v_0 + \omega l}{2p}, \\ \omega_l &= \frac{2v_0 - \omega l}{2p}. \end{aligned} \quad (13.30)$$

При движении с постоянной скоростью v_0 робот будет промахиваться мимо цели. Поэтому разумно определять скорость движения робота вперед исходя из расстояния до цели.

$$G = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}. \quad (13.31)$$

С пропорциональным регулятором желаемая скорость может быть определена как

$$v_r = K_v \dot{G}, \quad (13.32)$$

где K_v — прирост скорости. Тогда уравнения (13.29) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_r \cos \phi, \dot{y} \\ &= v_r \sin \phi, \dot{\phi} = \omega \\ \omega &= \text{PID}(\phi) \end{aligned} \quad (13.33)$$

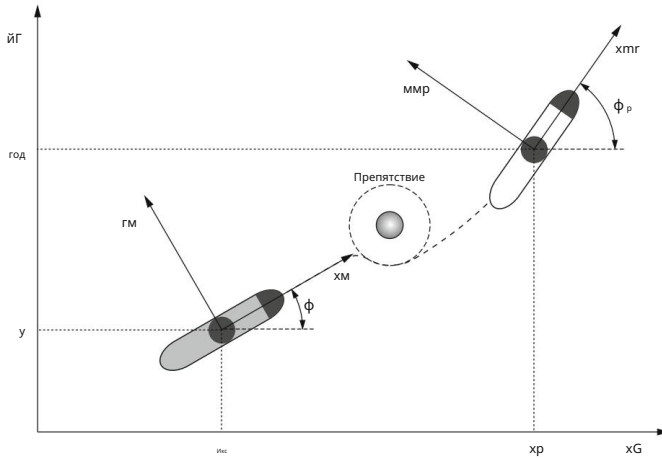


Рис. 13.12 Управление положением и ориентацией уницикла с обходом препятствий; серый одноколесный велосипед представляет собой реального робота, а белый одноколесный велосипед представляет цель; серый круг — это препятствие, а пунктирная круговая линия — безопасная зона вокруг препятствия

а в (13.30) v_0 нужно заменить на v_G . При таком подходе робот будет замедляться при приближении к цели. Поскольку желаемая скорость увеличивается с расстоянием до цели, можно установить максимальный предел для v_G $[0, v_{Gmax}]$.

13.2.3.3 Обход препятствий

На рис. 13.12 показаны условия с препятствием на пути робота к целевому положению.

Робот не может двигаться прямо к целевому местоположению, не избежав препятствия.

Основываясь на концепции диска абстракции датчика, мы предполагаем, что робот способен обнаруживать и определять местонахождение препятствия с безопасного расстояния и, используя эту информацию, может планировать действия по его предотвращению.

Препятствие на рис. 13.12 представлено серым кружком, а пунктирная круговая линия вокруг препятствия обозначает безопасную зону вокруг препятствия. Роботу не будет позволено войти в пунктирную

Имея это в виду, теперь у нас есть две контрольные цели. Первый – это движение к цели, а второй – уклонение от препятствия. Более подробное представление двух целей управления показано на рис. 13.13, где u_G указывает расстояние от робота до препятствия, u_G — управляющая переменная, связанная с задачей «достичь цели», а u_O — управляющая переменная, связанная с избеганием. - цель препятствия. Чтобы успешно выполнить задание, u_G должен указывать на цель, а u_O должен указывать в сторону от препятствия. Фактическая управляющая переменная u является результатом смешивания u_G и u_O .

Часть управления движением к цели может быть определена на основе расстояния до положения цели как

$$u_{G_} = k_G \frac{x_p - x}{y_G - y} \quad (13.34)$$

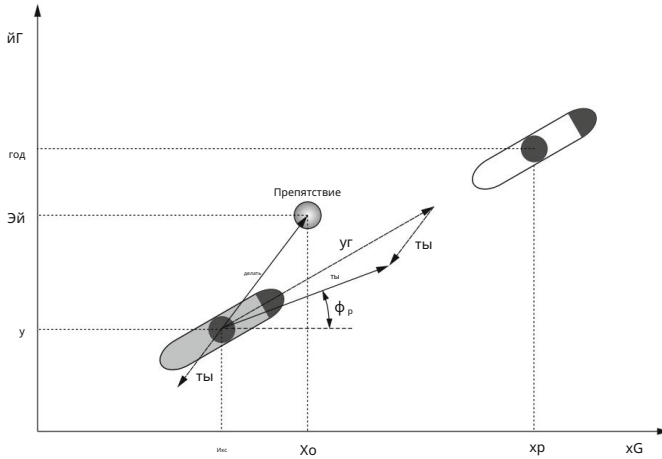


Рис. 13.13 Обездвиживание моноцикла; серый одноколесный велосипед представляет собой реального робота, белый одноколесный велосипед представляет собой цель, а серый круг представляет собой препятствие

Точно так же переменная управления уклонением от препятствия может быть определена на основе расстояния до препятствия.

$$\begin{matrix} \text{уокс} \\ \text{уой} \end{matrix} = K_0 \begin{matrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{matrix} \quad (13.35)$$

Следует отметить, что u_g указывает на цель, а u_o указывает в сторону от препятствия, как видно из определения расстояний в двух приведенных выше уравнениях. Смещение двух управляющих переменных должно производиться на основе расстояния до препятствия, которое определяется как

$$\text{дo} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (13.36)$$

Когда робот находится далеко от препятствия, ему нужно только двигаться прямо к цели. Однако вблизи препятствия первостепенной задачей становится уклонение от препятствия. Последовательно, смешивание может быть реализовано как

$$\begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} = \lambda(\text{дo}) \begin{matrix} u_{ox} \\ u_{oy} \end{matrix} + (1 - \lambda(\text{дo})) \begin{matrix} u_{gx} \\ u_{gy} \end{matrix}, \quad \lambda(\text{дo}) \in [0, 1]. \quad (13.37)$$

Параметр λ можно, например, определить как экспоненциальную функцию на основе функции к препятствию $\lambda = 1 - e^{-k \cdot \text{дo}}$, а параметр k определяет скорость сходимости к 1. Как видно из рис. 13.13, управляющая переменная u определяет желаемого робота. скорости в глобальной системе координат

$$\begin{matrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{matrix} = \begin{matrix} u_x \\ u_y \end{matrix} \quad (13.38)$$

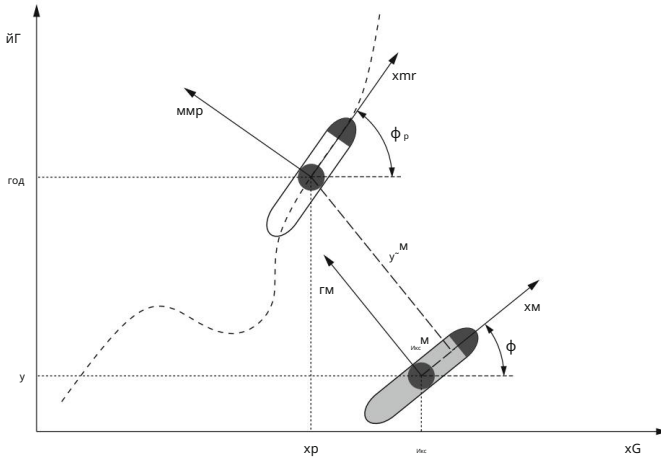


Рис. 13.14. Следование по траектории одноколенного велосипеда; серый одноколенный велосипед представляет собой реального робота, а белый одноколенный велосипед представляет собой виртуальный автомобиль на пути

Затем можно вычислить желаемую ориентацию робота как

$$\phi_r = \arctg \frac{u_y}{u_x}, \quad (13.39)$$

в результате угловая скорость

$$\dot{\phi} = \omega = \text{ПИД}(\phi). \quad (13.40)$$

Скорость робота вперед может быть вычислена как

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = v \frac{\cos^2 \phi + v^2 \sin^2 \phi}{2} = u^2 \frac{2 + \tan^2 \phi}{2}. \quad (13.41)$$

Опять же, если принять робота с дифференциальным приводом, угловые скорости колес можно вычислить по (13.8).

13.2.3.4 Отслеживание пути

Часто робот не может просто выбрать кратчайший путь к цели и должен следовать заранее заданному пути. В этом случае цель управления состоит в том, чтобы остаться на пути. Задачу можно упростить, если рассмотреть виртуальный автомобиль, который движется по пути с заданной скоростью. Тогда целью управления становится слежение за виртуальным транспортным средством, как показано на рис. 13.14.

Ошибка слежения может быть определена как

$$\tilde{x} = x_g - x, \quad (13.42)$$

где x_g и x представляют положение и ориентацию виртуального транспортного средства и мобильного робота соответственно. Все величины выражаются в глобальной системе координат и могут быть преобразованы в систему координат робота как

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}^M \\ \tilde{y}^M \\ \tilde{\phi}^M \end{pmatrix}_{Икс} = P^T \begin{pmatrix} \tilde{x}^T \\ \tilde{y}^T \\ \tilde{\phi}^T \end{pmatrix}_{Икс}, \quad (13.43)$$

где P определяется как в (13.2). Скорость движения робота вперед может быть рассчитана по ошибке слежения по оси x м как

$$v = K_x \tilde{x}^M, \quad (13.44)$$

где K_x — пропорциональный коэффициент усиления регулятора. Угловая скорость должна учитывать ошибку слежения за углом $\tilde{\phi} = \phi - \phi^M$, а также расстояние до пути $\tilde{y}^M$. А именно, когда робот находится в стороне от пути, он должен направиться к пути. Таким образом, алгоритм управления становится

$$\omega = K_y \tilde{y}^M + K_\phi \tilde{\phi}^M, \quad (13.45)$$

где K_y и K_ϕ — пропорциональные коэффициенты усиления регулятора. Поскольку скорость виртуального транспортного средства известна (угловая скорость может быть вычислена как изменение тангенциального направления вдоль пути при движении виртуального транспортного средства вперед), ее можно учитывать в качестве члена упреждающего управления. Если v_r скорость движения виртуального транспортного средства и ω_r его угловая скорость, уравнения (13.44) и (13.45) могут быть переписаны с членом прямой связи как

$$v = v_r \cos \tilde{\phi}^M + K_x \tilde{x}^M \quad (13.46)$$

и

$$\omega = \omega_r + K_y \tilde{y}^M + K_\phi \tilde{\phi}^M. \quad (13.47)$$

Глава 14

Гуманоидная робототехника



Еще до того, как начала развиваться современная робототехника, философы, инженеры и художники интересовались машинами, похожими на человека. Первым известным образцом человекоподобного механизма, конструкция которого сохранилась и может быть восстановлена сегодня, является механический рыцарь, созданный Леонардо да Винчи и подаренный миланскому правителю Людовико Сфорца около 1495 года. нынешних человекоподобных роботов, и он мог двигаться с помощью системы тросов и шкивов.

Совсем недавно такие писатели, как Карел Чапек и Исаак Азимов, думали о роботах, которые имеют форму, похожую на человека. Есть несколько причин, по которым роботы-гуманоиды считаются интересными:

- Человеческая среда создана для людей, поэтому робот общего назначения, предназначенный для человеческой среды, например, домов, фабрик, больниц, школ и т. д., должен иметь форму, подобную человеческой, чтобы успешно работать в такой среде. • Для людей более естественно взаимодействовать и общаться с роботами, которые выглядят и вести себя как люди.
- Робот-гуманоид может служить экспериментальным инструментом для проверки теорий о человеческом поведении, созданных вычислительными нейробиологами, интересующимися тем, как работает человеческий мозг.

Можно сказать, что современная гуманоидная робототехника началась с серии гуманоидных роботов, созданных в Университете Васэда в Токио, Япония. Первым из таких роботов стал WABOT-1, созданный в 1973 году.

Несмотря на недавний прогресс в смежных областях, таких как мягкая робототехника и искусственный интеллект, роботы-гуманоиды, которые могут работать в среде, населенной людьми, где они сотрудничают и общаются с людьми естественным образом, пока остаются лишь далекой мечтой. В настоящее время человекоподобные роботы находятся на той стадии, когда они могут выполнять самые разные задачи. Задачи, которые используются, например, в соревнованиях роботов-гуманоидов, например DARPA Robotics Challenge, включают:

1. Вождение: ведите грузовой автомобиль по переулку, заблокированному шлагбаумами.
2. Выход: выйти из машины и переместиться в указанное место.
3. Дверь: откройте дверь и пройдите через дверной проем.
4. Клапан: поверните клапан, приводимый в действие маховиком.

5. Стена: используйте инструмент (дрель или пилу), чтобы прорезать бетонную панель.
6. Задание-сюрприз, о котором не знали до дня соревнований: убрать магнитную вилку из одной розетки, вставьте ее в другую розетку.
7. Щебень: пересечь поле обломков или преодолеть пересеченную местность.
8. Лестница: поднимитесь по лестнице.

Современные гуманоидные роботы уже могут выполнять такие задачи автономно, при условии, что приблизительное состояние окружающей среды известно заранее. Однако современным роботам-гуманоидам по-прежнему сложно выполнять такие задачи без некоторой предварительной информации об условиях окружающей среды, которые программист может использовать для подготовки робота-гуманоида к выполнению нескольких задач. Интеграция и непрерывная последовательность нескольких действий робота остается проблемой, и при выполнении более длительных последовательностей задач по-прежнему требуется некоторая степень дистанционного управления.

В то время как большинство стандартных методологий робототехники, касающихся кинематики роботов, динамики, управления, планирования траектории и датчиков, применимы и при разработке роботов-гуманоидов, робототехнике-гуманоидам необходимо решать несколько специфических проблем. В первую очередь это проблема двуногого передвижения и равновесия. В отличие от других роботов, роботы-гуманоиды должны ходить и сохранять равновесие во время своей работы. В вышеупомянутой задаче робототехники передвижение оказалось одной из самых больших проблем. Базовым показателем, описывающим равновесие робота-гуманоида, является понятие точки нулевого момента, обычно обозначаемое аббревиатурой ZMP. Концепция ZMP была введена Миомиром Вукобратовичем в 1968 году. Это до сих пор наиболее широко используемый подход для создания динамически устойчивых движений ходьбы, при котором опорная ступня или ступни постоянно находятся в контакте с поверхностью земли. Это важно для предотвращения падения робота. Основные понятия, связанные с ZMP, описаны в разд. 14.1.

