Содержание

От издательства 8

Предисловие 9

Глава 1. Введение 11
1.1. Возникновение и применение человекоподобных сервисных роботов 11
1.2. Развитие человекоподобных сервисных роботов и ключевые технологии 14
1.2.1. Обзор исследований и применений человекоподобных сервисных роботов 14
1.2.2. Основы и передовые направления кинематики роботов 19
1.2.3. Методы и подходы к планированию траектории 23
1.2.4. Планирование траектории манипулятора сервисного робота 26
1.3. Ключевые технологии и технические трудности 28

Глава 2. Анализ и моделирование кинематики манипулятора 30
2.1. Обзор анализа и моделирования кинематики манипулятора 30
2.2. Методы описания положения и ориентации твердого тела 31
2.3. Анализ прямой кинематики манипулятора 33
2.4. Иерархический итерационный метод обратного решения на основе эвристики 37
2.4.1. Принцип метода FABRIK 37
2.4.2. Оценка обратного решения на основе метода C-FABRIK 40
2.4.3. Снижение размерности уравнений обратной кинематики на основе аналитического подхода 44
2.4.4. Процесс реализации эвристического послойного итеративного метода 47
2.4.5. Выбор избыточных решений обратной задачи 49
2.5. Анализ производительности эвристического послойного итеративного метода 51
2.6. Анализ скорости и ускорения манипулятора 60
2.7. Моделирование и анализ эвристического метода обратной кинематики 62
2.7.1. Настройка эксперимента 62
2.7.2. Результаты моделирования и обсуждение 64
2.8. Выводы по главе 72

Глава 3. Методы статического планирования траекторий манипулятора 73
3.1. Обзор методов статического планирования траекторий манипулятора 73

3.2. Планирование траектории 75
3.2.1. Конфигурационное пространство 75
3.2.2. Представление препятствий и планируемых траекторий 76
3.3. Основы метода быстрого роста дерева (FMT*) 78
3.4. Метод быстрого роста дерева на основе информированного семплирования и произвольного времени (IAFMT*) 82
3.4.1. Обзор метода IAFMT* 82
3.4.2. Планирование осуществимых траекторий на основе гибридного инкрементального поиска 85
3.4.3. Основы технологии информированного семплирования 87
3.4.4. Планирование высококачественных траекторий на основе динамического оптимального поиска 88
3.4.5. Формирование и корректировка субоптимальных соединений в траектории 91
3.5. Анализ производительности метода IAFMT* 94
3.5.1. Вероятностная полнота 94
3.5.2. Асимптотическая оптимальность 100
3.5.3. Сложность алгоритма 103
3.6. Эксперименты и анализ 105
3.6.1. Настройка экспериментов по тестированию производительности 105
3.6.2. Результаты и обсуждение тестов 107
3.6.3. Моделирование и анализ манипулятора 110
3.7. Выводы по главе 112

Глава 4. Методы динамического планирования траекторий манипулятора 113

4.1. Обзор методов динамического планирования траекторий манипулятора 113
4.2. Модель регрессии на основе гауссовских процессов 114
4.3. Метод гауссовского стохастического динамического планирования 117
4.3.1. Базовая структура динамического планирования 117
4.3.2. Генерация случайных траекторий на основе регрессии гауссовского процесса 118
4.3.3. Локальное динамическое сглаживание траекторий 121
4.4. Анализ производительности метода гауссовского стохастического планирования 125
4.5. Эксперименты и анализ динамического избегания препятствий 130
4.6. Выводы по главе 132

Глава 5. Проектирование системы манипулятора и интеллектуальный захват 134

5.1. Обзор проектирования системы манипулятора и интеллектуального захвата 134
5.2. Обзор экспериментальной платформы человекоподобного сервисного робота 135

5.3. Проектирование системы манипулятора сервисного робота 139
5.3.1. Анализ требований к проектированию системы манипулятора 139
5.3.2. Конструкция общей архитектуры манипулятора 140
5.3.3. Выбор аппаратных компонентов системы манипулятора 141
5.3.4. Архитектура системы управления манипулятором 153
5.4. Проектирование и построение системы захвата сервисного робота 154
5.4.1. Общая схема системы захвата 154
5.4.2. Реализация системы захвата 156
5.5. Эксперименты по захвату и размещению объектов 159
5.5.1. Настройка экспериментов со статическим планированием 160
5.5.2. Результаты и обсуждение экспериментов со статическим планированием 161
5.5.3. Настройка экспериментов с динамическим планированием 166
5.5.4. Результаты и обсуждение экспериментов с динамическим планированием 168
5.6. Выводы по главе 172