Еще одна специфическая проблема, возникающая при программировании роботов-гуманоидов, — это очень большое количество степеней свободы, которые им требуются по сравнению со стандартными промышленными роботами. В то время как типичные промышленные роботы имеют только 6 и редко 7 степеней свободы, роботы-гуманоиды часто имеют более 30 степеней свободы. Например, один из самых известных роботов-гуманоидов Honda Asimo имеет 34 степени свободы: 3 в голове, по 7 в каждой руке (3 в плече, 1 в локте и 3 в запястье), 1 в талии, По 6 на каждую ногу и по 2 на каждую руку. Такое большое количество степеней свободы делает непрактичным классическое программирование роботов с обучающими подвесками и языками текстового программирования. Вместо этого мы можем использовать сходство между человекоподобными роботами и людьми. Из-за этого сходства человекоподобные роботы могут выполнять задачи так же, как и люди. Этот факт порождает идею о том, что вместо программирования робота-гуманоида учитель-человек может показать роботу, как выполнять желаемую задачу. Затем робот может попытаться воспроизвести человеческую казнь. Такой способ программирования роботов называется программированием путем демонстрации или имитационного обучения. Для его успешного применения необходимо, чтобы робот перенес демонстрируемое движение в свою собственную кинематическую и динамическую структуру. Кроме того, поскольку природная среда редко бывает статической, но часто меняется, робот не может просто воспроизводить наблюдаемые движения.

Вместо этого наблюдаемые движения должны быть адаптированы к текущим условиям окружающей среды. Эти темы обсуждаются в разд. 14.2.

14.1 Двухногое передвижение

Движение двухногих — важная тема гуманоидной робототехники. Здесь мы сосредоточимся на ходьбе, которая отличается от других форм передвижения двухногих, таких как бег, тем ограничением, что по крайней мере одна нога всегда должна соприкасаться с землей. Как объяснялось во введении, большинство современных роботов-гуманоидов используют принцип точки нулевого момента для создания стабильных моделей ходьбы.

14.1.1 Точка нулевого момента

На протяжении всего этого раздела мы предполагаем, что пол плоский и ортогонален силе тяжести. Начнем с анализа распределения вертикальной составляющей сил реакции земли (т. е. составляющей, ортогональной земле, как показано на рис. 14.1). Точка нулевого момента определяется как точка, в которой равнодействующая этих сил пересекается с землей. Сначала сосредоточимся на движении в сагиттальной плоскости (т. е. в плоскости, которая делит тело на левую и правую части). Как показано на рис. 14.1, составляющая силы реакции опоры, ортогональная земле, должна быть положительной во всех точках контакта, иначе ступня потеряет контакт с землей, так как не закреплена жестко на ней. Точка нулевого момента r_x в соответствии с приведенным выше определением может быть рассчитана следующим образом

$$r_{кс} = \frac{\int_{x_b}^{x_f} x f_z(x) dx}{\int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx}, \quad (14.1)$$

$$f_n = \int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx, \quad (14.2)$$

где $f_z(x)$ — вертикальная составляющая силы реакции земли в точке контакта x , а f_n — результирующая вертикальная сила реакции земли. Причина, по которой r_x называется точкой нулевого момента, становится понятной, если вычислить момент в r_x :

$$\begin{aligned} \tau(r_{кс}) &= - \frac{\int_{x_b}^{x_f} (x - r_{кс}) f_z(x) dx}{\int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx} = - \frac{\int_{x_b}^{x_f} x f_z(x) dx}{\int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx} + \frac{r_{кс} \int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx}{\int_{x_b}^{x_f} f_z(x) dx} \\ &= (r_{кс} - r_{кс}) = 0. \end{aligned} \quad (14.3)$$

Здесь мы интегрировали момент $\tau = (x - r_{кс}) f_z$ по всей площади подошвы, т. е.

$\int_{x_b}^{x_f} (x - r_{кс}) f_z(x) dx$. Таким образом, чистый момент в точке нулевого момента r_x равен нулю. x_b точка нулевого момента обычно обозначается аббревиатурой ZMP. Это точка на поверхности земли, где суммарный угловой момент равен нулю. Если он существует, ZMP должен лежать в пределах полигона поддержки.

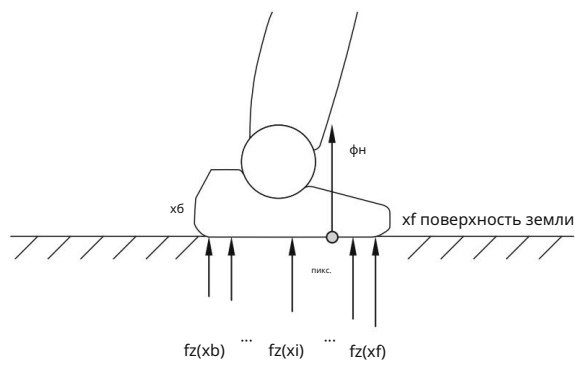


Рис. 14.1 Силы реакции земли $f_z(x_i)$ в различных точках контакта x_i . Точка нулевого момента p_x и результирующая сила реакции земли, ортогональная опорной поверхности f_n , рассчитываются в соответствии с уравнениями (14.1) и (14.2) соответственно

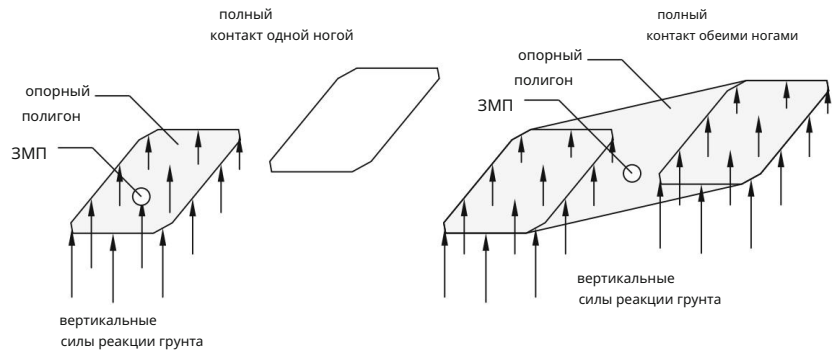


Рис. 14.2 Опорный многоугольник (область, обведенная серой линией) определяется как выпуклая оболочка всех точек, соприкасающихся с землей. Слева: полигон опоры соответствует области подошвы, когда только одна ступня полностью соприкасается с землей. Справа: опорный многоугольник соответствует выпуклой оболочке углов обеих ступней, когда обе ступни полностью соприкасаются с землей.

Для обычного робота-гуманоида, передвигающегося в трехмерном пространстве, также следует учитывать боковое движение. Как показано на рис. 14.2, мы должны различать два случая: либо только одна ступня полностью соприкасается с землей, либо обе ступни полностью соприкасаются с землей. Земля считается плоской на высоте p_z . Вывод ЗМП основан на соотношении между моментом относительно точки $p = (p_x, p_y, p_z)$ вертикальной силы реакции грунта $[0, 0, f_z(\xi)]$ во всех точках $\xi = (\xi_x, \xi_y, p_z)$ на контактной поверхности. Момент задается

$$\tau(p) = \begin{pmatrix} \xi_y & p_y \\ \xi_x & p_x \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_z(\xi) \end{pmatrix} \quad (14.4)$$

Для получения момента относительно точки $p = (p_x, p_y, p_z)$ за счет ортогональных сил реакции основания $[0, 0, f_z(\xi)]$, возникающих во всех точках контакта ξ подошвы с грунтом, необходимо проинтегрировать по всем точкам контакта

$$M(p) = \int_C \begin{pmatrix} \xi_x & p_x \\ \xi_y & p_y \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_z(\xi) \end{pmatrix} dS = \int_C \begin{pmatrix} \xi_y & p_y \\ \xi_x & p_x \end{pmatrix} f_z(\xi) dS, \quad (14.5)$$

где S обозначает площадь контакта. Как и в двумерном случае, точка на земле, где момент нормали к силе реакции основания становится равным нулю (т.е. точка нулевого момента $M(p) = 0$), определяется выражением

$$p = \begin{pmatrix} \text{пикс.} \\ \text{пи} \\ \text{пз} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"="} \\ \frac{\int_C \xi_x f_z(\xi) dS}{\phi_n}, \frac{\int_C \xi_y f_z(\xi) dS}{\phi_n}, \text{пз} \end{pmatrix}, \quad (14.6)$$

где

$$\phi_n = \int_C f_z(\xi) dS \quad (14.7)$$

представляет собой сумму сил реакции земли, ортогональных земле во всех контактах между подошвой и землей.

На реальном роботе-гуманоиде ZMP (если он существует) гарантированно лежит в пределах опорного многоугольника, поскольку при наличии контакта подошвы с поверхностью земли ортогональная к земле составляющая силы реакции земли должна быть положительной. В противном случае контакт между подошвой и поверхностью земли будет потерян, так как робот не закреплен на земле и, следовательно, не может генерировать отрицательные вертикальные силы реакции земли. Робот-гуманоид может управлять своей позой ногами только в том случае, если ZMP существует внутри опорного полигона. В противном случае робот теряет контакт с землей и больше не может контролировать позу ногами.

14.1.2 Генерация моделей ходьбы

При двуногой ходьбе ноги робота чередуются между двумя фазами:

- фаза опоры, в которой положение стопы не должно меняться,
- фаза переноса, в которой стопа движется.

На рис. 14.3 показаны эти две отдельные фазы цикла ходьбы: когда обе ступни соприкасаются с землей, робот находится в фазе двойной опоры. Ноги в этой фазе не двигаются. Как только одна из ног начинает двигаться, робот переходит из фазы двойной поддержки в фазу одинарной, при которой движется одна из двух ног. За фазой одинарной опоры следует еще одна фаза двойной опоры, как только ступня в фазе маха устанавливает контакт с землей.

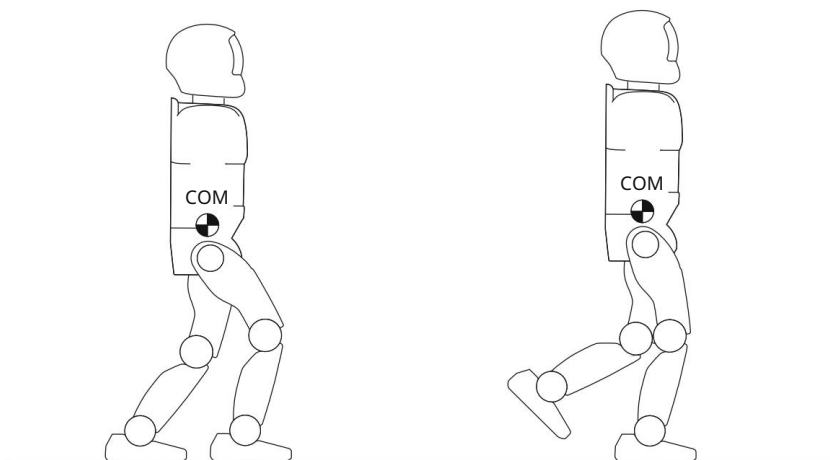


Рис. 14.3 Одинарная и двойная опорная фаза. В фазе двойной опоры обе ноги соприкасаются с землей, и вес робота поддерживается обеими ногами. В фазе одиночной опоры одна нога находится в движении, а другая нога, поддерживающая робота, находится в контакте с землей.

При ходьбе на основе ZMP одна или обе ноги робота всегда соприкасаются с землей. Таким образом, ZMP существует, и робот может удерживать равновесие, следя за тем, чтобы опорный полигон содержал ZMP. Однако робот не может напрямую управлять ZMP, как определено в уравнениях (14.1) и (14.6). Поэтому мы вводим понятие центра масс (ЦМ). ZMP можно контролировать, используя его связь с COM.

Центр масс (ЦМ) определяется как среднее положение всех частей тела робота-гуманоида, взвешенное с массой частей тела. Для робота с жесткими звеньями D COM можно рассчитать как:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^D m_i c_i}{M}, \quad M = \sum_{i=1}^D m_i, \quad (14,8)$$

где m_i — масса i -го звена, а c_i — его положение, которое можно вычислить по прямой кинематике, если известен центр масс каждого звена в локальных координатах звена. С некоторыми приближениями связь между ZMP и COM можно определить следующим образом.

$$p_x = c_x - \frac{(c_z - p_z)c''_x}{c''_z + g}, \quad (14,9)$$

$$p_y = c_y - \frac{g(c_z - p_z)c''_y}{c''_z + g}, \quad (14.10)$$

где p_z — высота первого этажа, g — гравитационная постоянная, $c = (c_x, c_y, c_z)$ и $p = (p_x, p_y, p_z)$ — координаты COM и ZMP соответственно.

Заметим, что если робот находится в состоянии покоя, т.е. $\ddot{x} = \ddot{y} = 0$, то ZMP и проекция COM совпадают, так как $p_x = c_x$ и $p_y = c_y$. Заметим также, что если земля плоская и ортогональна силе тяжести, как мы предполагали в разд. 14.1.1, p_z — константа.

Обычно мы различаем статическую и динамическую ходьбу. Статическая ходьба определяется как любое устойчивое движение ходьбы, при котором проекция COM всегда остается внутри опорного полигона. Это означает, что если робот в какой-то момент при ходьбе полностью перестанет двигаться, то он не упадет, так как для покоящегося робота проекция ЦМ на поверхность земли равна ZMP (см. уравнения (14.9) и (14.10)). При статической ходьбе движение обычно должно быть медленным, чтобы проекция ЦМ была близка к ZMP. Этот вид ходьбы обычно требует больших ступней и сильных голеностопных суставов, чтобы генерировать достаточную силу в лодыжках. По мере того, как движение робота становится быстрее, ZMP и проекция COM становятся более разными, и стабильность не может быть обеспечена за счет управления только проекцией COM.

Более эффективное поведение при ходьбе создается динамическими шаблонами ходьбы, где проекция COM не равна ZMP и может выходить за пределы полигона поддержки в течение некоторого периода движения. Схема динамической ходьбы на основе ZMP показана на рис. 14.4. Такие шаблоны планируются таким образом, чтобы ZMP оставалась в пределах границ полигона опоры на всех этапах ходьбы. Это можно сделать следующим образом:

- Задайте декартово движение ног робота. Здесь задается длина шага робота и время движения стопы.
 - Укажите опорную траекторию ZMP, чтобы ZMP оставался в пределах опоры полигона на все времена.
 - Определите движение верхней части тела робота-гуманоида, чтобы реализовать эталонное движение ZMP. Это может быть достигнуто с помощью уравнений. (14.9) и (14.10).
- Наконец, движения ног робота-гуманоида рассчитываются на основе тела и ступней.