Список литературы 174

От издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте *www.dmkpress.com*, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу *dmkpress@gmail.com*; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу *http://dmkpress.com/authors/publish_book/* или напишите в издательство по адресу *dmkpress@gmail.com*.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу *dmkpress@gmail.com*. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты *dmkpress@gmail.com*.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Предисловие

С быстрым развитием технологий роботы перестали существовать в единственной форме – на рынке постоянно появляются самые разнообразные типы роботов. Среди них особенно выделяются интеллектуальные человекоподобные сервисные роботы, которые объединяют достижения сразу нескольких дисциплин, включая механику, электронику, информатику, материаловедение, сенсорику и технологии управления. Уровень их развития отражает научно-технический потенциал страны, поэтому они привлекают к себе большое внимание. Интеллектуальные человекоподобные сервисные роботы играют важную роль в повышении способности к реагированию на внештатные ситуации, стимулировании общего экономического роста и улучшении качества жизни населения. Тем не менее на сегодняшний день их способности к автономному планированию и выполнению операций в сложных условиях остаются ограниченными. В данной книге рассматриваются вопросы кинематики и методов планирования траектории для манипуляторов человекоподобных сервисных роботов с целью повышения уровня их интеллектуализации.

Методы кинематики и планирования движения роботов манипуляторов играют ключевую роль в процессе функционирования таких роботов. Книга охватывает несколько аспектов, включая кинематику манипуляторов, планирование траекторий, проектирование и построение систем, а также интеллектуальное захватывание объектов. В первой главе представлена исследовательская база, связанная с человекоподобными сервисными роботами, а также дано достаточно полное обозрение ключевых теоретических и технических аспектов. Кроме того, в ней обозначены основные существующие проблемы и вызовы. Вторая глава посвящена анализу кинематики манипулятора сервисного робота, где предлагается эвристический метод послойной итеративной инверсной кинематики. Этот метод характеризуется высокой эффективностью решения, не требует задания начальных значений и способен одновременно вычислять несколько решений, обеспечивая тем самым быструю и точную обратную кинематику манипулятора. В третьей главе подробно излагается усовершенствованный метод быстрого роста дерева (Fast Forward Tree, FTT), который объединяет в себе технологию информированного семплирования и методы с произвольным временем исполнения. Этот подход направлен на решение распространенных проблем, связанных с планированием траекторий в пространствах высокой размерности, таких как низкая эффективность, недостаточная адаптивность и неудовлетворительное качество получаемых траекторий. В четвертой главе предлагается метод локального планирования траектории, основанный на

регрессии с использованием гауссовских процессов, что позволяет значительно повысить способность манипулятора к динамическому избеганию препятствий. В пятой главе представлена система захвата для сервисного робота, которая использовалась в качестве экспериментальной платформы. С ее помощью были проведены испытания по интеллектуальному захвату и размещению предметов в сложной среде с применением как статических, так и динамических методов планирования траектории. Эти эксперименты подтвердили практическую реализуемость и эффективность предложенных методов кинематики и планирования движения манипулятора.

Первую главу книги написали Чжан Мин и Лю Гуанхуэй из Шэньянского индустриального университета; вторую главу – Чжан Мин; третью и четвертую главы – Сюй Цзин из того же университета; пятую главу – Лю Гуанхуэй. Общая редакция книги была выполнена Чжан Мином. В написании книги также приняли участие Хуан Чэнсюань, Ли Лисян, Цай Синьюй, Ли Хунтао, Вэнь Цзяньмин, Чжао Тайжэнь, Лю Цзялун, Цуй Хаодун, Хань Ицзюнь, Ван Фухуэй, Тянь Бовэнь и другие. Авторы выражают искреннюю благодарность всем руководителям и коллегам, оказавшим поддержку и помощь в процессе работы над книгой. Также выражается глубокая признательность авторам всех использованных в работе источников.

Исследование и издание данной книги были поддержаны Национальным фондом естественных наук Китая (52005344), Фондом естественных наук провинции Ляонин (2022-MS-271), а также совместным проектом Министерства образования КНР по сотрудничеству науки и промышленности (220504422174121). Авторы выражают искреннюю признательность за оказанную поддержку. Учитывая ограниченность собственных знаний и опыта, авторы с благодарностью примут любые замечания и критику от читателей.

Шэньянский индустриальный университет
Чжан Мин, Сюй Цзин, Лю Гуанхуэй

Глава 1

Введение

1.1. Возникновение и применение человекоподобных сервисных роботов

С развитием высоких технологий человекоподобные сервисные роботы стали важной частью всей сферы сервисной робототехники. Эти роботы имитируют внешний вид и поведение человека, интегрируя в себе достижения таких дисциплин, как машиностроение, информационные технологии, материаловедение, интеллектуальное управление и биомедицинская инженерия. Они находят широкое применение не только в промышленном производстве, но и постепенно выходят на такие области, как медицина, образование и бытовое обслуживание. Развитие человекоподобных сервисных роботов имеет важное значение для укрепления национальной обороноспособности, повышения готовности к чрезвычайным ситуациям, стимулирования экономического роста и улучшения качества жизни населения [1–3]. Данная книга дает обзор эволюции человекоподобных сервисных роботов, их ключевых технологий, а также представляет методы кинематики и планирования траектории манипуляторов, тем самым обогащая научные результаты в данной области и предоставляя теоретическую и техническую базу для дальнейших исследований подобных роботов.

Появление человекоподобных сервисных роботов стало результатом многолетнего стремления человечества к созданию машин, обладающих интеллектом и способных к взаимодействию. Ученые и инженеры, вдохновленные мечтой о создании устройств, способных имитировать человеческое поведение и внешний вид, посвятили себя разработке интеллектуальных помощников, способных эффективно поддерживать людей. Благодаря неустанным исследованиям и экспериментам развитие робототехники непрерывно продвигается вперед. С середины XX века, на фоне стремительного прогресса науки и техники, эта амбициозная мечта начала постепенно воплощаться в реальность. Однако вместе с научно-техническим прогрессом

встали и новые проблемы, среди которых все более остро ощущается нехватка рабочей силы [4]. Одновременно с этим растут ожидания общества по поводу более интеллектуального и комфортного образа жизни. Быстрое развитие общества превратило технологии человекоподобных сервисных роботов в горячую тему научных исследований. Такие роботы могут выполнять задачи в области ухода на дому, предоставления общественных услуг, а также работы в опасных условиях. Как показано на рис. 1.1, разработанный Итальянским институтом технологий сервисный робот WALK-MAN участвует в операциях по спасению в опасной среде. По мере совершенствования технологий человекоподобных сервисных роботов усиливаются надежды на то, что с их помощью удастся решить проблемы нехватки рабочей силы, низкой производительности труда и неблагоприятных условий работы. Сегодня такие роботы прокладывают путь в новую эпоху – от медицинской помощи до домашних сервисов, от ликвидации последствий катастроф до космических исследований, – превращая фантастические мечты в реальные инструменты прогресса человеческой цивилизации.

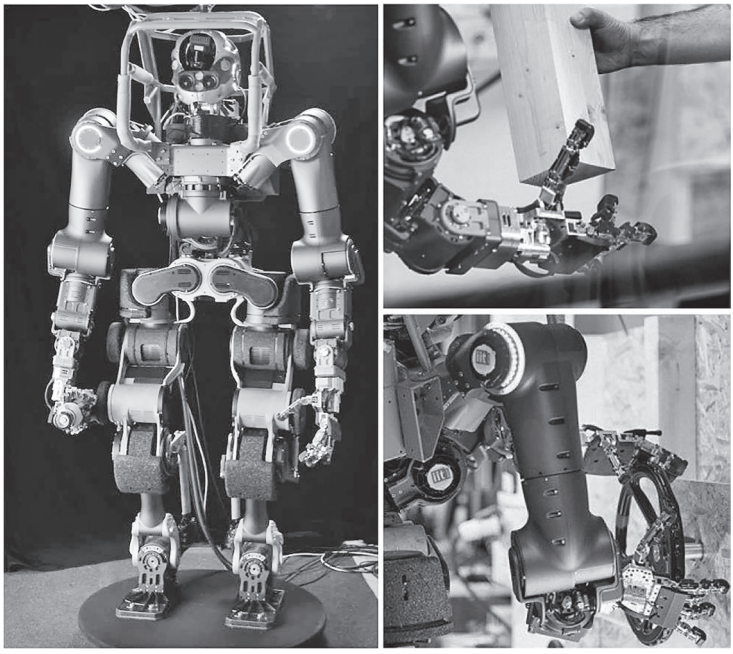


Рис. 1.1 ❖ Человекоподобный сервисный робот оказывает помощь в опасной спасательной операции

Техническое развитие человекоподобных сервисных роботов стало возможным благодаря прорывам в таких ключевых направлениях, как кинема-

тика и планирование движения [5]. Применение этих технологий позволяет роботам лучше адаптироваться к окружающей среде, выполнять сложные задачи и обеспечивать более естественное взаимодействие с пользователем. В сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта данные ключевые технологии позволяют роботам непрерывно обучаться и оптимизировать свою работу, открывая широкие перспективы применения в сферах домашнего обслуживания, медицинского ухода и других направлениях [5, 6].