движение с использованием инверсной кинематики.

Движение COM не полностью определяется уравнениями. (14.9) и (14.10), так как есть только два уравнения и три неизвестных параметра. Чтобы полностью определить движение COM и, следовательно, движение верхней части тела робота-гуманоида, необходимо наложить дополнительное ограничение. Есть несколько возможных подходов. Самым простым из них является установка высоты COM на постоянное значение (т.е. $c_z = \text{const}$, $\ddot{z} = 0$).

С этим предположением движение COM полностью определяется уравнениями. (14.9) и (14.10). Более гибкое и активное движение может быть достигнуто, если c_z может варьироваться.

Обратите внимание, что описанный выше подход определяет движение COM без учета ног. Однако, поскольку большая часть массы обычно сосредоточена в верхней части тела гуманоидного робота и поскольку нет необходимости точно следовать предписанной траектории ZMP, описанного выше подхода достаточно для создания динамически устойчивых моделей ходьбы.

Если доступна точная модель робота, можно реализовать двухное хождение, просто следуя заранее определенному шаблону ходьбы. Из-за шума и неточностей модели на практике такой подход обычно не приводит к устойчивому поведению при ходьбе.

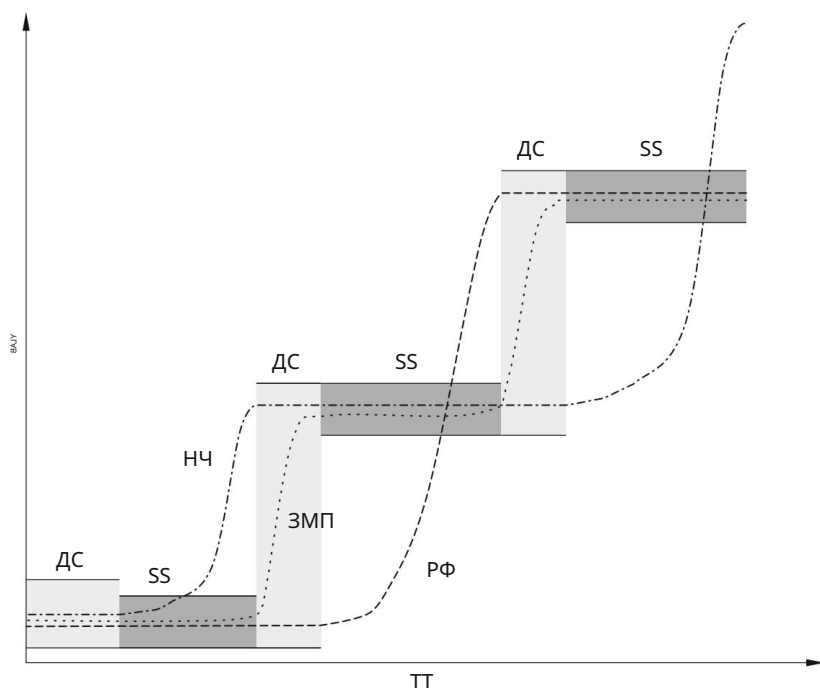


Рис. 14.4 Пример паттерна ходьбы на основе ZMP в сагиттальной плоскости. Робот начинает с того, что обе ноги расположены примерно параллельно на земле, а затем делает три шага, начиная с левой ноги. Заштрихованные области показывают протяженность полигона поддержки во время фазы одиночной поддержки (темная область) и фазы двойной поддержки (светлая область). Траектория ЗМП (пунктирная) планируется таким образом, чтобы оставаться в пределах опорного многоугольника в течение всего времени ходьбы. Также показаны траектории движения обеих ног (слева: пунктирная линия, справа: пунктирная линия).

без добавления к предварительно рассчитанному шаблону ходьбы стабилизатора, который модифицирует шаблон в соответствии с сенсорным входом, поступающим от гироскопов, акселерометров, датчиков силы, камер и т. д.

Следует отметить, что ZMP — не единственный принцип, который можно использовать для создания стабильных моделей ходьбы. Можно создать схему ходьбы, когда робот нестабилен в течение некоторого периода движения. Такие схемы ходьбы должны быть спланированы таким образом, чтобы робот мог восстановиться после нестабильности, прежде чем упасть на землю.

14.2 Имитационное обучение

Чтобы полностью раскрыть свой потенциал, роботы-гуманоиды должны иметь возможность выполнять множество задач в неструктурированных средах (например, в жилых домах, больницах, магазинах, офисах и даже на открытом воздухе). Вышеупомянутая задача робототехники была направлена

к человекоподобным роботам в местах стихийных бедствий. В отличие от многих промышленных сред, где сегодня широко используются роботы, такие среды нельзя подготовить заранее, чтобы облегчить работу робота-гуманоида. Программирование роботов-гуманоидов еще больше усложняется большим количеством степеней свободы, связанных с движением роботов-гуманоидов. Следовательно, классических методов программирования роботов, основанных на обучающих подвесках, тщательно подготовленных автономных системах моделирования и языках программирования, недостаточно для гуманоидов. Вместо этого необходимо оснастить роботов-гуманоидов способностями к обучению и адаптации. Таким образом, их легче программировать и даже самостоятельно приобретать дополнительные знания.

Изучение поведения роботов-гуманоидов является сложной проблемой, потому что пространство всех движений роботов-гуманоидов, которое необходимо исследовать, очень велико и экспоненциально увеличивается с количеством степеней свободы. Решение этой проблемы состоит в том, чтобы сосредоточить обучение на тех частях пространства движения робота, которые действительно имеют отношение к желаемой задаче. Этого можно достичь путем имитационного обучения, также называемого демонстрационным программированием. При таком подходе учитель-человек демонстрирует роботу, как выполнять желаемую задачу. Чтобы это работало, робот должен уметь извлекать важную информацию из демонстрации человека и воспроизводить основные части выполнения задачи. Хотя в большинстве случаев нет необходимости точно воспроизводить продемонстрированные движения для успешного выполнения желаемой задачи, было бы выгодно, если бы робот мог максимально имитировать продемонстрированные движения. Поскольку тело робота-гуманоида похоже на тело человека, имитационное обучение часто является хорошим подходом для сосредоточения обучения на соответствующих частях пространства движения робота-гуманоида.

14.2.1 Наблюдение за движением человека и его передача к движению робота-гуманоида

Существует множество возможных измерительных систем и технологий, которые можно использовать для наблюдения и измерения движений человека. Они включают

- системы оптического захвата движения,
- ансамбли инерциальных измерительных блоков (ИИУ),
- методы компьютерного зрения для оценки движения человека,
- пассивные экзоскелеты,
- ручное наведение.

Ниже мы объясним основные преимущества и недостатки этих систем.

14.2.1.1 Оптические устройства слежения за движением человека

Оптические трекеры основаны на наборе маркеров, прикрепленных к телу человека. Маркеры могут быть как пассивными, так и активными. Пассивные маркеры изготовлены из световозвращающих материалов, которые отражают свет в том направлении, откуда он пришел. В системах с пассивным

маркеры, камеры оснащены полосой инфракрасных светодиодов (светодиодов).

Излучаемый свет отражается от маркера обратно в направлении камеры, делая маркер намного ярче, чем любая другая точка на изображении. Благодаря этому свойству световозвращающие маркеры легко обнаруживаются на изображениях с камер. С помощью триангуляции можно рассчитать положение 3D-маркера, если маркер обнаружен как минимум на двух одновременно полученных изображениях камеры. Прогнозируемое движение видимых маркеров используется для сопоставления с видимыми маркерами, извлеченными при двух последовательных измерениях.

В отличие от пассивных маркеров, отражающих свет, активные маркеры оснащены светодиодами и, таким образом, излучают собственный свет. Следовательно, они должны быть запитаны. Оптические трекеры с активными маркерами обычно освещают только один маркер за раз в течение очень короткого времени. Таким образом, система всегда знает, какой маркер виден в данный момент, тем самым обеспечивая идентификацию маркера. По этой причине системы оптического слежения с активными маркерами могут более эффективно справляться с временными окклюзиями, чем системы с пассивными маркерами, потому что окклюзированный активный маркер может быть идентифицирован, как только он снова станет видимым. Это не относится к пассивным маркерам. С другой стороны, поскольку активным маркерам требуется питание, их необходимо подключать к источнику питания с помощью кабелей. Это делает их более громоздкими в использовании, чем пассивные маркеры, не требующие кабелей.

Чтобы измерить движение человека, как пассивные, так и активные маркеры должны быть прикреплены к сегментам человеческого тела в соответствующих местах. Обычно к каждому сегменту тела прикрепляют не менее трех маркеров, иначе невозможно оценить расположение сегментов твердого тела. В прошлом были разработаны различные специальные костюмы для захвата движения, чтобы упростить крепление маркеров к соответствующим сегментам тела.

Оптические системы слежения с активными или пассивными маркерами обеспечивают трехмерное расположение маркеров, прикрепленных к человеческому телу, которые в данный момент находятся в поле зрения. Трехмерное положение и ориентацию сегмента тела можно оценить, если видны не менее трех маркеров, прикрепленных к сегменту. Чтобы воспроизвести наблюдаемое движение с помощью робота, эта информация должна быть связана с движением робота. С определенной степенью точности движение человека можно смоделировать как шарнирное движение твердых частей тела. Если кинематика гуманоидного робота достаточно близка к кинематике человеческого тела, мы можем встроить его в человеческое тело, как показано на рис. 14.5. Такое вложение может быть позже использовано для оценки суставных углов по ориентациям последовательных сегментов тела. Предположим, что ориентация двух последовательных сегментов тела задана матрицами ориентации R_1 и R_2 и что шарнир, соединяющий два сегмента, состоит из трех последовательных шарнирных осей j_1 , j_2 и j_3 с углами поворота, обозначенными ϕ , θ и ψ , соответственно. Далее предположим, что две последовательные оси соединения ортогональны и что все три оси пересекаются в одной точке. В таком расположении три шарнирных угла соответствуют углам Эйлера, введенным в гл. 4. Всего существует 12 различных комбинаций осей суставов, которые охватывают все возможные варианты расположения осей в суставах с тремя степенями свободы. На рис. 14.5 туловище, шея, плечо, запястье и голеностопный сустав могут быть описаны соответствующей комбинацией углов Эйлера. Отношение между этими значениями определяется выражением

$$R_1 = R(j_1, \phi)R(j_2, \theta)R(j_3, \psi)R_2 = R(\phi, \theta, \psi)R_2. \quad (14.11)$$

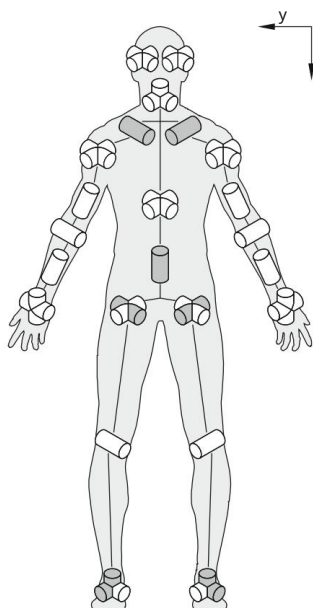


Рис. 14.5 Кинематическая структура человекоподобного робота. В вертикальном положении с вытянутыми руками и ногами оси всех суставов параллельны одной из трех основных осей тела (вперед/назад: ось x , влево/вправо: ось y , вверх/вниз: ось z).

Затем можно рассчитать углы соединения ϕ , θ и ψ , решив уравнение

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_1 R_2 \dots R_n \quad (14.12)$$

Это уравнение зависит от выбора совместных осей j_1 , j_2 и j_3 . Наблюдаемое движение может быть воспроизведено роботом после того, как будут оценены все соответствующие углы суставов из встроеной модели.

Системы оптического слежения также могут точно оценивать абсолютное положение и ориентацию человеческого тела в мировой системе координат. Поскольку обычно предполагается, что корень кинематики робота-гуманоида находится в локальной системе координат, прикрепленной к туловищу, расчетное положение и ориентация туловища соответствуют абсолютному положению и ориентации человеческого тела в мировых координатах.

14.2.1.2 Инерциальные единицы измерения (IMU)

Инерциальные измерительные блоки (IMU) содержат различные датчики, в том числе акселерометры для измерения трехмерного линейного ускорения и гироскопы для измерения скорости изменения трехмерной ориентации (т. е. угловой скорости). IMU также часто включают в себя магнитометры для обеспечения избыточных измерений для повышения точности и уменьшения

дрейф. По этим данным положение и ориентация IMU могут быть оценены, как описано в разд. 7.2.6.

В контексте преобразования движения человека в движение робота-гуманоида данные IMU можно использовать для оценки положения и ориентации каждого сегмента тела, к которому подключен IMU. Как и в случае с трекерами на основе маркеров, углы суставов можно оценить по ориентациям последовательных сегментов тела с помощью уравнения. (14.12).

В отличие от оптических систем слежения, IMU не страдают от окклюзии, поскольку для измерения движения IMU не требуются внешние камеры. С другой стороны, IMU не так точны, как оптические системы слежения, поскольку они включают интеграцию линейного ускорения и угловой скорости. Интегрирование также может вызвать дрейф, особенно при оценке абсолютного положения тела и ориентации в пространстве. Дрейф можно уменьшить, разработав соответствующие фильтры, которые используют избыточность, существующую в измерениях, полученных от акселерометров, гироскопов и магнитометров.

14.2.1.3 Пассивные экзоскелеты и ручное управление

Важная проблема, с которой должны иметь дело все вышеперечисленные системы, заключается в том, что они измеряют движение человека без учета различий между кинематикой и динамикой человека и робота. Такие измерения часто должны быть адаптированы к ограничениям робота, иначе робот не сможет выполнять продемонстрированные движения. В качестве альтернативы можно сформулировать задачу нелинейной оптимизации, чтобы адаптировать продемонстрированное движение к возможностям целевого робота.

Проблемы перевода движения человека в движение робота можно избежать, применяя различные системы измерения. Одна из возможностей заключается в разработке специального пассивного устройства, которое носит как экзоскелет со степенями свободы, соответствующими степеням свободы робота. Пассивный экзоскелет должен быть сконструирован таким образом, чтобы он не ограничивал движения в большинстве случаев. У него нет моторов, но он должен быть оснащен угломерами для измерения углов сочленения. Углы суставов, измеренные экзоскелетом, можно использовать для непосредственного управления роботом, если кинематика целевого робота соответствует кинематике экзоскелета. Одним из недостатков пассивных экзоскелетов является то, что, как и одежда, они должны быть изготовлены по размеру человека-демонстратора.