В последние годы человекоподобные сервисные роботы нашли применение в различных областях – от быта и медицины до бизнеса и образования, значительно повышая качество жизни и эффективность работы. В домашней среде они выступают в роли заботливых помощников, оказывая пожилым людям поддержку в повседневной жизни. В медицине такие роботы могут участвовать в хирургических операциях или помогать пациентам в восстановительной терапии, повышая безопасность и эффективность медицинского обслуживания. В коммерческих пространствах человекоподобные роботы, выполняющие функции клиентского сервиса, благодаря дружелюбному интерфейсу и высокой производительности улучшают впечатления посетителей [7, 8]. Подобные роботы также находят применение в сфере образования. Так, в старшей школе Сетоси при университете Васэда в префектуре Фукусима (Япония) человекоподобный робот Pepper используется для помощи учащимся с нарушениями коммуникативных навыков в изучении английского языка и робототехники [9]. Благодаря функции распознавания эмоций робот может взаимодействовать со школьниками, стимулируя их интерес к обучению и способствуя развитию социальных навыков. Pepper стал настоящим другом и помощником в учебе, ярко продемонстрировав потенциал человекоподобных сервисных роботов в образовательной и социально-коммуникативной сферах. В будущем такие интеллектуальные роботы будут все глубже интегрироваться в общество, становясь мощным инструментом повышения качества жизни и эффективности труда [10, 11].

В настоящее время разработка и внедрение человекоподобных сервисных роботов сталкиваются с рядом серьезных вызовов. Основные сложности касаются как теоретических и технических аспектов, так и высоких издержек на производство. В научно-техническом плане остаются нерешенными вопросы, связанные с продвинутым восприятием, когнитивными функциями и механизмами автономного принятия решений. В сфере коммерциализации высокие затраты на разработку и изготовление ограничивают широкое распространение таких роботов [12]. Однако в перспективе, благодаря непрерывному техническому прогрессу, снижению затрат и росту общественного признания, человекоподобные сервисные роботы будут все активнее внедряться в повседневную жизнь.

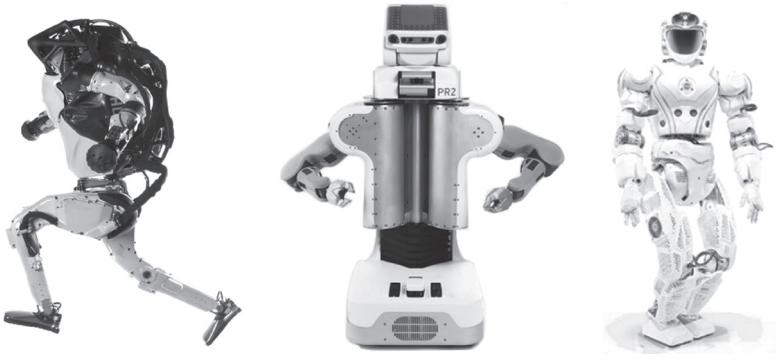
1.2. Развитие человекоподобных сервисных роботов и ключевые технологии

1.2.1. Обзор исследований и применений человекоподобных сервисных роботов

Работы по разработке человекоподобных роботов начались в 1968 году под руководством профессора Катō Итирō в Университете Васэда (Япония). После успешного создания компанией Honda в 1996 году человекоподобного сервисного робота модели P2 исследования в этой области в конце XX и начале XXI века вступили в фазу бурного развития, охватив множество стран. Развитые государства начали активно инвестировать в создание высокоинтегрированных человекоподобных сервисных роботов, вкладывая в это значительные людские, материальные и финансовые ресурсы. Хотя исследования в этой области в Китае начались сравнительно поздно, благодаря мощной государственной поддержке и неустанным усилиям научных коллективов в стране были достигнуты впечатляющие результаты. За более чем 50 лет развитие исследований в области человекоподобных сервисных роботов прошло путь от теоретических основ и локальных экспериментов XX века к интеллектуализированным приложениям и комплексной интеграции в XXI веке. При этом охват научных дисциплин значительно расширился – от начальных направлений (механика, информационные технологии, электроника, материаловедение, автоматическое управление) до таких областей, как психология, биология, поведенческие науки, нейронаука и даже социальные науки, что демонстрирует беспрецедентную междисциплинарную интеграцию [13, 14]. В данном разделе кратко рассматривается текущее состояние ведущих международных проектов по человекоподобным сервисным роботам.

В США одними из наиболее известных человекоподобных сервисных роботов являются Atlas от компании Boston Dynamics [15], PR2 от компании Willow Garage [16] и серия Robonaut, разработанная NASA [17], как показано на рис. 1.2. Робот Atlas – это один из самых высокотехнологичных человекоподобных роботов с полностью гидравлическим приводом. С момента его появления в 2013 году было выпущено три усовершенствованные версии. Робот обладает высокой проходимостью в полевых условиях и может применяться для аварийно-спасательных и военных задач. Последняя версия Atlas имеет рост около 1,5 м, массу около 75 кг и 28 степеней свободы. Сенсоры, размещенные внутри корпуса и в ногах, позволяют в реальном времени собирать данные о положении и ориентации, помогая роботу сохранять равновесие. Лазерный дальномер и стереокамеры, установленные в голове, обеспечивают Atlas функции распознавания поверхности, избегания препятствий и ав-

тономной навигации [18, 19]. В настоящее время Atlas способен выполнять широкий спектр сложных действий, включая передвижение по пересеченной местности, подъем по лестнице, удержание равновесия на одной ноге, перенос коробок, автоматический подъем после падения и даже сальто назад [20–22]. Сервисный робот PR2 был разработан компанией Willow Garage в сотрудничестве со Стэнфордским университетом. Он оснащен манипуляторами с семью степенями свободы и захватом с одной степенью свободы. Максимальная нагрузка на один манипулятор составляет 1,8 кг. В области кисти установлены массив датчиков давления и трехосевой акселерометр. Туловище робота может подниматься и опускаться. Он оборудован двумя четырехъядерными процессорами Intel Xeon i7 и всенаправленным шасси, развивающим скорость до 1 м/с. PR2 способен выполнять такие задачи, как складывание полотенец, автоматическая подзарядка, открытие холодильника и извлечение пива, размещение корзины для белья в загроможденной обстановке, а также выполнение простых кухонных операций, например использование лопатки [23–26]. Среди космических сервисных роботов серии Robonaut наибольшую известность получили модели Robonaut 2 (R2) и Robonaut 5 (R5), также известный как Valkyrie. В 2006 году NASA совместно с компанией General Electric разработали первого робота Robonaut 1 (R1) для выполнения задач на орбите [27]. Впоследствии для выполнения операций на МКС четырехколесное шасси R1 было заменено на два манипулятора, и таким образом был создан робот R2 [28]. В феврале 2011 года R2 был отправлен на МКС для выполнения космических задач, но в связи с нестабильной работой в феврале 2018 года он был возвращен на Землю. В 2013 году NASA успешно разработало пятую модель космического сервисного робота – Valkyrie [29]. Этот робот имеет рост 1,9 м, массу 88 кг, 44 степени свободы и более 200 независимых сенсоров. Манипуляторы с семью степенями свободы оснащены 38 датчиками. В области рук, ног и пояса установлены серийные эластичные приводы, которые позволяют роботу безопасно взаимодействовать с человеком при выполнении задач. Три экземпляра Valkyrie были направлены

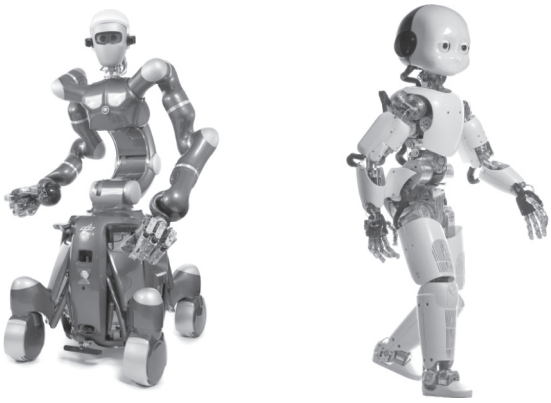


(a) Atlas (b) PR2 (c) Valkyri

Рис. 1.2 ❖ Человекоподобные сервисные роботы США

в высшие учебные заведения США и Европы для проведения прикладных разработок. В настоящее время Valkyrie способен передвигаться по пересеченной местности, проходить через узкие проемы, открывать двери, переносить и передавать предметы, а также выполнять серию нажатий на кнопки [30–32].