Как поясняется в разд. 12.3.2, некоторые роботы могут физически управляться с помощью желаемых движений (см. также рис. 14.6). Во время ручного управления движение регистрируется собственными датчиками угла сустава робота и, таким образом, по умолчанию является кинематически возможным. Этот подход эффективен, если робот уступчив и может компенсировать гравитацию, так что человек-демонстратор может легко перемещать его в нужном направлении.

Основным недостатком ручного управления является то, что демонстрация желаемого движения менее естественна для человека-демонстратора, чем, например, при использовании систем слежения на основе маркеров. Таким образом, с такими системами иногда не так просто продемонстрировать сложные движения. Например, руководство руками неэффективно для демонстрации сложных танцевальных движений. С другой стороны, танец может быть легко продемонстрирован человеком напрямую и измерен с помощью оптического трекера, IMU или пассивного экзоскелета.

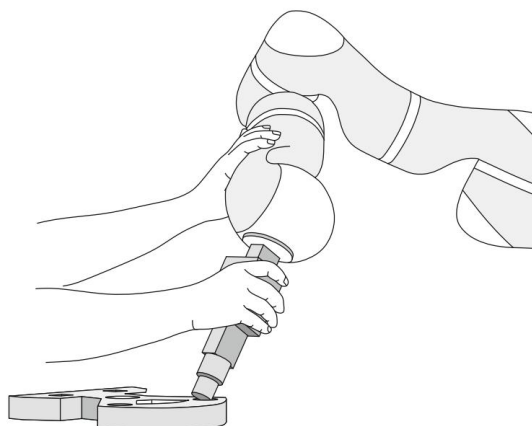


Рис. 14.6. Демонстрация задачи «колышек в отверстии» с помощью кинестетического обучения. Человек-демонстратор своими руками направляет антропоморфную руку при выполнении задания.

14.2.2 Прimitives динамического движения

В разд. 14.2.1 мы обсудили, как измерять человеческие демонстрации и как преобразовать измеренные движения в угловые траектории суставов робота. В некоторых случаях также необходимо адаптировать измеренное движение к кинематическим и динамическим возможностям целевого робота. Как правило, мы получаем последовательность измерений

$$\{y_d(t_j), t_j\}_{j=1}^T, \quad (14.13)$$

где $y_d(t_j) \in \mathbb{R}^D$ — измеренные углы суставов в момент времени t_j , D — число степеней свободы, T — количество измерений. Эта последовательность определяет опорную траекторию. Однако для эффективного управления нам необходимо генерировать моторные команды со скоростью сервопривода целевого робота. Скорость сервопривода робота часто выше, чем скорость захвата измерительной системы. Таким образом, из данных измерений (14.13) нам необходимо сгенерировать непрерывную эталонную траекторию, чтобы генерировать двигательные команды для управления роботом с соответствующей скоростью.

В этом разделе мы представляем примитивы динамического движения (DMP), которые обеспечивают всеобъемлющую основу для эффективного имитационного обучения и управления движениями робота. DMP основаны на наборе нелинейных дифференциальных уравнений с четко определенной динамикой аттрактора. Для одной степени свободы робота, обозначенной здесь y и принятой за один из D зарегистрированных углов соединения, анализируется следующая система линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для получения D

$$\tau \dot{z}' = \alpha z (\beta z - y) - z, \quad \tau \dot{y}' = z. \quad (14.14)$$

$$(14.15)$$

Обратите внимание, что вспомогательная переменная z — это просто масштабированная скорость управляющей переменной y . Постоянные αz и βz имеют интерпретацию с точки зрения жесткости пружины и демпфирования. При соответствующем выборе констант $\alpha z, \beta z, \tau > 0$ эти уравнения образуют глобально устойчивую линейную динамическую систему с g в качестве единственного точечного аттрактора. Мы часто называем g целью движения. Это означает, что для любой начальной конфигурации $y(0) = y_0$ переменная y достигает целевой конфигурации g через определенное время, подобно тому, как растянутая пружина после отпускания возвращается в исходное положение. τ называется постоянной времени. Это влияет на скорость сходимости к точке аттрактора g .

14.2.3 Свойства сходимости линейных динамических систем

Давайте проанализируем, чем полезна вышеуказанная система. Начнем с записи общего решения неоднородной системы линейных дифференциальных уравнений (14.14) и (14.15). Хорошо известно, что общее решение такой системы можно записать в виде суммы частного и однородного решения

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha z \\ \beta z - y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{z}_p(t) \\ \dot{y}_p(t) \end{bmatrix}. \quad (14.16)$$

Здесь $\begin{bmatrix} z_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix}^T$ обозначает любую функцию, которая решает линейную систему (14.15), а $\begin{bmatrix} z_h(t) \\ y_h(t) \end{bmatrix}^T$ (14.14) – (14.14) – является общим решением однородной части уравнений (14.15), т. е.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} \alpha z \\ \beta z - y \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}, \quad A = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} \alpha z & \alpha z \beta z \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Легко проверить, что постоянная функция $\begin{bmatrix} z_p(t) \\ y_p(t) \end{bmatrix}^T$ является решением системы уравнений (14.14) и (14.15). Кроме того, хорошо известно, что общее решение однородной системы (14.17) задается формулой $\begin{bmatrix} z_h(t) \\ y_h(t) \end{bmatrix}^T = \exp(At) \begin{bmatrix} z_0 \\ y_0 \end{bmatrix}^T$, где $c \in \mathbb{R}$ — произвольная постоянная. Таким образом, общее решение уравнений (14.14) и (14.15) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} + \exp(At) \begin{bmatrix} z_0 \\ y_0 \end{bmatrix}. \quad (14.17)$$

Константа c должна быть рассчитана из начальных условий, $\begin{bmatrix} z(0) \\ y(0) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} z_0 \\ y_0 \end{bmatrix}^T$. Собственные значения A задаются формулой $\lambda_{1,2} = \alpha z \pm \alpha \sqrt{\alpha z \beta z / (2\tau)}$. Решение, если (14.17) сходится к $[0, g]$ действительная часть собственных значений $\lambda_{1,2}$ меньше 0, что верно для любых $\alpha z, \beta z, \tau > 0$. Система критически затухает, что означает, что y сходится к g без колебаний и быстрее, чем при любом другом выборе оператора A , если A имеет два равных отрицательных собственных значения. Это происходит при $\alpha z = 4\beta z$, где $\lambda_{1,2} = -\alpha z / (2\tau)$.

14.2.4 Прimitives динамического движения для двухточечных перемещений

Система дифференциальных уравнений (14.14)–(14.15) обеспечивает сходимость u к g из любой начальной точки u_0 . Таким образом, его можно использовать для реализации простых движений «точка-точка». Чтобы увеличить довольно ограниченный набор траекторий, которые могут быть сгенерированы с помощью (14.14) и (14.15), и, таким образом, сделать возможным генерирование общих двухточечных движений, мы можем добавить нелинейный компонент в уравнение. (14.14). Эту нелинейную функцию часто называют вынуждающим фактором. Стандартным выбором является добавление линейной комбинации радиальных базисных функций Ψ_i

$$\Phi(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Psi_i(x)}{\sum_{i=1}^N \Phi_i(x)} x(g - u_0), \quad (14.18)$$

$$\Psi_i(x) = \exp(-h_i(x - c_i)^2), \quad (14.19)$$

где c_i — центры радиальных базисных функций, распределенных по фазе траектории, а $h_i > 0$. Член $g - u_0$, $u_0 = u(t_1)$, используется для масштабирования траектории при изменении начальной и/или конечной конфигурации. Пока начало и конец движения остаются постоянными, этот коэффициент масштабирования не действует и может быть опущен. Фазовая переменная x используется в силовом термине (14.18) вместо времени, чтобы сделать зависимость результирующей политики управления от времени более неявной. Его динамика определяется

$$\dot{x} = -\alpha x, \quad (14.20)$$

с начальным значением $x(0) = 1$. Решением (14.20) является

$$x(t) = \exp(-\alpha t/\tau). \quad (14.21)$$

Привлекательным свойством использования фазовой переменной x вместо явного времени является то, что при соответствующей модификации уравнения (14.20) ход времени можно остановить, чтобы учесть возмущения во время движения. Нет необходимости управлять внутренними часами системы. Получаем следующую систему нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{z}' = \alpha z(\beta z(g - y) - z) + f(x), \quad \tau \dot{y}' = z. \quad (14.22)$$

$$(14.23)$$

Фазовая переменная x и, следовательно, $f(x)$ стремятся к 0 с увеличением времени. Следовательно, влияние нелинейного члена $f(x)$ со временем уменьшается. Следовательно, путем интегрирования системы (14.22)–(14.23) системные переменные T гарантированно $[z, y]$ сходятся к $[0, ^T]$ равны, как и линейная система (14.14)–(14.15). Политика контроля g , заданному переменной y и ее производными первого и второго порядка, определяющими то, что мы называем примитивом динамического движения (ДМП). Для системы со многими степенями

свободы каждая степень свободы представляется своей системой дифференциальных уравнений (14.22)–(14.23), а фаза x является общей для всех степеней свободы. Это можно сделать, потому что фазовое уравнение. (14.20) не включает переменные y и z .

Обычно достаточно определить параметры c_i и h_i уравнения. (14.19) путем установки предопределенного шаблона распределения и увеличения числа базовых функций N до тех пор, пока не будет достигнута желаемая точность реконструкции. Например, для данного N мы можем определить

$$c_i = \exp \left(-\alpha x \right)^{\frac{y_i - 1}{N - 1}}, \quad y_i = 1, \dots, N, \quad (14.24)$$

$$\frac{2}{\text{привет} = (c_i + 1 - c_i)^{\frac{2}{2}}}, \quad i = 1, \dots, N - 1, \quad h_N = h_{N-1}. \quad (14.25)$$

Заметим, что $c_1 = 1 = x(0)$ и $c_N = \exp(-\alpha x) = x(tT)$.

В приведенных выше уравнениях αx , αz и βz задаются постоянными значениями. Значения должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить сходимость базовой динамической системы, как объяснено в разд. 14.2.3. Это так, если мы положим $\alpha x = 2$, $\beta z = 3$, $\alpha z = 4\beta z = 12$.

DMP были разработаны для обеспечения представления, которое обеспечивает точное кодирование желаемых перемещений от точки к точке и в то же время позволяет модулировать различные свойства закодированной траектории. В этом контексте параметры формы w_i определяются таким образом, чтобы робот мог точно следовать заданной траектории путем интегрирования системы уравнений (14.20), (14.22) и (14.23). Другие параметры используются для модуляции и учета помех.

Для движения с двумя степенями свободы на рис. 14.7 показан графический график полей аттракторов, создаваемых примитивом динамического движения. Поле аттрактора меняется с эволюцией фазы x . Пока робот следует по продемонстрированной траектории, поле аттрактора направляет робота по продемонстрированной траектории. Однако, если робот возмущен и отклоняется от демонстрируемой траектории, поля аттрактора, генерируемые на фазе x , направляют робота так, чтобы он достиг желаемой конечной конфигурации (цели), хотя и по измененной траектории.

Траектория может быть воспроизведена из полностью заданной DMP путем интегрирования уравнений. (14.22), (14.23) и (14.20) с использованием метода интегрирования Эйлера:

$$z_{k+1} = z_k + \frac{1}{T} (\alpha z (\beta z (g - y_k) - z_k) + f(x_k)) \Delta t, \quad (14.26)$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{T} \alpha y \Delta t, \quad (14.27)$$

$$x_{k+1} = x_k + \frac{1}{T} \alpha x \Delta t, \quad (14.28)$$

где $\Delta t > 0$ — постоянная интегрирования, обычно устанавливаемая на скорость сервопривода робота. В качестве начальных параметров интеграции необходимо задать текущее состояние робота, которое

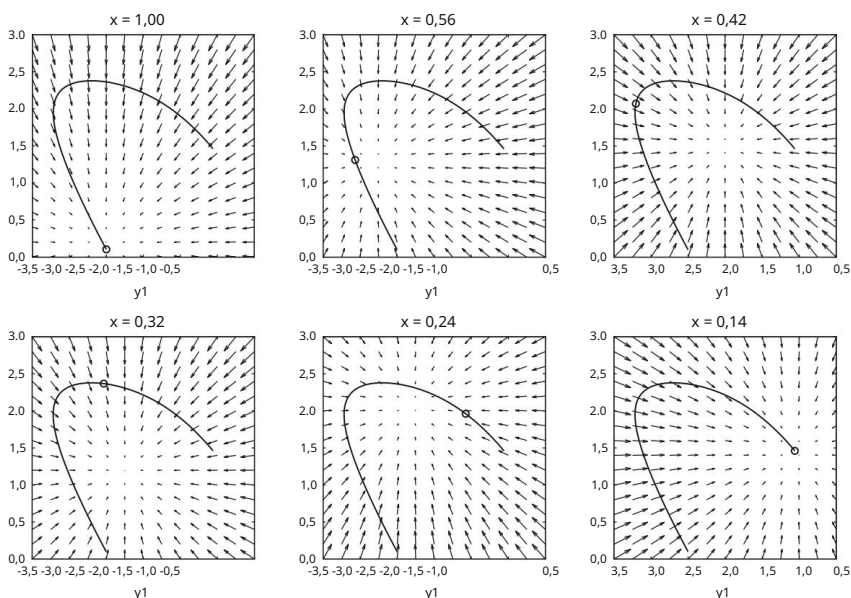


Рис. 14.7. Графики полей аттракторов, генерируемых ММП, задающих движение робота с двумя степенями свободы y_1 , y_2 при интегрировании по фазе x . Стрелки на каждом графике показывают $\dot{z}_1, \dot{z}_2$ в разные значения y_1 , y_2 на данной фазе x , предполагая, что только y_1 и y_2 изменились по сравнению на невозмущенную траекторию. Кругами показаны искомые конфигурации y_1 , y_2 при заданной фазе x

в начале движения предполагается, что он находится в заданном начальном положении и с нулевой скоростью. В результате получаются следующие формулы инициализации: $y_0 = y_0$, $\dot{y}_0 = 0$, $x = 1$.