Робот Rollin' Justin, разработанный Германским аэрокосмическим центром (DLR) [33], и робот iCub, созданный Итальянским технологическим институтом [34], представляют собой два знаковых европейских проекта в области человекоподобных сервисных роботов (см. рис. 1.3). Робот Rollin' Justin имеет рост 1,91 м, весит около 200 кг и обладает 51 степенью свободы. Он оснащен манипуляторами с 7 степенями свободы и четырехпальцевыми ловкими руками. Основные области его применения – это домашние и космические сервисы. Почти все суставы Rollin' Justin оснащены датчиками крутящего момента, что позволяет осуществлять мягкое управление и безопасное взаимодействие с человеком. Он оборудован двумя стереокамерами и четырьмя RGB-D камерами, которые обеспечивают как распознавание объектов, так и построение трехмерной карты окружающего пространства в реальном времени. Робот способен выполнять планирование движения в неструктурированной и динамичной среде, самостоятельно избегать препятствий и решать поставленные задачи. После более чем десятилетнего развития и модернизации он научился выполнять такие задачи, как подметание пола, мытье окон, приготовление кофе и обслуживание оборудования, имитирующего поверхность планет в лабораторных условиях [35–38]. Робот iCub имеет рост 1,04 м, вес 25 кг и обладает 53 степенями свободы. Его основная механическая система построена на тросовом приводе. Он оснащен сенсорами зрения, слуха, осязания и проприоцепции (восприятия собственного тела). iCub используется как исследовательская платформа более чем в 30 научных учреждениях по всему миру для изучения человеческого познания и искусственного интеллекта. За более чем десятилетие развития этот проект совершил качественный скачок – от робота, подчиняющегося

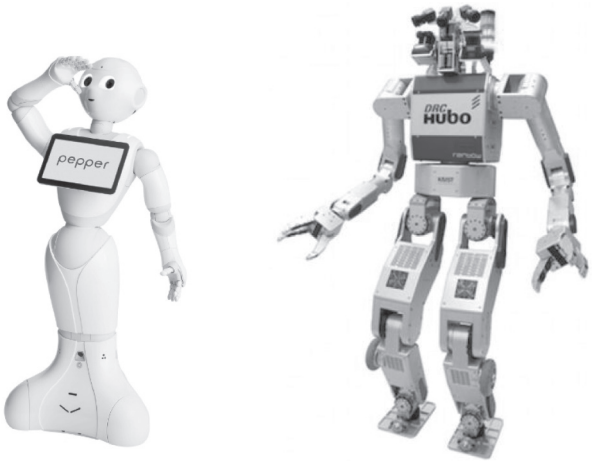


(a) Rollin' Justin (b) iCub

Рис. 1.3 ❖ Человекоподобные сервисные роботы Европы

командам, к роботу, обладающему зачатками самосознания, что является значимым шагом в истории робототехники. Робот iCub способен связывать виртуальные сложные действия с визуальной и звуковой обратной связью. При выполнении действий он формирует ожидания относительно сенсорного отклика и, обучаясь, улучшает свои поведенческие модели. Этот робот может безопасно находиться рядом с людьми, а также обладает способностью к пониманию и предсказанию их потребностей и поведения [39–42].

Робот Pepper, выпущенный японской компанией SoftBank [43], и робот DRC-HUBO, разработанный Корейским институтом передовой науки и технологий (KAIST) [44], являются всемирно известными человекоподобными сервисными роботами (см. рис. 1.4). Робот Pepper имеет рост 1,2 м, массу 28 кг и 20 степеней свободы. Это первый в мире коммерческий социальный робот, способный распознавать человеческие эмоции. Благодаря встроенному эмоциональному движку Pepper способен распознавать положительные и отрицательные эмоции человека, а затем реагировать на них с помощью выражения лица, жестов и речи. Система сбора данных и облачных вычислений позволяет роботу различать новых и постоянных клиентов, обеспечивая персонализированное обслуживание [45–47]. Робот Pepper успешно применяется в коммерции и образовании – его можно встретить в магазинах, больницах, библиотеках, учебных заведениях и даже в домашних условиях [48–50]. Робот DRC-HUBO имеет рост 1,75 м, массу 80 кг и 33 степени свободы. Он может передвигаться как на двух ногах, так и с помощью колес, переключаясь между режимами движения в зависимости от условий. Основные суставы в манипуляторах и ногах приводятся в действие бесщеточными и щеточными сервоприводами постоянного тока мощностью более 100–200 Вт, оснащенными гармоническими редукторами с передаточным числом 100:1 или 200:1 [51,52]. В 2015 году DRC-HUBO занял первое место на

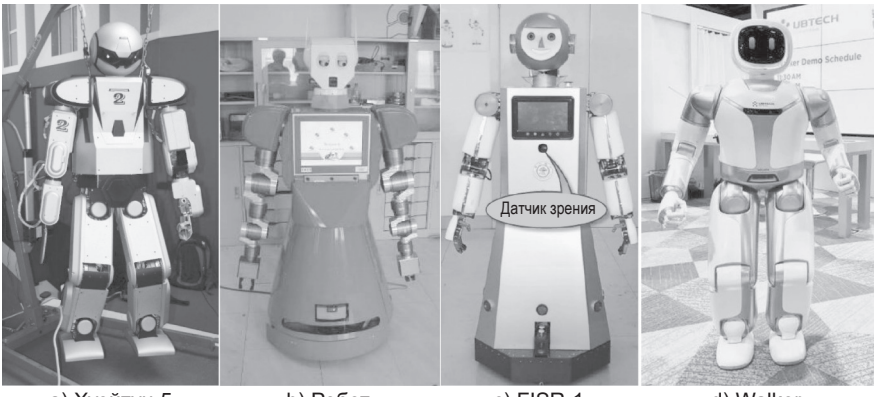


(a) Pepper (b) DRC-HUBO

Рис. 1.4 ❖ Человекоподобные сервисные роботы Японии и Южной Кореи

соревнованиях DARPA Robotics Challenge, организованных Агентством перспективных оборонных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA). В рамках соревнований робот должен был справиться с задачами, связанными с ликвидацией последствий ядерных аварий. DRC-HUBO успешно выполнил все задания, включая вождение автомобиля, демонтаж конструкций, открытие дверей, резку отверстий в стенах с помощью электроинструмента, подключение к пожарному гидранту и поворот клапанов. Кроме того, в 2018 году этот робот был выбран в качестве факелоносца зимней Олимпиады в Южной Корее [53–55].

В последние годы в Китае ряд научно-исследовательских институтов активно ведет разработки в области человекоподобных сервисных роботов. Среди наиболее знаковых проектов можно отметить серию роботов «Хуэйтун», созданную Пекинским политехническим университетом [56–58]; мобильного человекоподобного сервисного робота, разработанного Шанхайским университетом [59]; семейного интеллектуального сервисного робота FISR-1, созданного Шанхайским университетом Цзяотун [60]; а также робота Walker, разработанного компанией UBTECH Robotics [61] (см. рис. 1.5). В 2002 году Пекинский политехнический университет успешно разработал первого человекоподобного робота серии «Хуэйтун-1». После многолетнего усовершенствования была создана уже пятая версия. Роботы «Хуэйтун-1»–«Хуэйтун-3» сделали прорыв в технологиях устойчивой двуногой ходьбы и реализации сложных движений. Они способны самостоятельно передвигаться, приветствовать людей, выполнять движения тайцзи и танцевать. Робот «Хуэйтун-4» может имитировать мимику человека. «Хуэйтун-5» представляет собой значительный шаг вперед в управлении ловкими движениями на основе высокоскоростного зрения и в обеспечении полной координации тела для автономного реагирования. Он способен играть в настольный теннис с человеком [62, 63]. Разработанный Шанхайским университетом человекоподобный мобильный сервисный робот имеет рост 1,75 м и массу 95 кг. Его



a) Хуэйтун-5 b) Робот Шанхайского университета c) FISR-1 d) Walker

Рис. 1.5 ❖ Человекоподобные сервисные роботы Китая

шасси основано на двухколесной дифференциальной системе привода. Робот оснащен двумя манипуляторами с 6 степенями свободы каждый. Благодаря оснащению лазерным лидаром и тройной стереокамерой он способен выполнять автономную навигацию, распознавать объекты, а также захватывать и размещать предметы. Он успешно справляется с задачами приветствия гостей, ведения анонсов и подачи кофе [64, 65].