14.2.5 Оценка параметров DMP с одной демонстрации

Чтобы оценить ПМР, представляющую последовательность измерений (14.13), сначала вычислим производные $\dot{y}^j$ и $\ddot{y}^j$ путем численного дифференцирования. Для любой из степеней D свободы y , получаем следующую последовательность измерений

$$\{y_d(t_j), \dot{y}_d(t_j), \ddot{y}_d(t_j)\}_{j=1}^T, \quad (14.29)$$

где $y_d(t_j)$, $\dot{y}_d(t_j)$, $\ddot{y}_d(t_j)$ — измеренные положения, скорости и ускорения на тренировочной траектории, T — количество точек отсчета. С использованием представления движения DMP траектория любого плавного движения может быть аппроксимирована путем оценки параметров w_i уравнения. (14.18). Для этого мы

переписать систему двух линейных уравнений первого порядка. (14.22) и (14.23) как одно уравнение второго порядка. Это делается путем замены z на $\tau y'$ в уравнении. (14.22). Мы получаем

$$\tau^2 y'' + a\tau y' - a\beta z(g - y) = f(x), \quad (14.30)$$

с f , определенным как в уравнении (14.18). Обратите внимание, что постоянная времени τ должна быть одинаковой для всех степеней свободы. Возможный выбор: $\tau = t_T - t_1$, где t_T — продолжительность тренировочного движения. С другой стороны, точка аттрактора g меняется по степеням свободы. Его можно извлечь непосредственно из данных: $g = y_d(t_T)$. Письмо

$$F_d(t_j) = \tau^2 y''_d(t_j) + a\tau y'_d(t_j) - a\beta z(g - y_d(t_j)), \quad (14.31)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi_d(t_1) \\ \dots \\ \Phi_d(t_T) \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_N \end{pmatrix},$$

получаем следующую систему линейных уравнений

$$XW = f, \quad (14.32)$$

которое необходимо решить, чтобы оценить веса DMP, кодирующего желаемое движение.

Матрица системы X определяется выражением

$$X = (r - y_0) \begin{pmatrix} \frac{\psi_1(x_1)}{N} \psi_1(x_1) x_1 & \dots & \frac{\psi_N(x_1)}{N} \psi_1(x_1) x_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\psi_1(x_T)}{N} \psi_1(x_T) x_T & \dots & \frac{\psi_N(x_T)}{N} \psi_1(x_T) x_T \end{pmatrix}. \quad (14.33)$$

Точки выборки фазы x_j получаются путем подстановки времени измерения t_j в уравнение. (14.21). Параметры w могут быть рассчитаны путем решения приведенной выше системы линейных уравнений по методу наименьших квадратов. Пример оценки DMP показан на рис. 14.8. Рассчитанный DMP гарантирует, что робот достигнет точки аттрактора g в момент времени t_T . Поскольку DMP были разработаны для представления двухточечных движений, демонстрируемое движение должно полностью остановиться в конце демонстрации, если робот должен оставаться в точке аттрактора. Если требуется другой тип движения аппроксимируется с помощью DMP, робот перелетит через точку аттрактора и вернется к ней после того, как в движении начнет преобладать динамика линейной системы дифференциальных уравнений второго порядка. По крайней мере, теоретически скорость не обязательно должна быть равна нулю в начале движения, но сложно представить реальную программно-демонстрационную систему, в которой была бы получена такая траектория.

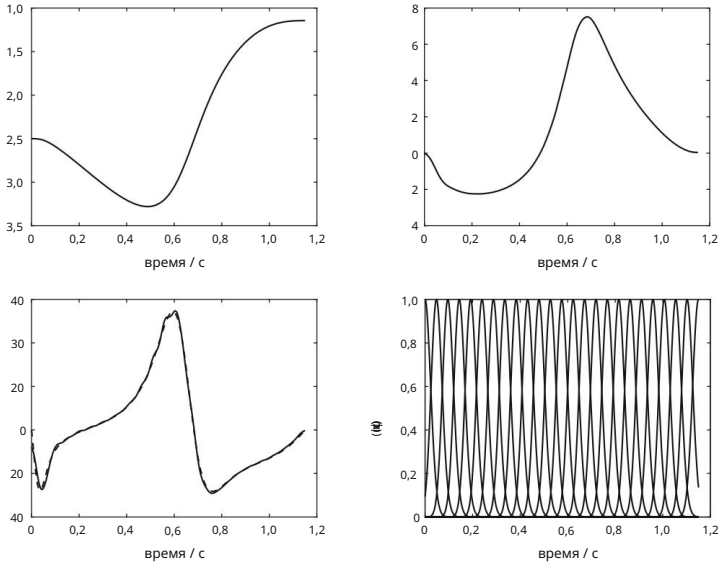


Рис. 14.8 Эволюция во времени примера примитива динамического движения: управляющая переменная u и ее производные, фаза x и радиальные базисные функции ψ_i показаны сплошными линиями. Пунктирные линии показывают продемонстрированные значения u , u' и u''

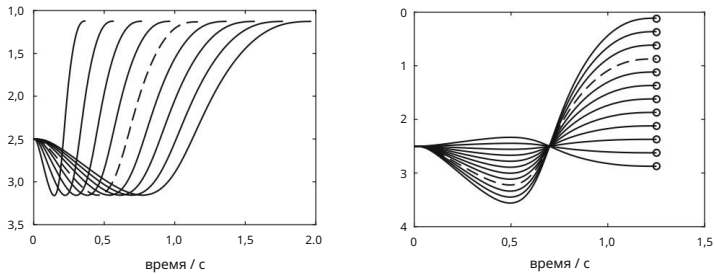


Рис. 14.9 Модуляции DMP. Штриховые траектории показывают исходную DMP без каких-либо применений модуляции. Слева: временная модуляция. Сплошные траектории показывают ПМП с измененным τ . Справа: цель модуляция. Сплошные траектории показывают DMP с измененной целью g . Круги показывают положение ворот

14.2.6 Модуляция DMP

Важным преимуществом DMP является то, что они позволяют легко модулировать заученные движение. На рис. 14.9 слева показано, что при изменении параметра τ движение может быть ускоренным или замедленным. На этом же рисунке также показано, что при изменении цели параметра g окончательную конфигурацию на траектории можно изменить так, чтобы робот движется к новой цели. Член u_0 в вынуждающем члене (14.18) обеспечивает движение соответствующим образом масштабируется по мере изменения цели или исходной конфигурации.

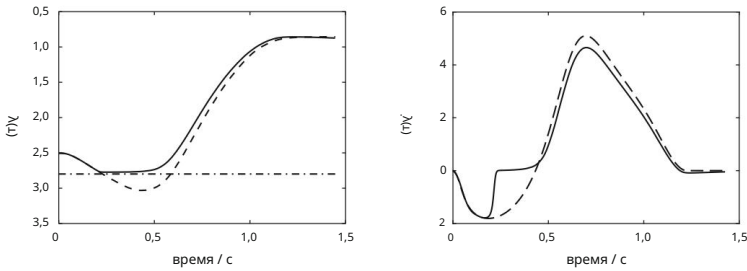


Рис. 14.10. Модуляция DMP с избеганием совместного ограничения при $y = 2,8$. Сплошные траектории показывают траекторию ДМП и ее скорость, полученные путем интегрирования (14.34) вместо (14.23), а штриховые траектории показывают исходную ДМП и ее скорость без применения какой-либо модуляции

Более сложные модуляции включают изменение лежащих в основе дифференциальных уравнений. (14.22), (14.23) и/или (14.20). Например, уравнение (14.23) можно изменить на

$$\tau \dot{y} = z - yL \frac{\rho}{y} \quad (14.34)$$

реализовать избегание нижнего предела суставов. Это происходит потому, что как только y начинает приближаться к yL , знаменатель в уравнении (14.34) становится малой, и существует значительная разница между интегрированием уравнения. (14.23) или (14.34). Рисунок 14.10 справа показывает, что второй член уравнения. (14.34) действует как отталкивающая сила, препятствующая слишком близкому сближению y с yL . С другой стороны, знаменатель в уравнении (14.34) остается большим до тех пор, пока угол шарнира y далеко от предела шарнира yL . Таким

образом, в этом случае есть небольшая разница между интегрированием уравнения. (14.23) или (14.34), а траектория, сгенерированная DMP, следует продемонстрированному движению. Обратите внимание, что нет необходимости изучать новые параметры w_i , цель g или постоянную времени τ из-за модуляции. Они могут оставаться такими, какими были изначально заучены. Только уравнение (14.23) необходимо изменить на (14.34), чтобы гарантировать отсутствие ограничений по соединению во время оперативного управления.

Привлекательным свойством применения фазовой переменной вместо времени является то, что мы можем легко модулировать эволюцию фазы во времени, например, ускоряя или замедляя движение в зависимости от ситуации с помощью членов связи. Вместо интегрирования уравнений. (14.20) и (14.23) во время выполнения модифицированные уравнения. (14.20) и (14.36) можно было бы проинтегрировать

$$\tau \dot{x}' = 1 - \frac{ax x}{\arccos(y - \tilde{y}) \tau \dot{y}' = z}, \quad (14.35)$$

$$+ \arccos(y - \tilde{y}), \quad (14.36)$$

где y и $\tilde{y}$ соответственно обозначают желаемое и фактическое угловое положение шарнира робота соответственно. Если робот не может следовать желаемому движению, $\arccos(y - \tilde{y})$ становится большим, что, в свою очередь, делает изменение фазы x' малым. Таким образом, фазовая эволюция останавливается до тех пор, пока робот не догонит желаемую конфигурацию y . Это будет

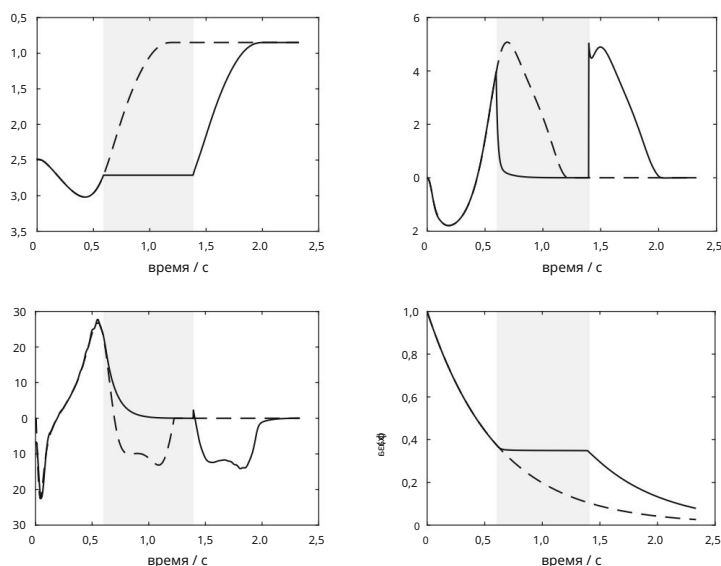


Рис. 14.11. Эффект остановки фазы, вызванный блокировкой эволюции положения сустава y^* во временном интервале $[0,6, 1,4]$ (серая область). Штриховые траектории показывают исходную DMP, скорость, ускорение и изменение фазы, в то время как сплошные траектории показывают их аналоги из возмущенного движения с включенной фазовой остановкой. Обратите внимание, что за пределами временного интервала $[0,6, 1,4]$, когда движение сустава заблокировано, робот точно следует желаемому движению.

в конечном итоге произойдет из-за добавленного члена в уравнении. (14.36). С другой стороны, если робот точно следует желаемому движению, то $y^* - y = 0$ и уравнения (14.35) и (14.36) ничем не отличаются от уравнений (14.20) и (14.23) соответственно. Таким образом, в этом случае движение, генерируемое DMP, не изменяется. Рисунок 14.11 иллюстрирует эффект остановки фазы, когда движение робота временно блокируется.

Таким образом, DMP обеспечивают эффективное представление для изучения траекторий роботов-гуманоидов и для управления роботами-гуманоидами. Они основаны на автономных нелинейных дифференциальных уравнениях, которые гарантированно обеспечивают плавную кинематическую политику управления. Важным свойством DMP является то, что их можно изучить из одной демонстрации желаемой задачи. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими двигательными представлениями, в том числе

- они обладают свободными параметрами, которые легко изучить, чтобы воспроизвести любой желаемый движение,
- они не зависят явно от времени и допускают временную модуляцию,
- они устойчивы к возмущениям,
- их легко модулировать, адаптируя различные параметры и уравнения.

Благодаря своей гибкости и надежности DMP считаются методом выбора при изучении траекторий роботов на основе отдельных демонстраций.

Глава 15

Точность и повторяемость промышленных манипуляторов



В этой главе мы кратко рассмотрим критерии производительности и методы тестирования промышленных роботов-манипуляторов, описанные в стандарте ISO 9283. Прежде чем обратиться к точности и воспроизводимости промышленных манипуляторов, мы обобщим основную информацию о роботах-манипуляторах.

Базовые данные о роботе обычно включают схематический чертеж механической конструкции робота:

- декартовый робот (рис. 15.1 слева),
- цилиндрический робот (рис. 15.1 справа),
- полярный (сферический) робот (рис. 15.2 слева),
- антропоморфный робот (рис. 15.2 справа),
- робот SCARA (рис. 15.3).

На всех чертежах должны быть отмечены степени свободы механизма робота. Чертеж должен также включать базовую систему координат и рамку механического интерфейса, которые определяются изготовителем.

Особое значение имеет схема, показывающая границы рабочего пространства (рис. 15.4). Максимальный вылет манипулятора робота должен быть четко показан как минимум в двух плоскостях. Должен быть указан диапазон движения для каждой оси робота (степень свободы). Изготовитель также должен указать центр рабочего пространства c_w , где происходит большая часть действий робота.

Данные робота должны сопровождаться характеристическими параметрами нагрузки, такими как масса (кг), крутящий момент (Нм), момент инерции (kgm^2) и тяга (Н). Максимальная скорость должна быть задана с постоянной скоростью, когда нет ни ускорения, ни замедления. Максимальные скорости для конкретных осей робота должны быть указаны с нагрузкой, приложенной к рабочему органу. Также должны быть представлены разрешение или движения каждой оси (мм), описание системы управления и методов программирования.

Три наиболее важные системы координат робота (правые) показаны на рис. 15.5. Во-первых, это мировая система координат $x_0-y_0-z_0$. Происхождение кадра определяется пользователем. Ось z_0 параллельна вектору силы тяжести, но в противоположном направлении. Во-вторых, это базовая система координат $x_1-y_1-z_1$, начало которой определяется производителем. Его оси совмещены с базовым сегментом робота.

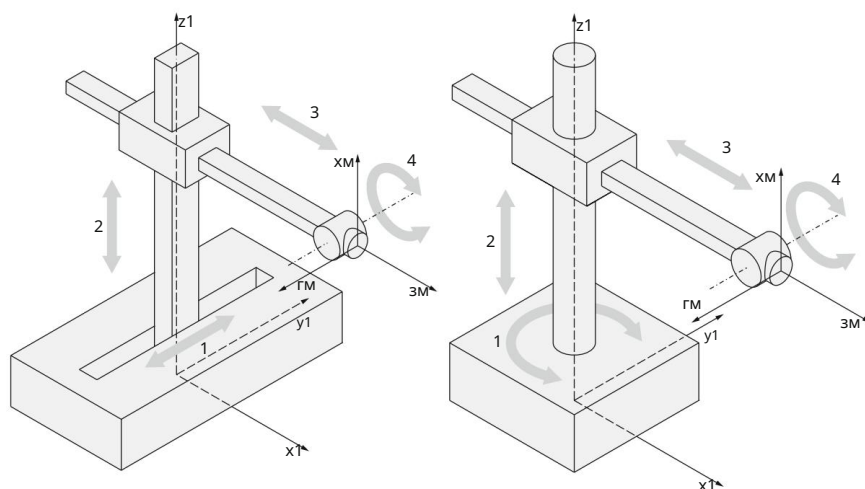


Рис. 15.1 Механические конструкции декартового робота (слева) и цилиндрического робота (справа)

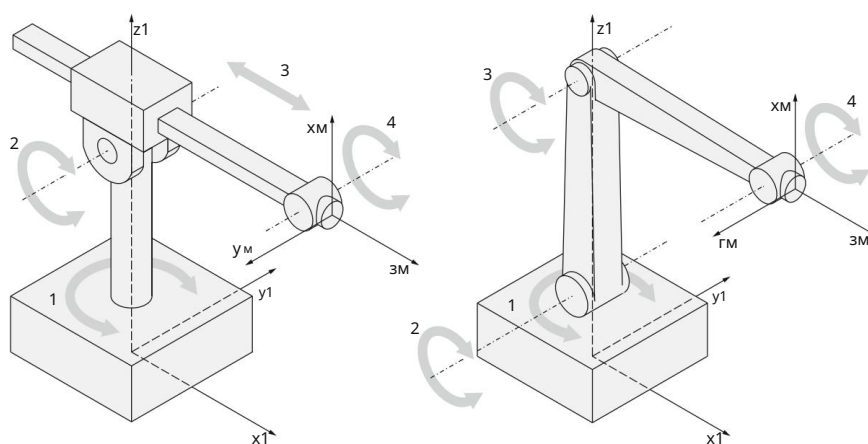


Рис. 15.2 Механическая структура полярного робота (слева) и антропоморфного робота (справа)

Положительная ось z_1 направлена перпендикулярно от базовой монтажной поверхности. Ось x_1 проходит через проекцию центра рабочего пространства робота sw . Система координат x_M - y_M - z_M называется системой координат механического интерфейса. Его начало расположено в центре механического интерфейса (ладони робота), соединяющего руку робота с захватом. Положительная ось z_M направлена от механического интерфейса к рабочему органу. Ось x_M расположена в плоскости, определяемой границей раздела, которая перпендикулярна оси z_M .

Положительные направления движений робота, заданные как поступательные и вращательные перемещения, показаны на рис. 15.6.

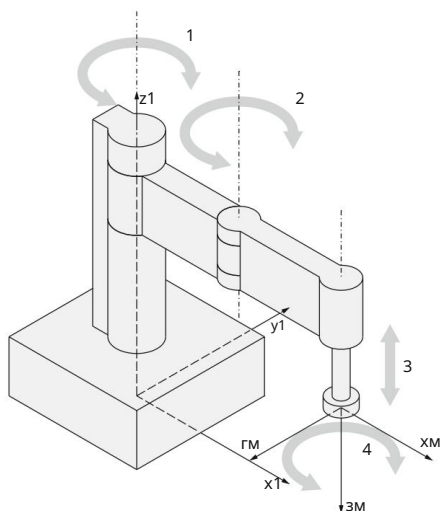


Рис. 15.3 Механическая структура робота SCARA

Стандарт ISO 9283 касается критериев и методов тестирования промышленных роботов-манипуляторов. Это самый важный стандарт, поскольку он облегчает диалог между производителями и пользователями робототехнических систем. Он определяет способ, с помощью которого должны быть проверены конкретные рабочие характеристики робота-манипулятора. Тесты могут проводиться на этапе приемки робота или в различные периоды использования робота, чтобы проверить точность и повторяемость движений робота.

Характеристики робота, которые существенно влияют на выполнение задачи робота, следующие:

- точность и повторяемость положения (поза определяется как положение и ориентация определенного сегмента робота, обычно рабочего органа),
- точность расстояния и
- повторяемость,
- время стабилизации
- положения,
- превышение положения,
- дрейф точности положения и повторяемость.

Эти параметры производительности важны в задачах двухточечного робота.

Аналогичные параметры определяются для случаев, когда рабочий орган робота движется по непрерывной траектории. Эти параметры не будут рассматриваться в этой книге и могут быть найдены в оригинальных документах.

При тестировании точности и воспроизводимости механизма робота важны два термина, а именно кластер и барицентр кластера. Кластер определяется как набор достигнутых поз конечного эффектора, соответствующих одной и той же командной позе. Барицентр — это точка, координаты которой являются средними значениями координат x , y и z всех точек в кластере. Измеренное положение и данные ориентации должны быть выражены в системе координат, параллельной базовой системе координат.

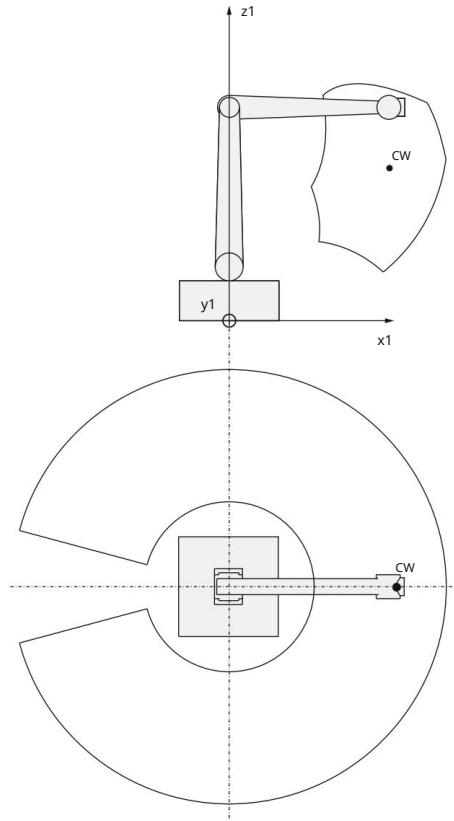


Рис. 15.4 Рабочее пространство робота

Точка измерения должна располагаться как можно ближе к началу рамки механического интерфейса. Рекомендуются бесконтактные оптические методы измерения. Измерительные приборы должны быть надлежащим образом откалиброваны. Испытания робота на точность и повторяемость должны выполняться с максимальной нагрузкой на рабочий орган и максимальной скоростью между указанными точками.

Стандарт определяет позы, которые должны быть протестированы. Измерения необходимо производить в пяти точках, расположенных на плоскости, расположенной по диагонали внутри куба (рис. 15.7). Также указывается положение куба в рабочей области робота. Он должен располагаться в той части рабочего пространства, где ожидается большая часть действий робота. Куб должен иметь максимально допустимый объем в рабочей области робота, а его грани должны быть параллельны базовой системе координат. Точка P1 расположена на пересечении диагоналей в центре куба. Точки P2 – P5 расположены на расстоянии от углов куба, равном $10\% \pm 2\%$ длины диагонали L. Стандарт также определяет минимальное количество циклов, которое необходимо выполнить при проверке каждого характеристического параметра:

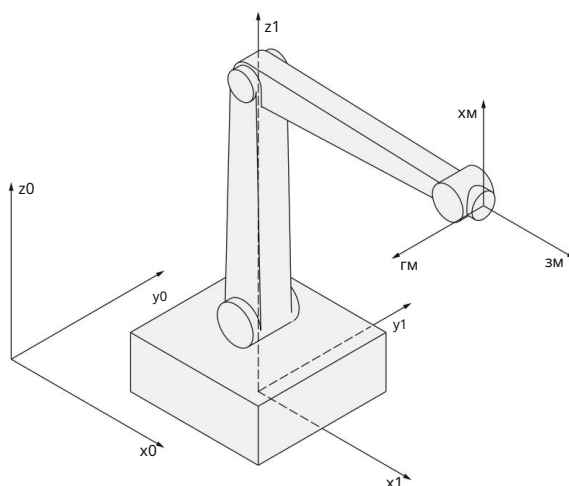


Рис. 15.5 Система координат робота-манипулятора

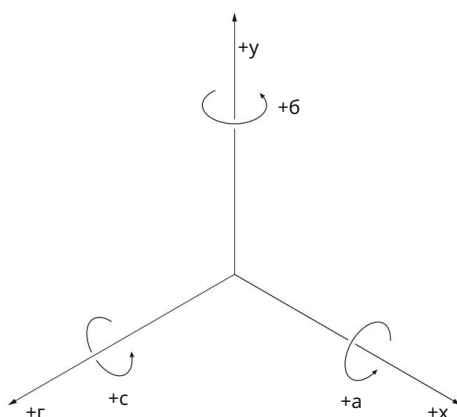


Рис. 15.6 Положительные направления поступательных и вращательных перемещений

- точность позы и повторяемость: 30 циклов, •
- точность расстояния и повторяемость: 30 циклов, • время
- стабилизации позы: 3 цикла, • выброс
- позы: 3 цикла, • дрейф точности
- позы и повторяемость: непрерывное циклирование в течение 8 часов.

При проверке точности и повторяемости поз рабочего органа мы должны различать так называемую командную позу и достигнутую позу (рис. 15.8).

Командная поза — это желаемая поза, заданная с помощью программирования робота или ручного ввода желаемых координат с помощью обучающего подвесного пульта. Достигнутое положение — это фактически достигнутое положение исполнительного органа робота в ответ на команду.

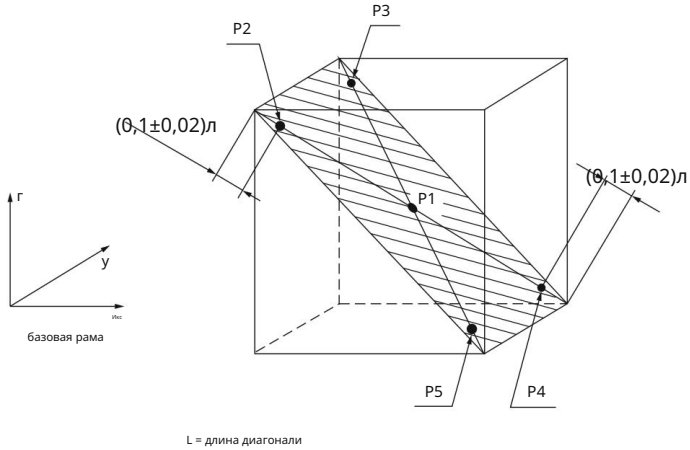


Рис. 15.7 Куб с тестируемыми точками

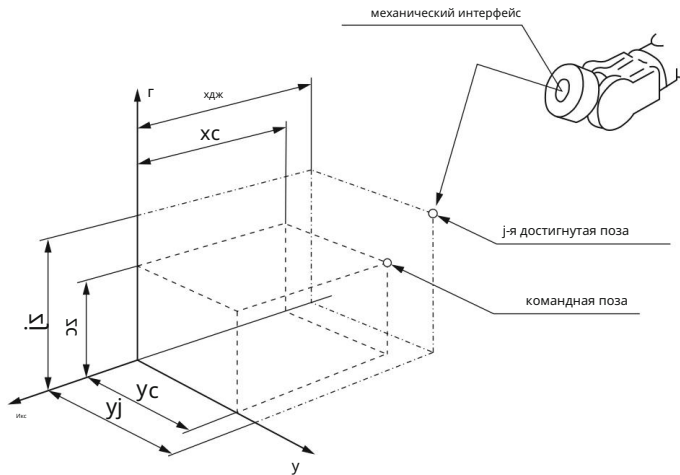


Рис. 15.8 Командная поза и достигнутая поза рабочего органа

поза. Точность позы оценивает отклонения, возникающие между командой и достигнутой позой. Повторяемость позы оценивает флуктуации достигнутых поз для серии повторных посещений одной и той же командной позы. Таким образом, точность позы и повторяемость очень схожи с точностью и повторяемостью повторной стрельбы по мишени. Причинами отклонений являются: ошибки, вызванные алгоритмом управления, ошибки преобразования координат, различия между размерами механической конструкции робота и модели управления роботом, механические неисправности, такие как гистерезис или трение, и внешние воздействия, такие как те

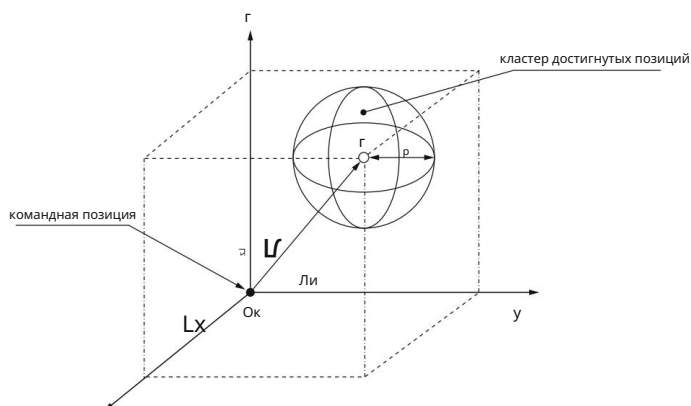


Рис. 15.9 Точность положения и повторяемость

Точность позы определяется как отклонение между командной позой и средним значением достигнутых поз, когда рабочий орган приближался к командной позе с того же направления. Точность положения и ориентации рассматривается отдельно. Точность позиционирования определяется расстоянием между командной позой и центром масс группы достигнутых поз (рис. 15.9). Точность положения $L = [L_x \ L_y \ L_z]^T$ выражается следующим уравнением

$$L = (x^- - xc)^2 + (y^- - yc)^2 + (z^- - zc)^2, \quad (15.1)$$

где (x^-, y^-, z^-) — координаты барицентра скопления, полученные усреднением 30 точек измерения, оцененных при повторении движений в одну и ту же командную позу Ос с координатами (x_c, y_c, z_c) .

Точность ориентации представляет собой разность между заданной угловой ориентацией и средним значением достигнутых угловых ориентаций. Выражается отдельно для каждой оси базовой системы координат. Точность ориентации вокруг оси z имеет следующий вид

$$L_c = C^- \quad C_c, \quad (15.2)$$

где C^- — среднее значение углов ориентации вокруг оси z , полученное по 30 измерениям при попытке достижения одного и того же командного угла C_c .

Аналогичные уравнения записываются для точности ориентации вокруг осей x и y .

Стандарт точно определяет и ход измерений. Робот стартует из точки Р1 и перемещается в точки Р5, Р4, Р3, Р2, Р1. Каждая точка всегда достигается с одного и того же направления

0 цикл				P1
	цикл P5	P4	P3	P2
t_{12}^T	P4	P3	P2	P1
				$\vdots$
30-й цикл	P5	P4	P3	P2
				P1

Для каждой точки вычисляются точность положения L и точности ориентации L_a , L_b и L_c .

Для той же серии измерений также необходимо определить повторяемость позы. Повторяемость позы выражает близость положений и ориентаций 30 достигнутых поз при повторении движений робота в одной и той же командной позе. Повторяемость положения (рис. 15.9) определяется радиусом сферы r , центром которой является барицентр скопления. Радиус определяется как

$$r = D^- + 3SD. \quad (15.3)$$

Расчет радиуса r по уравнению (15.3) дополнительно объясняется следующими уравнениями

$$D^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{j, \text{дирекция}}^-$$

$$D_j = (x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2 \quad (15.4)$$

$$SD = \frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}{n - 1}.$$

В приведенных выше уравнениях мы снова выбираем $n = 30$, а (x_j, y_j, z_j) — координаты j -го достигнутого положения.

Повторяемость ориентации для угла вокруг оси z представлена на рис. 15.10. Повторяемость ориентации показывает, насколько 30 достигнутых углов разбросаны относительно их среднего значения для одного и того же командного угла. Он описывается тройными стандартными отклонениями. Для угла вокруг оси z имеем

$$rc = \pm 3Sc = \pm 3 \frac{\sum_{j=1}^n (C_j - \bar{C})^2}{n - 1}. \quad (15.5)$$

В уравнении (15.5) C_j представляет собой угол, измеренный в j -м достигнутом положении. Ход измерений такой же, как и при проверке точности. Радиус r и угловые отклонения ra , rb и rc рассчитываются для каждой позы отдельно.

Точность расстояния и воспроизводимость проверяются аналогичным образом. Точность расстояния количественно определяет отклонения, которые возникают на расстоянии между двумя командными позициями и двумя наборами средних достигнутых позиций. Повторяемость расстояния

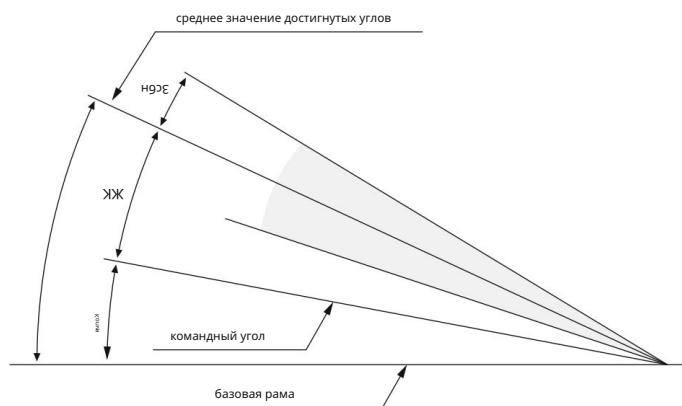


Рис. 15.10 Точность ориентации и повторяемость

определяет колебания расстояний для серии повторяющихся движений робота между двумя выбранными точками. Точность расстояния определяется как отклонение между командным расстоянием и средним значением достигнутых расстояний (рис. 15.11). Предполагая, что P_{c1} и P_{c2} являются заданной парой позиций, а P_{1j} и P_{2j} являются j -й парой из 30 пар достигнутых позиций, точность расстояния B определяется как

$$B = D_c - D^- \quad (15.6)$$

где

$$D_c = P_{c1} - P_{c2} = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}$$

$$D^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j$$

$$D_j = P_{1j} - P_{2j} = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}.$$

В приведенных выше уравнениях, описывающих точность расстояния, $P_{c1} = (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})$ и $P_{c2} = (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})$ представляют пару искоемых положений, в то время как $P_{1j} = (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j})$ и $P_{2j} = (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j})$ — пара достигнутых позиций. Проверку точности расстояния проводят при максимальной нагрузке рабочего органа робота, который должен быть перемещен 30 раз между точками P_2 и P_4 измерительного куба. Повторяемость расстояния RB определяется как

$$RB = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - D^-)^2}{n - 1}} \quad (15.7)$$

Рассмотрим еще четыре характерных параметра, которые необходимо тестировать у промышленных роботов, перемещающихся из точки в точку. Во-первых, это стабилизация позы.

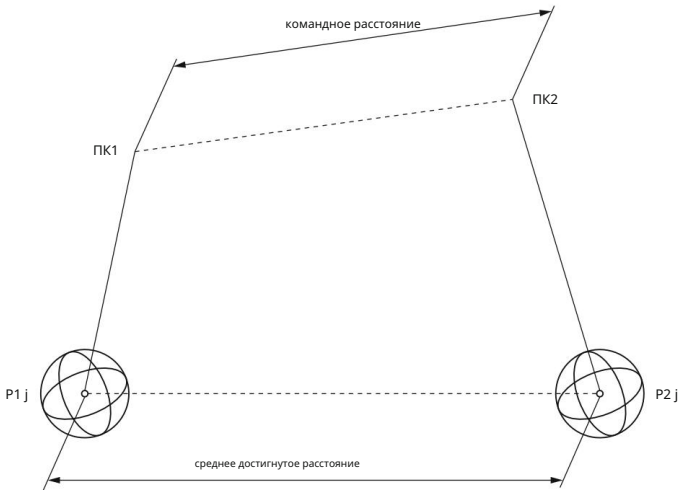


Рис. 15.11 Точность расстояния

время. Время стабилизации — это интервал времени между моментом, когда робот дает сигнал «достигнутой позы» и момент, когда либо колебательный, либо затухающий движение рабочего органа робота находится в пределах, установленных производителем. Определение времени стабилизации позы видно из рис. 15.12. Тест выполняется при максимальной нагрузке и скорости. Все пять точек измерения посещаются за следующий порядок P1 P2 P3 P4 P5. Для каждой позы среднее значение рассчитано три цикла.

Аналогичным параметром является выброс позы, также показанный на рис. 15.12. поза перерегулирование - это максимальное отклонение между траекторией приближающегося рабочего органа и достигнутая поза после подачи роботом сигнала «достигнутая поза». На рис. 15.12 отрицательное превышение показано в первом примере и положительное превышение в второй пример. Момент $t = 0$ – это время, когда сигнал «достигнутая поза» был доставленный. Условия измерения такие же, как и при тестировании стабилизации время.

Последние два параметра, подлежащие проверке в движущемся промышленном роботе-манипуляторе от точки к точке — дрейф точности позы и дрейф повторяемости позы.

Дрейф точности положения $L_{др}$ определяется как

$$L_{др} = |L_{t=0} - L_{t=T}|, \tag{15,8}$$

где $L_{t=0}$ и $L_{t=T}$ — значения точности положения в момент времени $t = 0$ и время $t=T$ соответственно. Дрейф точности ориентации $L_{дрк}$ равно

$$L_{дрк} = L_{c,t=0} - L_{c,t=T}, \tag{15,9}$$

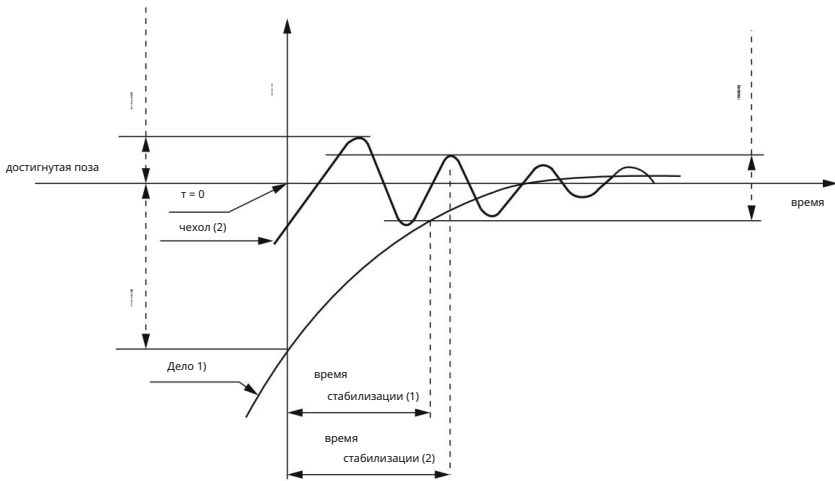


Рис. 15.12 Время стабилизации положения и перерегулирование

где $L_{c,t=0}$ и $L_{c,t=T}$ — значения точности ориентации в момент времени $t = 0$ и момент времени $t = T$ соответственно. Дрейф повторяемости положения определяется следующим уравнением

$$rDR = r_{t=0} - r_{t=T}, \quad (15.10)$$

где $r_{t=0}$ и $r_{t=T}$ — значения повторяемости положения в момент времени $t = 0$ и момент времени $t = T$ соответственно. Дрейф повторяемости ориентации для вращения вокруг оси z определяется как

$$rDRC = r_{c,t=0} - r_{c,t=T}, \quad (15.11)$$

где $r_{c,t=0}$ и $r_{c,t=T}$ — значения повторяемости ориентации в момент времени $t = 0$ и момент времени $t = T$ соответственно. Измерения выполняются при максимальной загрузке и скорости робота. Робот циклически перемещается между точками P4 и P2. Циклические движения длятся восемь часов. Измерения производятся только в точке P4.

Приложение

Вывод ускорения по кругу

Движение

Напомним сначала определения вектора положения, скорости и ускорения частицы. В заданной системе отсчета (т. е. системе координат) положение частицы задается вектором, простирающимся от начала системы координат до мгновенного положения частицы. Этот вектор может быть функцией времени, определяя таким образом траекторию частицы.

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t), z(t)). \quad (\text{A.1})$$

Скорость частицы определяется как изменение положения в единицу времени

$$\mathbf{v} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(0)}{t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (\text{A.2})$$

Ускорение определяется как изменение скорости в единицу времени,

$$\mathbf{a} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(0)}{t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}. \quad (\text{A.3})$$

Заметим, что это векторное уравнение, поэтому изменение скорости относится как к изменению величины скорости, так и к изменению направления скорости.

Круговое движение описывается вращающимся вектором $\mathbf{r}(t)$ фиксированной длины, $|\mathbf{r}| = r$ константа. Таким образом, вектор положения определяется радиусом окружности r и углом $\theta(t)$ $\mathbf{r}$ относительно оси x (рис. A.1).

Теперь введем набор из трех ортогональных единичных векторов: $\mathbf{e}_r$ в направлении $\mathbf{r}$, $\mathbf{e}_\theta$ в направлении касательной к окружности и $\mathbf{e}_z$ в направлении оси z .

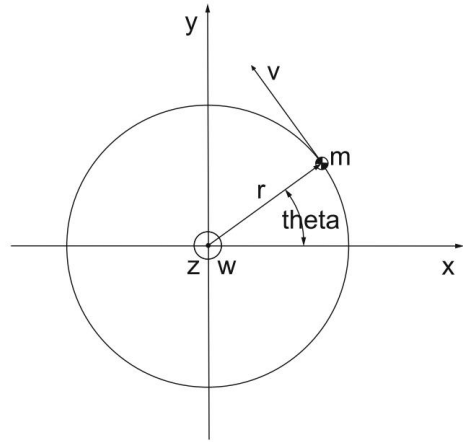
Отношение между тремя единичными векторами определяется выражением $\mathbf{e}_\theta = \mathbf{e}_z \times \mathbf{e}_r$.

Определим вектор угловой скорости как перпендикулярный плоскости круговой траектории с величиной, равной производной по времени от угла θ

$$\boldsymbol{\omega} = \dot{\theta} \mathbf{e}_z. \quad (\text{A.4})$$

Приступим к вычислению скорости

Рис. А.1 Параметры и переменные в круговом движении



$$v = \frac{ds}{dt} \quad (A.5)$$

Направление скорости задается касательной к окружности: $\hat{e}_t = \hat{e}_z \times \hat{e}_r$.

Величина скорости определяется длиной бесконечно малой дуги окружности $ds = r d\theta$, деленной на бесконечно малое время dt , которое требуется частице, чтобы пройти этот путь.

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} = r\dot{\theta} \quad (A.6)$$

Включение тангенциального направления скорости дает

$$v = r\dot{\theta}\hat{e}_t = \dot{\theta}\hat{e}_z \times r\hat{e}_r = \omega \times r \quad (A.7)$$

Чтобы получить ускорение, вычисляем производную скорости по времени

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega \times r) \quad (A.8)$$

Мы дифференцируем векторное произведение так же, как дифференцируем нормальное произведение двух функций.

$$a = \frac{d\omega}{dt} \times r + \omega \times \frac{dr}{dt} \quad (A.9)$$

Определив угловое ускорение α как производную по времени от угловой скорости $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$, мы видим, что первый член соответствует тангенциальному ускорению

$$a_t = \alpha \times r \quad (A.10)$$

Во второй член вставляем выражение для скорости

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}, \quad (\text{A.11})$$

и мы получаем двойное векторное произведение $\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$. Используя тождество $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$ из векторной алгебры и учитывая, что $\boldsymbol{\omega}$ и $\mathbf{r}$ ортогональны, мы получаем для второго слагаемого в уравнении для ускорения

$$\boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = \boldsymbol{\omega}(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r}) - \mathbf{r}(\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\omega}) = -\boldsymbol{\omega}^2 \mathbf{r}, \quad (\text{A.12})$$

что является радиальной (или центростремительной) составляющей ускорения. Итак, у нас наконец есть

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_r = \alpha \times \mathbf{r} - \boldsymbol{\omega}^2 \mathbf{r}. \quad (\text{A.13})$$

Дальнейшее чтение

1. Bajd T, Mihelj M, Munih M (2013) Introduction to Robotics, Springer
2. Craig JJ (2005) Introduction to Robotics—Mechanics and Control, Pearson
- Прентис Холл
3. Kajita S, Hirukawa H, Harada K, Yokoi K (2014) Introduction to Humanoid Robotics, Springer
4. Klancar G, Zdešar A, Blažič S, Škrjanc I (2017) Wheeled Mobile Robotics - From Fundamentals Towards Autonomous Systems, Elsevier
5. Ленарчик Дж., Байд Т., Станишич М.М. (2013) Механизмы роботов, Springer
6. Мерле Дж. П. (2006) Параллельные роботы (второе издание), Springer
7. Михель М., Подобный Дж. (2012) Тактильные ощущения для виртуальной реальности и телеопераций, Спрингер
8. Михель М., Новак Д., Бегуш С. (2014) Технология и приложение виртуальной реальности, Спрингер
9. Natale C (2003) Interaction Control of Robot Manipulators, Springer
10. Nof SY (1999) Handbook of Industrial Robotics, John Wiley & Sons
11. Paul RP (1981) Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control, Массачусетский технологический институт Пресс
12. Sciavico L, Siciliano B (2002) Моделирование и управление роботами-манипуляторами, Спрингер
13. Спонг М.В., Хатчинсон С., Видьясагар М. (2006) Моделирование и управление роботами, Джон Уайли и сыновья
14. Цай Л.В. (1999) Анализ роботов: механика последовательного и параллельного управления, испарители, John Wiley & Sons
15. Се М. (2003) Основы робототехники — связь восприятия с действием, мир Научный

Индекс

А

Ускорение

- угловое, [62](#), [244](#)
- центростремительное, [62](#), [245](#)
- радиальное, [62](#), [245](#)
- тангенциальное, [62](#), [244](#)

Акселерометр, [94](#)

Расстояние

- точности, [239](#)
- дрейф, [233](#), [240](#)
- ориентация, [237](#)
- поза, [233](#), [235](#)
- позиция, [237](#)

Привод

- гибкий, серия [175](#)
- эластичный, [175](#)
- переменной жесткости, [175](#)

Антропоморфный робот, [6](#), [231](#)

Приложение с

- ручным управлением, [187](#)
- Окно передачи, [185](#)

Сборка, [147](#)

Точка

- притяжения, [222](#), [226](#)

Автоматизированная управляемая машина, [189](#)

Б

Обратная проекция, модели [110](#), [113](#), [114](#), [115](#)

Баланс, [210](#)

Бампер, [98](#)

С

Камера,

- калибровка [185](#), [114](#), [118](#)

шаблон калибровки, [118](#)

калибровочных

- наконечников, [118](#)
- внешних параметров, [114](#)
- внутренних параметров, [112](#)

Декартовский робот, [231](#)

Центр масс (COM), [214](#), [215](#)

Замкнутая кинематическая цепь, [69](#)

Кобот, [9](#)

Совместное

- приложение, [185](#)
- захват, [184](#)
- операции, [173](#), [177](#)
- робот, [157](#), [173](#), [175](#), [184](#)
- рабочее пространство, [174](#), [186](#)

Столкновение, [175](#)

Соответствие, [175](#)

Ограничения, [71](#), [77](#)

Контакт

- квазистатический, [182](#)
- переходный, [182](#)

Контактный датчик, [96](#)

Управление,

- [133](#) адмиттанс, [176](#)
- сила, [133](#), [147](#), [149](#), [151](#)
- гравитационная компенсация, [136](#), [137](#), [144](#)
- импеданс, [176](#)
- обратная динамика, [137](#), [139](#), [144](#), [148](#), [152](#)
- обратный якобиан, [143](#)
- ориентация, [202](#)
- параллельная композиция, [151](#)
- позиция, [133](#)
- позиция и ориентация, [203](#)
- пропорционально-производная, [135](#), [136](#), [144](#)
- крутящий момент, [176](#)
- транспонированный якобиан, [142](#)
- Конвейерная, [164](#)

ременная, 165
цепная, 164
металлическая цепная,
164 роликовая, 165
Конвейерная лента, 158
Сотрудничество, 173
Координатная база
 кадра, 231
 камера, 109
 глобальные, 189, 194, 200, 204, 206
 изображения,
 109 индекс,
 111
 локальные, 191 механический
 интерфейс, 232 ссылки,
 23, 31 робот,
 208 мир, 133, 231
Координаты
 внешние, 49, 80, 133, 141, 145, 151, 152 изображение,
 111 указатель,
 110
 внутреннее, 49, 133
 сустав, 80
Кориолис, 68 лет
Время цикла, 159
Цилиндр
 пневматический, 158
Цилиндрический робот, 231

Д

Опасность, 153
Степени свободы, 5, 6, 210, 217
Робот Дельта, 69, 75
Дифференциальный привод, 192
Водоизмещение, 16

Дистанционное
 торможение, 180
 вторжение, 180 защитное
 разделение, 180 остановка, 180
Примитивы динамического движения (DMP), 221, 223

оценка, 225
модуляция, 227
Динамическая система
 линейная, 222

Е

Электрический захват, 167
Энкодер
 магнитный, 92
 оптический, 89

Рабочий орган, 133, 142, 149, 160
Углы Эйлера, 39, 218
Экзоскелет, 2, 3
 пассивных, 220

Ф

Устранение неисправностей, 154
Питатель,
 магазин 160 ,
 деталь 163 ,
 вибратор 163 ,
 чаша вибратора 163 ,
 вибратор рядный 163 , 164
Подающее устройство, 160
Пальцевая
 пружина, 167
Крепеж, 160
Силовой
 контакт, 148, 149, 152 реакция
 земли, 211 предельная,
 177, 181 магнитная, 170
 допустимая, 183

Датчик силы и крутящего момента, 98
Датчик силы, 98
Срок принуждения, 223
Проекция вперед, 108, 114

Г

Хватка
 силой, 167
 формой, 167
 надежностью, 167
Гравитация, 68
Захват, 39, 41, 46, 165
 электрический,
 167 гидравлический,
 167 магнитный,
 169 многопальцевый, 166
 пневматический,
 167 двухпальный, 166
 вакуумный, 168
Направляющее устройство, 178

Точечная сварка пистолетом,
 171 сварка, 171
Гироскоп, 94

час
Ручное управление, 177, 178, 220
Тактильный робот, 2

Захват движения человека, [217](#)
Гуманоидный робот, [3](#), [209](#), [210](#)
Гидравлический захват, [167](#)

я

Координаты изображения, [111](#)
Изображение плоскости, [109](#)
Обработка изображений, [118](#)
Имитационное обучение, [210](#), [216](#), [217](#)
Инклинометр, [94](#)
Индекс координат, [110](#)
Инерция, [68](#)
Инерциальный измерительный блок, [94](#), [96](#), [219](#)
Мгновенный центр вращения, [193](#)
Окно интерфейса, [186](#)

Дж

Датчик крутящего момента шарнира, [101](#)

К

Кинематическая пара, [27](#)
Кинематика, [49](#)
 прямая, [49](#), [51](#), [73](#), [80](#), [214](#)
 обратная, [49](#), [51](#), [73](#), [80](#)

л

Лазерный дальномер, [103](#)
Лазерный сканер, [104](#)
Нога, [70](#)
Лидар, [105](#)
Концевой выключатель, [98](#)
Локализация, [189](#), [197](#)
 индуктивное наведение, [197](#)
 лазерное, [197](#)
 магнитное пятно, [197](#)
 магнитная лента, [197](#)
 естественное, [197](#)
 одометрическое, [199](#)
 радиотехническое, [199](#) проводное, [197](#)

Двуногое

 передвижение, [210](#), [211](#) фаза двойной опоры, [213](#) фаза одиночной опоры, [213](#) фаза опоры, [213](#) фаза качания, [213](#) ходьба, [213](#)

М

Машина

индексация, [159](#)
Магнит
 электромагнит, [169](#)
 постоянный, [170](#)
Магнитный энкодер, [92](#)
Магнитный захват, [169](#)
Магнитометр, [94](#)

Матричное гомогенное преобразование, [11](#), [13](#), [16](#), [20](#), [27](#)
 Якобиан, [51](#), [55](#), [142-144](#), [148](#) оборотов, [13](#), [39](#), [42](#)
Мобильный робот, [1](#), [189](#), [191](#)
 мобильный вилочный погрузчик, [189](#)
 тягач, [189](#) погрузчик, [189](#)
Модель
 динамическая, [136](#), [138](#), [148](#), [176](#)
 геометрическая, [19](#), [24](#)
 кинематическая, [142](#)
Контроль скорости и разделения, [177](#)

Н

Наноробот, [1](#)
Навигация, [189](#), [197](#)

О

Обход препятствия, [205](#)
Одометрия, [199](#)
Всенаправленный, [190](#)
Операция
 совместная, [173](#)
Оператор, [174](#)
Оптический энкодер, [89](#)
 абсолютных, [89](#)
 инкрементальных, [91](#)
Ориентация, [6](#), [16](#), [39](#)
Промак, поза [240](#) , [233](#)

п

Поддон, [158-160](#)
 литье под давлением, [161](#)
 металл, [161](#)
 вакуумное формование, [161](#)
Параллельный робот, [69](#), [73](#), [76](#), [80](#)
Держатель детали, [159](#)

Контроль пути, [202](#)
Следование пути, [207](#)
Планирование пути, [189](#), [201](#)

Перспективное матричное уравнение, 110
Перспективная проекция, 108, 110
Фаза
 эволюция, 228
 переменная, 223, 228
Платформа, 70
Пнеumoцилиндр, 158
Пневматический захват, 167
Очки
 финальные, 126,
 129 начальные, 126,
 129 виа, 126, 128, 129
Точка-точка, 123, 223, 226
Поза, 6, 16
 начальная, 23, 29, 31, 35
Позиция, 6, 16
Потенциометр, 87
Давление
 допустимо, 183
Производственная линия, 158
 асинхронные, 159
 гибридные,
 158 рядные,
 158 роторные,
 158 синхронные, 159
Демонстрационное программирование, 210, 217
Проекция
 назад, 110, 113–115 вперед, 108,
 114 перспектива, 108,
 110
Датчик приближения, 102
Насос
 вакуумный, 169
 Вентури, 169

Всплывающее

Квадрокоптер, 2
Кватернион, 39, 44, 45

Р

Датчик дальности, 102
Редуктор, 86
Расстояние
 повторяемости,
 239 дрейф, 233,
 240 ориентация, 238
 поза, 233, 235, 238
 позиция, 238
Робототика, 3
Робот
 антропоморфный, 6, 231

декартова, 231
коллаборативная, 9, 157, 173, 175, 184
цилиндрическая, 231
Дельта, 69, 75
концевой эффектор,
160 окружающая
среда, 153
гаптическая, 2 гуманоидная,
3, 209, 210 промышленная, 173,
174, 178 мобильная, 1,
189, 191 параллельная, 1, 69, 73,
76, 80 реабилитационная, 2
SCARA, 6, 22, 35, 231 сегмент,
27 мягких, 9

сферических, 231
система, 173
система технического зрения, 160
Рука робота, 4
Роботизированная ячейка, 6, 8, 153
Динамика робота, 60, 67
Захват робота, 4
Рука робота, 9
Робототехника,
1 гуманоид, 209
Роботизированный
 шарнир, 1, 4
 призматических,
 4 вращающихся, 4
 вращательных, 4 поступательных, 4
Робот-манипулятор, 1, 4, 6, 7
Сегмент роботов, 1, 4
Робот, 1
Зрение робота, 107
Запястье робота, 4
Вращение, 6, 12, 16
Матрица вращения, 13, 39, 42
Углы RPY, 39, 42, 134

С

Безопасность, 153–155
Угроза безопасности, 174
Робот SCARA, 6, 231
ощущение
 боль, 182
Сенсорные, 2, 4, 85
 бамперные,
 98 емкостные, 185
 контактные,
 96
 электрические, 85
 электромагнитные, 85 экстероцептивные, 85

сила, 98, 185
и момент, 98, 175 инклиноматер,
94 инерциальная
измерительная единица, 94 крутящий
момент, 101, 175 лазерный
дальномер, 103 лазерный
сканер, 104
LiDAR, 105
концевой
выключатель, 98 магнитный
энкодер, 92
оптический, 86
оптический энкодер,
89 потенциометр, 87
проприоцептивный,
85 бесконтактный,
102 дальномерный ,
102 рейтинг
безопасности, 176
тахометр, 93 тактильный, 96 , 175, 185 ультразвуковой дальномер, 102, 29
Диск абстракции датчика, 200
Одновременная локализация и сопоставление
(СЛАМ), 200
Сферический робот, 231
Пружинный палец, 167
Время стабилизации, 233, 240
Стандарты, 153
Статика, 54
Стереовидение, 115
Платформа Стюарта-Гофа, 69, 74, 78, 82

Останов аварийный, 178, 184
защитный, 178–180
предохранительный контролируемый, 177–180, 182
Опорный полигон, 211, 214

Т
Циферблат
настойный,
159 поворотный, 161
Тахометр, 93
Тактильный датчик,
96 емкостный, 97
деформационный, 97
магнитный, 98
механический, 98
оптический,
97 пьезоэлектрический, 97
Телеманипулятор, 2, 3, 9

Газовая
сварка, 171
Трекинг
оптический, 217
Траектория, 123, 132
интерполяция, 126, 129
планирование, 123
Перевод, 5, 12, 16
Трапецевидный профиль скорости, 123, 126

U
Ультразвуковой дальномер, 102
Уницикл модель, 194

В
Переменная
вращательный,
29 поступательный,
Виртуальная среда, 2
Робот
Vision, 107
Система обзора, 158

Вт
Ходьба
динамическая,
215 статическая, 215
Колесо, 190
роликов, 190
фиксированных,
190 сферических,
190 стандартных управляемых, 190
Шведский, 190
Рабочая зона, 58
Рабочая область, 6, 55, 153, 231
совместная, 174, 186 ловкая,
59 максимальная,
174 оперативная,
174 доступная, 59
ограниченная,
174
Датчик на запястье, 98

Z
Точка нулевого момента (ZMP), 210, 211, 214