Робот FISR-1 оснащен двумя манипуляторами с 6 степенями свободы, а его исполнительные органы – механические руки с 3 степенями свободы. Он использует всенаправленное шасси для перемещения и оборудован RFID-сенсором, ультразвуковыми и визуальными датчиками для восприятия окружающей среды. Пользователь может задавать задания роботу через графический интерфейс [66, 67]. Робот Walker имеет рост 1,45 м, массу 77 кг и 36 степеней свободы. Он оснащен манипуляторами с 7 степенями свободы и захватами с 4 степенями свободы. Номинальная грузоподъемность одной руки составляет 1,5 кг. Интегрированные сервоприводы построены на базе бескорпусных моментных двигателей, напрямую соединенных с гармоническими редукторами, что делает конструкцию манипулятора более компактной. Манипуляторы Walker поддерживают мягкое (гибкое) управление и режим «обучения движением» (drag teaching), что позволяет безопасно выполнять относительно сложные действия в конкретных сценариях [68, 69]. На данный момент робот способен подниматься и спускаться по лестницам, ориентироваться с помощью визуальной навигации, а также выполнять задачи захвата и размещения объектов с координацией руки и зрения.

1.2.2. Основы и передовые направления кинематики роботов

Кинематический анализ является важным элементом управления движением и планирования траектории робота. Он позволяет установить соответствие между углами в сочленениях робота и положением/ориентацией его конечного эффектора. Кинематические задачи, как правило, делятся на две основные категории: прямые и обратные. Прямая задача кинематики заключается в определении положения и ориентации конечного эффектора по известным углам сочленений. Обратная задача, наоборот, состоит в нахождении углов сочленений по заданному положению и ориентации конечного эффектора. Для манипуляторов прямая кинематика обеспечивает входные данные для динамического управления, а обратная кинематика служит фундаментом для планирования их движений. Обратная кинематика параллельных манипуляторов, как правило, проще в реализации, в то время как прямая задача вызывает большие сложности. У последовательных (серийных) манипуляторов ситуация обратная: существуют общепринятые методы решения прямой кинематики, но обратная задача остается трудной и до конца не решенной как в теоретическом, так и в приклад-

ном плане. Это одна из наиболее сложных и актуальных тем исследований. Поскольку большинство промышленных манипуляторов имеют последовательную структуру, важно, чтобы вычисление их обратной кинематики было быстрым, точным и устойчивым – в противном случае снижается эффективность всей системы. Поэтому в данном разделе рассматриваются современные методы решения обратной кинематики для последовательных манипуляторов.

Последовательные манипуляторы обычно делятся на два типа по конструкции: с развязанной (декаплированной) и неразвязанной кинематикой. Методы обратного решения для этих двух классов различаются. Если оси вращения последних трех сочленений четырех- или шестистепенного манипулятора пересекаются в одной точке (так называемое сферическое запястье), тогда его положение и ориентация могут быть развязаны, что позволяет получить аналитическое (замкнутое) решение обратной кинематики с помощью аналитических методов [70, 71]. Такие манипуляторы называют «развязанными». Однако из-за требований к задачам, ограничений механической конструкции и погрешностей при производстве и сборке в реальной инженерной практике чаще применяются манипуляторы с неразвязанной конструкцией, не имеющие сферического запястья. Они не удовлетворяют критериям метода Пайпера (Pieper), и для них невозможно получить аналитическое решение. В таких случаях обычно применяются численные методы. Как правило, неразвязанные конструкции обладают большей гибкостью и большей грузоподъемностью по сравнению с развязанными. Человекоподобные сервисные роботы, как правило, оснащаются манипуляторами с 6 или 7 степенями свободы. В случае сферического запястья в 6-степенных системах можно использовать аналитические методы. Однако если запястье не является сферическим – как в большинстве 6- и 7-степенных систем, – то требуется применять численные методы. Шестистепенные манипуляторы отличаются широким диапазоном движений, высокой маневренностью и отсутствием избыточности. Манипуляторы с 7 степенями свободы часто рассматриваются как конфигурация 6+1. Поэтому шестистепенные конструкции являются основным объектом исследований. В данной книге рассматривается шестистепенной последовательный манипулятор с несферическим запястьем.

Аналитические методы в основном подразделяются на геометрические и алгебраические. Геометрический метод заключается в построении уравнений ограничений на основе геометрических соотношений между звеньями манипулятора, что позволяет преобразовать задачу обратной кинематики в задачу плоской или пространственной геометрии. Однако для сложных механизмов в трехмерном пространстве этот подход зачастую оказывается неприменимым из-за отсутствия универсальности, поэтому на практике его часто комбинируют с алгебраическим методом. Так, Чэнь Пэн и соавт. [72] предложили преобразовать пространственную геометрию в плоскую, используя особенности конструкции шестистепенного последовательного манипулятора, что позволило вывести уравнения ограничений и получить

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru