

УДК 681.5:004.93  
ББК 32.816  
К66

**Корк П.**

К66 Машинное зрение и управление в робототехнике / пер. с англ. А. Н. Киселева. – М.: ДМК Пресс, 2026. – 1106 с.: ил.

**ISBN 978-5-93700-263-1**

Данная книга представляет собой фундаментальное и исчерпывающее введение в компьютерное зрение и робототехнику. В ней рассмотрен широкий круг тем, включая цветное зрение, передовые методы сегментации, деформацию изображения, стереозрение, оценку местоположения, глубокое обучение, групповую коррекцию и визуальную одометрию. Уникальной особенностью является объединение всех ключевых концепций компьютерного зрения и управления роботами в одном томе. Материал книги сопровождается примерами на основе портированного на Python популярного пакета Robotics Toolbox for MATLAB®, что позволяет закрепить знания при помощи нескольких строк кода.

Издание будет полезно читателям с разным уровнем подготовки – от студентов и аспирантов, изучающих робототехнику, до опытных инженеров и исследователей, желающих углубить и систематизировать свои знания.

УДК 681.5:004.93  
ББК 32.816

First published in English under the title Robotics, Vision and Control; Fundamental Algorithms in Python by Peter Corke, edition 3.

This edition has been translated and published under licence from Springer Nature Switzerland AG. Springer Nature Switzerland AG takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the translation.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-3-031-06468-5 (англ.)

ISBN 978-5-93700-263-1 (рус.)

Copyright © Peter Corke, under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG, 2023

© Перевод, оформление, издание, ДМК Пресс, 2023

---

# Содержание

<b>Вступительное слово</b> .....	16
<b>Предисловие</b> .....	18
<b>Специальные обозначения</b> .....	26
<b>1 Введение</b> .....	33
1.1 Краткая история роботов.....	33
1.2 Типы роботов.....	36
1.3 Определение робота .....	42
1.4 Зрение роботов.....	42
1.5 Этические аспекты робототехники.....	45
1.6 О книге .....	47
1.6.1 Python и книга.....	48
1.6.2 Условные обозначения, соглашения и структура книги.....	50
1.6.3 Целевая аудитория.....	52
1.6.4 Обучение с помощью книги .....	53
1.6.5 Преподавание с помощью книги.....	53
1.6.6 Структура книги.....	54
1.6.7 Дополнительное чтение .....	57
<b>Часть I Основы</b> .....	59
<b>2 Представление местоположения и ориентации</b> .....	60
2.1 Основы .....	60
2.1.1 Относительное положение.....	60
2.1.2 Системы координат .....	64
2.1.3 Графы положений.....	66
2.1.4 Краткое резюме .....	68
2.2 Работа в двух измерениях (2D).....	71
2.2.1 Ориентация в двух измерениях.....	71
2.2.2 Положение в двух измерениях.....	76
2.3 Работа в трех измерениях (3D).....	86
2.3.1 Ориентация в трех измерениях.....	87
2.3.2 Положение в трех измерениях.....	109
2.4 Дополнительные темы .....	117
2.4.1 Прямой и обратный порядок умножения преобразований.....	117

2.4.2	Поворот системы координат и поворот точки .....	118
2.4.3	Матрица направляющих косинусов.....	119
2.4.4	Эффективность представления .....	119
2.4.5	Расстояние между ориентациями .....	120
2.4.6	Нормализация .....	121
2.4.7	Понятие экспоненциального отображения .....	122
2.4.8	Подробнее о кручениях.....	125
2.4.9	Конфигурационное пространство.....	131
2.5	Использование Toolbox .....	133
2.6	Подведение итогов .....	137
2.6.1	Дополнительное чтение .....	139
2.6.2	Упражнения .....	141
<b>3</b>	<b>Время и движение .....</b>	<b>144</b>
3.1	Изменение положения во времени .....	144
3.1.1	Скорость изменения ориентации .....	145
3.1.2	Скорость изменения положения .....	146
3.1.3	Преобразование пространственных скоростей.....	147
3.1.4	Вращение, задаваемое в приращениях .....	149
3.1.5	Движение твердого тела, задаваемое в приращениях .....	152
3.2	Ускорение тел и системы отсчета .....	153
3.2.1	Динамика движущихся тел .....	153
3.2.2	Преобразование сил и моментов .....	155
3.2.3	Инерциальная система координат.....	156
3.3	Создание положения, изменяющегося во времени .....	158
3.3.1	Гладкие одномерные траектории.....	158
3.3.2	Многокоординатные траектории.....	162
3.3.3	Многосегментные траектории.....	163
3.3.4	Интерполяция ориентации в 3D.....	165
3.3.5	Декартово движение в 3D.....	168
3.4	Применение: инерциальная навигация .....	170
3.4.1	Гироскопы .....	171
3.4.2	Акселерометры .....	175
3.4.3	Магнитометры .....	180
3.4.4	Слияние инерциальных датчиков.....	184
3.5	Подведение итогов .....	188
3.5.1	Дополнительное чтение .....	189
3.5.2	Упражнения .....	190
	<b>Часть II Мобильная робототехника .....</b>	<b>193</b>
<b>4</b>	<b>Мобильные роботы.....</b>	<b>195</b>
4.1	Колесные мобильные роботы.....	197
4.1.1	Автомобили .....	198
4.1.2	Автомобиль с дифференциальным управлением.....	212
4.1.3	Всенаправленное транспортное средство.....	215

4.2	Воздушные роботы.....	218
4.3	Дополнительные темы .....	227
4.3.1	Неголономные и малоприводные системы.....	227
4.4	Подведение итогов.....	231
4.4.1	Дополнительное чтение .....	232
4.4.2	Упражнения .....	235
<b>5</b>	<b>Навигация.....</b>	<b>238</b>
5.1	Введение в реактивную навигацию .....	240
5.1.1	Тележки Брайтенберга .....	241
5.1.2	Простые автоматы .....	244
5.2	Введение в навигацию по картам.....	246
5.3	Планирование маршрута с использованием графической карты.....	249
5.3.1	Планирование маршрута с минимальным временем.....	259
5.3.2	Подведение итогов.....	260
5.4	Планирование маршрута с использованием карты занятости .....	261
5.4.1	Преобразование расстояния.....	261
5.4.2	Алгоритм D* .....	268
5.5	Планирование маршрута с использованием дорожных карт.....	271
5.6	Планирование проходимого маршрута .....	277
5.6.1	Планировщик пути Дубинса .....	278
5.6.2	Планировщик пути Ридса–Шеппа .....	279
5.6.3	Планирование по решетке .....	280
5.6.4	Криволинейные полиномы.....	285
5.6.5	Планирование маршрута в конфигурационном пространстве .....	287
5.7	Дополнительные темы .....	292
5.7.1	Алгоритмы поиска A* и Дейкстры.....	292
5.7.2	Преобразование карт сеток занятости в графы.....	293
5.7.3	Преобразование между графами и матрицами.....	293
5.7.4	Локальное и глобальное планирование.....	293
5.8	Подведение итогов.....	294
5.8.1	Дополнительное чтение .....	295
5.8.2	Ресурсы .....	297
5.8.3	Упражнения .....	298
<b>6</b>	<b>Определение местоположения и картографирование .....</b>	<b>301</b>
6.1	Расчет пути с использованием одометрии .....	307
6.1.1	Моделирование робота .....	308
6.1.2	Оценка положения .....	311
6.2	Локализация с помощью ориентиров на карте .....	317
6.3	Создание карты ориентиров.....	326
6.4	Одновременная локализация и картографирование.....	330
6.5	SLAM на основе графа положений .....	335
6.6	Последовательная локализация методом Монте-Карло.....	342

6.7	SLAM на основе теоремы Рао–Блэквелла .....	349
6.8	Применение: лидар .....	350
6.8.1	Одометрия на основе лидара .....	352
6.8.2	Картографирование на основе лидара .....	354
6.8.3	Локализация на основе лидара .....	355
6.9	Подведение итогов .....	356
6.9.1	Дополнительное чтение .....	358
6.9.2	Упражнения .....	362
<b>Часть III Роботы-манипуляторы.....</b>		<b>365</b>
<b>7</b>	<b>Кинематика робота-манипулятора.....</b>	<b>367</b>
7.1	Прямая кинематика .....	369
7.1.1	Прямая кинематика на основе графа положений .....	370
7.1.2	Прямая кинематика как цепочка звеньев робота .....	378
7.1.3	Многорукие роботы .....	387
7.1.4	Унифицированный формат описания роботов (URDF) .....	390
7.1.5	Параметры Денавита–Хартенберга .....	395
7.2	Обратная кинематика.....	399
7.2.1	Двухмерные (планарные) роботизированные манипуляторы.....	400
7.2.2	Трехмерные роботизированные манипуляторы.....	403
7.2.3	Малоприводный манипулятор.....	407
7.2.4	Многоприводный манипулятор .....	409
7.3	Траектории .....	409
7.3.1	Движение в пространстве сочленений .....	410
7.3.2	Движение в декартовом пространстве .....	412
7.3.3	Представление кинематики в виде блок-схемы.....	414
7.3.4	Движение через сингулярность .....	414
7.3.5	Изменение конфигурации .....	416
7.4	Применение .....	417
7.4.1	Создание надписи на поверхности.....	417
7.4.2	Четвероногий шагающий робот .....	419
7.5	Дополнительные темы .....	424
7.5.2	Создание кинематической модели робота .....	425
7.5.3	Модифицированные параметры Денавита–Хартенберга.....	427
7.5.4	Произведение экспонент .....	429
7.5.5	Определение столкновений.....	432
7.6	Подведение итогов .....	434
7.6.1	Дополнительное чтение .....	434
7.6.2	Упражнения .....	436
<b>8</b>	<b>Скорость манипулятора .....</b>	<b>438</b>
8.1	Якобиан манипулятора .....	438
8.1.1	Якобиан в мировой системе координат .....	439
8.1.2	Якобиан в системе координат рабочего органа.....	442

8.1.3	Аналитический якобиан .....	443
8.2	Применение: управление движением с заданной скоростью.....	445
8.3	Обусловленность якобиана и манипулируемость .....	448
8.3.1	Вырожденные якобианы .....	448
8.3.2	Эллипсоид скорости и манипулируемость .....	450
8.3.3	Работа с вырожденным якобианом .....	454
8.3.4	Работа с неквадратным якобианом .....	455
8.4	Отношения сил.....	461
8.4.1	Преобразование динамических винтов в пространство сочленений.....	461
8.4.2	Эллипсоиды сил .....	462
8.5	Численная обратная кинематика .....	463
8.6	Дополнительные темы .....	465
8.6.1	Якобиан манипулируемости.....	465
8.6.2	Вычисление якобиана манипулятора с использованием кручений.....	465
8.6.3	Манипулируемость, масштабирование и единицы измерения .....	466
8.7	Подведение итогов .....	467
8.7.1	Дополнительное чтение .....	468
8.7.2	Упражнения .....	468
<b>9</b>	<b>Динамика и управление .....</b>	<b>472</b>
9.1	Независимое управление сочленениями .....	473
9.1.1	Приводы.....	473
9.1.2	Трение .....	475
9.1.3	Масса звена .....	477
9.1.4	Редуктор.....	479
9.1.5	Моделирование сочленения робота .....	481
9.1.6	Контур управления скоростью .....	483
9.1.7	Контур управления положением.....	489
9.1.8	Подведение итогов.....	491
9.2	Уравнения движения твердого тела .....	492
9.2.1	Член силы тяжести .....	494
9.2.2	Матрица инерции.....	497
9.2.3	Трение .....	498
9.2.4	Матрица Кориолиса и центробежной связи .....	499
9.2.5	Влияние полезной нагрузки .....	499
9.2.6	Воздействие на основание .....	501
9.2.7	Динамическая манипулируемость.....	501
9.3	Прямая динамика .....	503
9.4	Компенсация динамики твердого тела .....	505
9.4.1	Управление с прямой связью .....	506
9.4.2	Регулятор с вычисляемым крутящим моментом .....	507
9.5	Динамика пространства задач и управление .....	509
9.6	Применение .....	516

9.6.1	Управление в операционном пространстве .....	516
9.6.2	Приводы переменной жесткости .....	519
9.7	Подведение итогов .....	521
9.7.1	Дополнительное чтение .....	522
9.7.2	Упражнения .....	524
<b>Часть IV</b>	<b>Компьютерное зрение .....</b>	<b>529</b>
<b>10</b>	<b>Свет и цвет .....</b>	<b>531</b>
10.1	Спектральное представление света .....	531
10.1.1	Поглощение .....	535
10.1.2	Отражение .....	536
10.1.3	Яркость .....	536
10.2	Цвет .....	538
10.2.1	Человеческий глаз .....	538
10.2.2	Сенсор в цифровой камере .....	542
10.2.3	Измерение цвета .....	543
10.2.4	Воспроизведение цветов .....	545
10.2.5	Цветовое пространство .....	549
10.2.6	Названия цветов .....	554
10.2.7	Другие цветовые и хроматические пространства .....	555
10.2.8	Преобразование между различными основными цветами .....	559
10.2.9	Что такое белый цвет? .....	562
10.3	Дополнительные темы .....	562
10.3.1	Цветовая температура .....	563
10.3.2	Постоянство цвета .....	563
10.3.3	Баланс белого .....	564
10.3.4	Изменение цвета из-за поглощения .....	566
10.3.5	Двухцветное отражение .....	568
10.3.6	Гамма .....	569
10.4	Применение: цветное изображение .....	571
10.4.1	Сравнение цветовых пространств .....	571
10.4.2	Удаление теней .....	572
10.5	Подведение итогов .....	576
10.5.1	Дополнительное чтение .....	577
10.5.2	Источники данных .....	578
10.5.3	Упражнения .....	579
<b>11</b>	<b>Изображения и их обработка .....</b>	<b>582</b>
11.1	Получение изображения .....	583
11.1.1	Изображения из файлов .....	583
11.1.2	Изображения из последовательностей файлов .....	591
11.1.3	Изображения со встроенной камеры .....	592
11.1.4	Изображения из видеофайла .....	592
11.1.5	Изображения из интернета .....	596

11.1.6	Снимки из космоса.....	597
11.1.7	Изображения из кода.....	598
11.2	Гистограммы изображений.....	600
11.3	Монадические операции.....	602
11.4	Диадические операции.....	607
11.4.1	Применения.....	609
11.5	Пространственные операции.....	614
11.5.1	Линейная пространственная фильтрация.....	614
11.5.2	Сравнение с шаблоном.....	631
11.5.3	Нелинейные операции.....	638
11.6	Математическая морфология.....	640
11.6.1	Удаление шума.....	645
11.6.2	Обнаружение границы.....	646
11.6.3	Преобразование «попадание или промах».....	647
11.6.4	Преобразование расстояния.....	649
11.7	Изменение формы.....	651
11.7.1	Обрезка.....	651
11.7.2	Изменение размера изображения.....	652
11.7.3	Пирамиды изображений.....	654
11.7.4	Деформация изображения.....	655
11.8	Подведение итогов.....	659
11.8.1	Дополнительное чтение.....	660
11.8.2	Источники изображений.....	662
11.8.3	Программные инструменты.....	662
11.8.4	Упражнения.....	662

<b>12</b>	<b>Извлечение признаков изображения.....</b>	<b>665</b>
12.1	Получение признаков из области.....	666
12.1.1	Классификация пикселей.....	668
12.1.2	Представление экземпляра объекта.....	681
12.1.3	Описание экземпляра объекта.....	686
12.1.4	Обнаружение объектов с использованием глубокого обучения.....	701
12.1.5	Итоги.....	703
12.2	Получение признаков из линий.....	705
12.2.1	Итоги.....	710
12.3	Получение признаков из точек.....	710
12.3.1	Классические детекторы углов.....	711
12.3.2	Угловые детекторы в масштабируемом пространстве.....	718
12.4	Применения.....	725
12.4.1	Распознавание символов.....	725
12.4.2	Поиск изображений.....	727
12.5	Подведение итогов.....	735
12.5.1	Дополнительное чтение.....	736
12.5.2	Упражнения.....	740

<b>13</b>	<b>Формирование изображения</b> .....	743
13.1	Перспективная камера.....	744
13.1.1	Перспективная проекция.....	744
13.1.2	Моделирование перспективной камеры.....	748
13.1.3	Дискретная плоскость изображения.....	750
13.1.4	Матрица камеры.....	753
13.1.5	Точки проекции.....	755
13.1.6	Дисторсия объектива.....	758
13.2	Калибровка камеры.....	761
13.2.1	Метод с использованием трехмерной мишени.....	761
13.2.2	Калибровка с использованием шахматной доски.....	764
13.2.3	Разложение калибровочной матрицы камеры.....	767
13.2.4	Определение положения откалиброванной камеры.....	770
13.3	Широкоугольные камеры.....	771
13.3.1	Камера с объективом «рыбий глаз».....	772
13.3.2	Катадиоптрическая камера.....	775
13.3.3	Сферическая камера.....	779
13.4	Унифицированная модель формирования изображений.....	781
13.4.1	Сопоставление широкоугольных изображений со сферой.....	783
13.4.2	Преобразование сферического изображения в перспективное.....	786
13.5	Новые типы камер.....	788
13.5.1	Многокамерные массивы.....	788
13.5.2	Камеры светового поля.....	789
13.6	Применения.....	792
13.6.1	Координатные метки.....	792
13.6.2	Планарная гомография.....	793
13.7	Дополнительные темы.....	796
13.7.1	Проецирование произвольных линий и поверхностей в трехмерном пространстве.....	796
13.7.2	Неперспективные камеры.....	798
13.8	Подведение итогов.....	800
13.8.1	Дополнительное чтение и ресурсы.....	801
13.8.2	Упражнения.....	804
<b>14</b>	<b>Использование нескольких изображений</b> .....	806
14.1	Совмещение признаков.....	808
14.2	Геометрия нескольких ракурсов.....	814
14.2.1	Фундаментальная матрица.....	817
14.2.2	Существенная матрица.....	820
14.2.3	Вычисление фундаментальной матрицы по данным реального изображения.....	822
14.2.4	Планарная гомография.....	828
14.3	Разреженное стереозрение.....	835
14.3.1	Трехмерная триангуляция.....	836

14.3.2	Пакетная подстройка .....	841
14.4	Плотное стереозрение .....	850
14.4.1	Уточнение положения пиков .....	855
14.4.2	Типичные проблемы стереосопоставления .....	856
14.4.3	Исправление изображения .....	867
14.5	Анаглифы.....	870
14.6	Другие технологии определения глубины.....	872
14.6.1	Структурированный свет .....	872
14.6.2	Определение глубины по времени пролета луча.....	875
14.7	Облака точек .....	875
14.7.1	Поиск плоскости.....	877
14.7.2	Сопоставление двух наборов точек.....	878
14.8	Применения .....	881
14.8.1	Коррекция перспективы .....	881
14.8.2	Мозаика .....	884
14.8.3	Визуальная одометрия .....	888
14.9	Подведение итогов.....	893
14.9.1	Дополнительное чтение .....	894
14.9.2	Дополнительные ресурсы .....	900
14.9.3	Упражнения.....	902
<b>Часть V Управление на основе машинного зрения.....</b>		<b>909</b>
<b>15</b>	<b>Управление на основе зрения.....</b>	<b>912</b>
15.1	Визуальное сервоуправление на основе местоположения .....	914
15.2	Визуальное сервоуправление на основе изображения .....	917
15.2.1	Движение камеры и изображения .....	919
15.2.2	Управление движением объекта .....	927
15.2.3	Оценка глубины объекта .....	933
15.2.4	Проблемы с производительностью .....	936
15.3	Использование других признаков изображений.....	939
15.3.1	Линейные объекты .....	939
15.3.2	Эллиптические объекты .....	940
15.3.3	Фотометрические признаки.....	943
15.4	Подведение итогов.....	945
15.4.1	Дополнительное чтение .....	945
15.4.2	Упражнения.....	949
<b>16</b>	<b>Продвинутое визуальное сервоуправление .....</b>	<b>952</b>
16.1	IBVS с разделением XY/Z .....	953
16.2	IBVS с использованием полярных координат .....	956
16.3	IBVS для сферической камеры .....	959
16.4	Применение .....	962
16.4.1	Робот-манипулятор .....	962
16.4.2	Мобильный робот .....	964
16.4.3	Воздушный робот.....	968

---

16.5	Подведение итогов.....	970
16.5.1	Дополнительное чтение.....	970
16.5.2	Ресурсы.....	972
16.5.3	Упражнения.....	973
	<b>Приложения.....</b>	<b>975</b>
<b>A</b>	<b>Установка наборов инструментов.....</b>	<b>976</b>
<b>B</b>	<b>Линейная алгебра.....</b>	<b>978</b>
<b>C</b>	<b>Геометрия.....</b>	<b>990</b>
<b>D</b>	<b>Группы и алгебра Ли.....</b>	<b>1010</b>
<b>E</b>	<b>Линеаризация, якобианы и гессианы.....</b>	<b>1017</b>
<b>F</b>	<b>Решение систем уравнений.....</b>	<b>1023</b>
<b>G</b>	<b>Гауссовы случайные величины.....</b>	<b>1035</b>
<b>H</b>	<b>Фильтр Калмана.....</b>	<b>1039</b>
<b>I</b>	<b>Графы.....</b>	<b>1047</b>
<b>J</b>	<b>Определение пика.....</b>	<b>1051</b>
	<b>Литература.....</b>	<b>1056</b>
	<b>Предметный указатель.....</b>	<b>1084</b>

---

# Вступительное слово

Однажды ко мне на рецензию попала очень толстая папка с диссертацией из далекой страны. Темой диссертации было «Визуальное управление роботами», а ее автором был *Питер Корк*. Я вспоминаю отрывок из моих комментариев, в котором говорил, что *это мастерская научная работа, качество диссертации, к которому следует стремиться всем студентам, зная, что очень немногие смогут его достичь*, – очень хорошо продуманное и выполненное исследование.

Связь между робототехникой и зрением вот уже более двух десятилетий является центральной нитью фундаментальных исследований и успешных прикладных разработок Питера Корка. Этот редкий опыт воплощен во втором издании его книги. В своем слиянии теории и практики это второе издание значительно выиграло от уникального сочетания академического и практического опыта автора, основанного на его многолетней работе в области роботизированной горнодобывающей, авиационной, подводной и полевой техники.

Существует множество учебников по робототехнике и компьютерному зрению, но лишь немногие из них достигли уровня интеграции знаний, анализа научной области и доходчивости иллюстраций, представленных в этой книге. Обсуждение подробное, повествование удивительно информативное и доступное, и в целом создается впечатление, что эта книга станет важнейшим ресурсом для сегодняшних и будущих исследователей в области робототехники. Я могу смело утверждать, что почти каждый аспект, который можно считать относящимся к задаче, был проанализирован и включен в эту книгу, и мою уверенность в этом подтверждает эффективное использование программного обеспечения Toolbox.

Читатель получит достаточно полное представление о мобильных роботах, навигации, позиционировании, кинематике руки-манипулятора, динамике и управлении на уровне сочленений, а также о моделировании камеры, обработке изображений, выделении признаков и многоракурсной геометрии. И в заключение эти области будут объединены в подробном обсуждении визуальных сервосистем. Автор также объясняет, как сложные задачи можно разделить на ряд частных задач, решаемых с использованием мощных численных инструментов и эффективного программного обеспечения.

Издательский проект *Springer Tracts in Advanced Robotics* (STAR) призван донести до сообщества исследователей последние достижения в области робототехники исходя из их значимости и качества. Наша цель – путем широкого и своевременного распространения важнейших научных разработок в области робототехники способствовать обмену информацией и сотрудничеству между исследователями и поддерживать дальнейший прогресс в этой быстро развивающейся области.

Питер Корк дополняет нашу серию STAR авторитетной книгой, охватывающей разные области, идеально задуманной и блестяще выполненной.

Усама Хатиб  
Стэнфорд, Калифорния  
Октябрь 2016 г.

---

# Предисловие

« Скажи мне – и я забуду. Покажи – и я запомню. Заставь меня сделать – и я пойму.

Китайская пословица

« Простые вещи должны быть простыми, сложные вещи должны быть возможными.

Алан Кей

Сфера робототехники переживает бурное развитие. С момента выхода первого издания этой книги прошло более десяти лет, и, оглядываясь назад, мы видим значительный прогресс: появление беспилотных автомобилей на дорогах общего пользования и множества роботов на Марсе (в том числе летающего); роботизированный сбор проб с астероидов и комет; развитие таких видов бизнеса, как Amazon и DARPA Subterranean Challenge, где группы наземных и воздушных роботов автономно картографируют подземные пространства. Мы стали свидетелями революции беспилотников – летательные аппараты, которые когда-то были прерогативой аэрокосмических гигантов, теперь можно купить всего за несколько десятков долларов. Все это стало возможным благодаря постоянному росту вычислительной мощности и колоссальному прогрессу в разработке недорогих инерциальных датчиков и камер, в значительной степени обусловленному большим спросом на высококачественные мобильные устройства. Создавать роботов становится все проще – 3D-печать теперь очень доступна, операционная система для роботов ROS (Robot Operating System) стала достаточно функциональной и получила широкое распространение, а мощные технологии для хобби, такие как Arduino, Raspberry Pi и сервоприводы Dynamixel, можно приобрести очень недорого. Это, в свою очередь, способствовало росту мирового сообщества энтузиастов и дало возможность отдельным людям, работающим дома, и небольшим стартапам создавать то, что раньше было под силу только крупным корпорациям.

Роботы – это машины, управляемые данными: они собирают данные, обрабатывают их и предпринимают действия на их основе. Данные поступают от различных датчиков, измеряющих, например, скорость вращения колес, угол поворота сочленения руки-манипулятора или интенсивность освещенности миллионов пикселей на светочувствительной матрице кинокамеры,

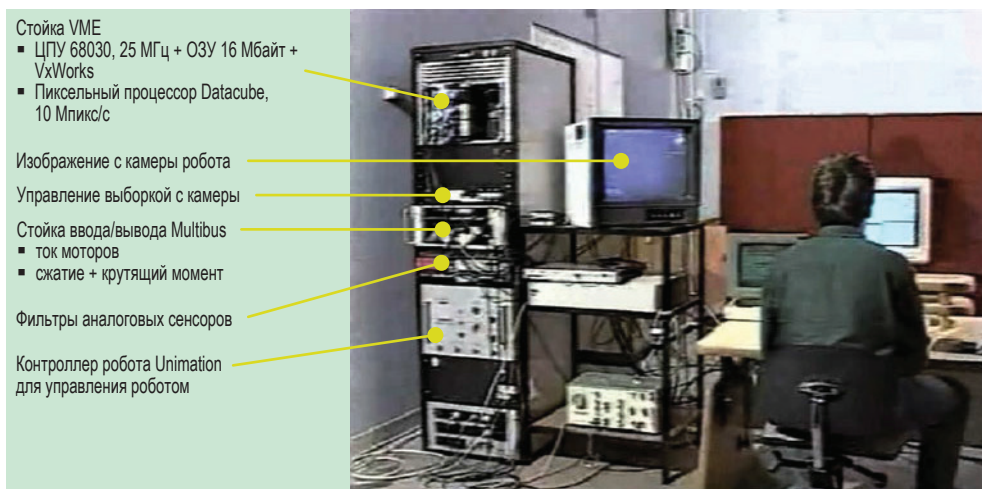
составляющих изображение окружающего мира. Многим робототехническим приложениям приходится обрабатывать огромный объем данных в масштабе реального времени.

Когда я начал заниматься робототехникой и компьютерным зрением в середине 1980-х, как раз появился компьютер IBM PC – он имел 16-рядный микропроцессор с частотой 4.77 МГц и 16 Кбайт памяти (с возможностью расширения до 256 Кбайт).

С одной стороны, прогресс развития робототехники обусловлен ростом доступных вычислительных мощностей. ◀ Закон Мура предсказывает, что количество транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые два года, что позволит постоянно увеличивать объем памяти и осуществлять параллельную обработку данных с помощью нескольких ядер и графических процессоров (GPU). Одновременно с этим будут уменьшаться размеры транзисторов и увеличиваться тактовая частота.

С другой стороны, прогрессу способствует развитие алгоритмов, лежащих в основе вычислений для решения задач робототехники. За десятилетия исследовательское сообщество разработало множество решений важных задач восприятия, позиционирования, планирования и управления. Однако для решения любой конкретной задачи имеется широкий выбор алгоритмов, и каждый из них может иметь несколько реализаций. Они написаны на разных языках, в разных стилях, с применением разных соглашений о структуре API и имеют разное качество кода, документации, поддержки и условия лицензирования. Это серьезная проблема для современной робототехники, и «склеивание» разрозненных фрагментов программного обеспечения превратилось в обязательный навык для занимающихся робототехникой. Платформа ROS ◀ помогла стандартизировать интерфейсы и функции, необходимые для решения

См. ► <https://ros.org>.



**Рис. 0.1.** Когда-то для управления роботами с использованием технологии машинного зрения требовалось много специального оборудования. Здесь автор книги сидит возле стойки, набитой модулями для обработки изображений в реальном времени и управления роботом PUMA 560 (1992 г.). За прошедшие 30 с лишним лет количество транзисторов, размещаемых на кристалле, выросло примерно в  $2^{30/2} \approx 30\,000$  раз, в полном соответствии с законом Мура

конкретной задачи. Тем не менее программная сторона робототехники все еще слишком сложна и требует больше времени, чем следовало бы. К сожалению, эта сложность и огромный выбор представляют собой серьезное препятствие для новичков.

- » Программные инструменты, используемые в этой книге, специально выбирались, чтобы уменьшить сложность для читателя

Программные инструменты, используемые в этой книге, специально выбирались, чтобы уменьшить сложность для читателя. Они предоставляют полный и хорошо согласованный набор функций. Мы с вами будем использовать Python, популярный язык программирования с открытым исходным кодом и несколько свободно распространяемых наборов инструментов, обеспечивающих поддержку функций, необходимых в робототехнике и компьютерном зрении. Все это делает распространенные алгоритмы наглядными и доступными. Весь демонстрируемый здесь код вы можете использовать для решения своих задач, дорабатывать его и изменять. Он даст вам «поддержку» на начальном этапе вашего пути в робототехнику.

- » Позволит пользователю работать с реальными задачами, а не только с тривиальными примерами

Для иллюстрации каждой темы используется программное обеспечение, и такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, использование программных инструментов позволит пользователю работать с реальными задачами, а не только с тривиальными примерами. Для управления роботами, с конечностями, состоящими из двух и более звеньев, и обработки реальных изображений с миллионами пикселей необходимые вычисления многократно превышают возможности человека. Во-вторых, они помогут получить понятное визуальное представление, которое в противном случае могло бы затеряться на фоне сложных вычислений. Мы можем быстро и легко экспериментировать, играть в игру «что, если...» и выводить результаты на экран, используя мощные инструменты отображения 2D- и 3D-графики, имеющиеся в Python и в библиотеке Matplotlib.

- » Разговорное повествование, охватывающее робототехнику и компьютерное зрение – как по отдельности, так и вместе

Я старался использовать в книге свободное разговорное повествование, переплетая текст, математические формулы и примеры кода, охватывающее робототехнику и компьютерное зрение, как по отдельности, так и вместе. Я хотел показать,

как сложные задачи можно разложить на части и решить, используя всего несколько строк простого кода. Строго говоря, это индуктивный подход к обучению – переход от конкретных и частных примеров к более общему знанию.

» Показать, как сложные задачи можно разложить на части и решить

Выбор тем, затронутых в этой книге, основан на моем собственном опыте решения реальных задач, встречавшихся мне в моей практике. Я хотел дать вам общее представление о том, что такое роботизированное зрение и на что оно способно, – считайте, что вы держите в руках меню грандиозной дегустации. Я надеюсь, что к концу этой книги вы разделите мой энтузиазм по поводу всех упомянутых тем.

» Считайте, что вы держите в руках меню грандиозной дегустации

Прежде всего я старался написать серьезное введение в компьютерное зрение для робототехников. Большинство учебников по робототехнике, как правило, сосредоточено лишь на простых методах бинарного зрения. В этой книге мы рассмотрим широкий круг тем, включая цветное зрение, передовые методы сегментации, деформацию изображения, стереозрение, оценку местоположения, глубокое обучение, групповую коррекцию и визуальную одометрию. Мы также обратим внимание на перспективную визуализацию с использованием объективов типа «рыбий глаз», катадиоптрической оптики и новых камер светового поля. Эти темы приобретают все большую значимость в робототехнике, но обычно не освещаются в массовой литературе. Зрение – это мощный источник сенсорной информации, и робототехники должны хорошо разбираться в основах его работы. В последней части книги я покажу, как можно использовать зрение в качестве основного датчика для управления роботом.

Эта книга не похожа на другие учебники, и это сделано намеренно. Хотя существуют отличные учебники, подробно и по отдельности рассматривающие робототехнику и компьютерное зрение, но среди них мало таких, которые предлагают комплексный охват этих дисциплин. Достижение такой интеграции было главной целью книги.

» Программное обеспечение является важнейшей частью этой книги

Программное обеспечение – это осязаемая реализация описанных алгоритмов. Его можно прочитать, его можно разобрать, изменить и снова собрать. Программное обеспечение является

важнейшей частью этой книги. Существует ряд классических книг, в которых программное обеспечение используется в качестве иллюстраций и которые повлияли на мой подход, например *LaTeX: A document preparation system* (Lamport 1994), *Numerical Recipes in C* (Press et al. 2007), *The Little Lisper* (Friedman et al. 1987) и *Structure and Interpretation of Classical Mechanics* (Sussman et al. 2001). Более 2000 строк кода и более 1600 примеров в этой книге иллюстрируют, как можно использовать программное обеспечение Toolbox, и, как правило, обеспечивают *мгновенный результат* всего парой строк кода на Python.

» Мгновенный результат всего парой строк кода на Python

В-третьих, построение книги на основе Python и Toolbox означает, что мы можем решать более реалистичные и более сложные задачи, чем в других книгах.

» Эта книга может стать прекрасным дополнением к другим учебникам

Основная цель этой книги – сделать робототехнику, машинное зрение и алгоритмы управления *доступными* для широкой аудитории. Доступность имеет ряд аспектов, включая концептуальный, географический и финансовый. Концептуально, без математики, лежащей в основе робототехники, невозможно обойтись, но я постарался снизить сложность представляемой теории, и для понимания книги достаточно наличия математических знаний на уровне бакалавриата по инженерному делу. Кроме того, обосновать абстрактные концепции и сделать их наглядными помогут примеры с использованием программного обеспечения. Применение программного обеспечения с открытым исходным кодом снижает финансовые затраты читателя – оно доступно бесплатно в любой точке мира. Эта книга может стать прекрасным дополнением к другим учебникам, охватывающим те же темы, но использующим более традиционный подход, основанный на описании теории. Поэтому ее лучше всего читать вместе с другими учебными материалами, предлагающими строгую теоретическую базу. В конце каждой главы есть раздел с перечнем дополнительной литературы и ссылками на соответствующие учебники, статьи и онлайн-ресурсы.

В основе робототехники и компьютерного зрения лежат теории, разрабатывавшиеся математиками, учеными и инженерами на протяжении многих сотен лет. Некоторые из их имен стали прилагательными, например кориолисов, гауссов, лапласов или декартов; существительными, например якобиан, или единицами измерения, например ньютон и кулон. Это интересные

персонажи далекой эпохи, когда наука была не профессией, а хобби, и занимались ей врачи, алхимики, игроки, астрологи, философы или наемники. Чтобы знать, на плечах каких гигантов мы стоим, я добавил в книгу небольшие вставки о жизни некоторых из этих людей.

Создание Python-версии известного пакета инструментов Robotics Toolbox for MATLAB® и этой книги было моей давней мечтой. Я предпринял было несколько неудачных попыток, но только в период пандемии наконец смог осуществить задуманное. Джесси Хэвиленд (Jesse Haviland) перевел на Python и расширил нотацию ETS (раздел 7.1.1.1) с помощью своего пакета гору, затем перевел на Python весь пакет Robotics Toolbox, а потом разработал среду моделирования Swift. Дориан Цай (Dorian Tsai) начал перевод на Python пакета Machine Vision Toolbox. Даниел Петков (Daniel Petkov) разработал графический редактор в поддержку пакета `bdsim` для работы с блок-схемами. Я глубоко благодарен им за помощь в достижении этой цели.

Эта книга основана на перечисленном выше ПО с открытым исходным кодом, которое, в свою очередь, основано на других программах с открытым исходным кодом, разработанных более широким сообществом. Я хотел бы выразить благодарность разработчикам, стоящим за Python, Matplotlib, NumPy, SciPy, SymPy, pybullet, Python Robotics, Jupyter, OpenCV, Open3D и PyTorch. Работу над книгой и кодом помогли ускорить такие замечательные инструменты с открытым исходным кодом, как Visual Studio Code, Git, GitHub, meld, TexStudio, xelatex и LaTeX. Размах и качество творений сообщества свободного программного обеспечения не перестают меня поражать.

Многие люди помогли мне, высказывая критические замечания по предыдущим изданиям. И благодаря им это издание стало лучше. Я хочу выразить свою особую благодарность следующим людям: Пола Ньюман (Paul Newman), Даниэла Рас (Daniela Rus), Седрик Прадалье (Cédric Pradalier), Тим Барфут (Tim Barfoot), Дмитрий Братанов (Dmitry Bratanov), Дункан Кэмпбелл (Duncan Campbell), Дональд Дансеро (Donald Dansereau), Том Драммонд (Tom Drummond), Малкольм Гуд (Malcolm Good), Питер Куджала (Peter Kujala), Обадия Лам (Obadiah Lam), Йорн Мальзан (Jörn Malzahn), Фелипе Насименто Мартинс (Felipe Nascimento Martins), Аджай Панди (Ajay Pandey), Дэн Ричардс (Dan Richards), Сапех Ширази (Sareh Shirazi), Сурья Сингх (Surya Singh), Райан Смит (Ryan Smith), Бен Талбот (Ben Talbot), Дориан Цай (Dorian Tsai), Бен Апкрофт (Ben Urcroft), Франсуа Шометт (François Chaumette), Дональд Дансеро (Donald Dansereau), Кевин Линч (Kevin Lynch), Роберт Махони (Robert Mahony) и Фрэнк Парк (Frank Park). В этом третьем издании мои соавторы по книге для MATLAB, Витольд Яхимчик (Witold Jachimczyk) и Ремо Пиллат (Remo Pillat), предложили

свежий взгляд и конструктивную критику, которые пошли на пользу обеим версиям. Я благодарен своим коллегам, давшим подробные и содержательные отзывы к рукописям последних глав: Кристине Казанциду (Christina Kazantzidou, которая помогла отшлифовать текст и математические обозначения), Тобиасу Фишеру (Tobias Fischer), Уиллу Брауну (Will Browne), Робу Махони (Rob Mahony), Джесси Хэвиленд (Jesse Haviland), Ферасу Даюбу (Feras Dayoub), Дориану Цаю (Dorian Tsai), Алессандро Де Луке (Alessandro De Luca), Рено Детри (Renaud Detry), Брайану Фанусу (Brian Fanous) и Ханнесу Деппу (Hannes Daerr).

Я старался устранить ошибки, но некоторые из них неизбежно ускользнут от моего внимания. Пожалуйста, присылайте по адресу [rvc@petercorke.com](mailto:rvc@petercorke.com) сообщения об ошибках, а также предложения по улучшениям и дополнениям книги.

Частичную финансовую поддержку работе над этим изданием оказала премия Australian University Teacher (AAUT) от министерства образования и профессиональной подготовки правительства Австралии. Я благодарю руководство технологического университета Квинсленда, что дали время для завершения этого проекта. На протяжении работы над всеми изданиями я пользовался огромной поддержкой со стороны сотрудников Springer-Nature: Томаса Дитцингера (Thomas Ditzinger), поддержавшего этот проект еще до выхода первого издания, и Вильмы Макхью (Wilma McHugh). Особую благодарность хочу выразить Ивонн Шлаттер (Yvonne Schlatter) и команде le-tex за их помощь в наборе текста.

Наконец, моя глубочайшая благодарность Филиппе, которая поддерживала меня с присущим ей изяществом и терпением в течение очень долгого времени и во многих разных ситуациях, – без нее эта книга никогда не была бы написана.

---

## Примечание к третьему изданию

Первые два издания этой книги ► были основаны на MATLAB® в сочетании с открытым пакетом MATLAB Toolbox, которым уже тридцать лет – это долгий срок для любого программного обеспечения. За последнее десятилетие произошло много событий, которые побудили изменить программную основу книги, что привело к выходу *двух* третьих изданий.

- Версия, которую вы читаете, основана на Python – популярном языке программирования с открытым исходным кодом, имеющем широкую поддержку сторонних разработчиков. Старый пакет инструментов MATLAB Toolbox был переработан и реализован на Python с использовани-

Первое издание увидело свет в 2011-м, второе одноименное издание – в 2017-м, а затем в виде двухтомника – в 2022-м.

ем популярных пакетов и ресурсов с открытым исходным кодом, обеспечивающих переносимость между платформами, возможность отображения трехмерной графики в браузере, доступ к онлайн-документации, быстрые числовые и символьные операции, поддержку блокнотов, доступных для просмотра в интернете, и все это на базе GitHub и сообщества разработчиков с открытым исходным кодом (Corke, 2021).

- Альтернативная версия, переписанная вместе с коллегами Витольдом Яхимчиком (Witold Jachimczyk) и Ремо Пиллатом (Remo Pillat) из MathWorks®, использует MATLAB и современные наборы инструментов, разработанные, лицензированные и поддерживаемые MathWorks.

Помимо изменения программной основы, в этом третьем издании также были исправлены ошибки, улучшены математические формулы и материал объясняется более понятным языком. Главы 2 и 7 были существенно переработаны. В это издание также включены новые темы, такие как планирование пути на основе графов, пути Дубинса и Ридса–Шеппа, разветвленные роботы, модели URDF, проверка столкновений, управление пространством задач, глубокое обучение для обнаружения объектов и семантической сегментации, опорные маркеры и облака точек.

Питер Корк,  
Брисбен, Квинсленд,  
март 2022

## 1

## Введение

## 1.1 Краткая история роботов

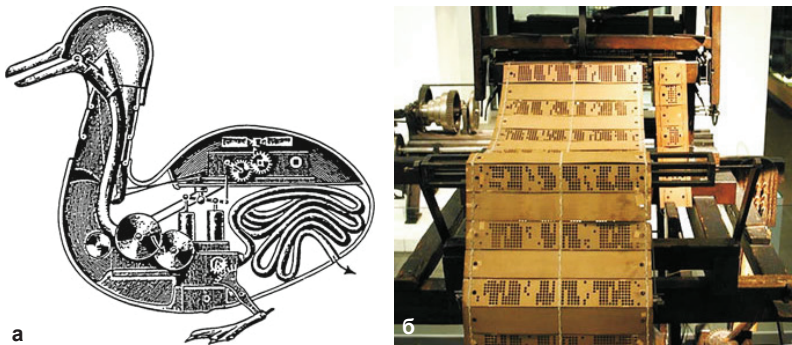
Слово *робот* для разных людей имеет разное значение. Научно-фантастические книги и фильмы оказали сильное влияние на то, как многие представляют себе робота и на что он способен. К сожалению, практика робототехники пока сильно отстает от этого распространенного представления. Слово *робот* также вызывает разные эмоции: некоторые искренне опасаются будущего с роботами, а других больше беспокоит, какое влияние роботы окажут на рабочие места, конфиденциальность или ведение войн. Однако одно несомненно: робототехника станет важной технологией в этом столетии. Такие продукты, как роботы-пылесосы, существуют уже более двух десятилетий, а на дорогах общего пользования уже появились беспилотные автомобили. Это авангард волны умных машин, которые появятся в наших домах и на рабочих местах в ближайшем или чуть более отдаленном будущем.

В XVIII в. европейцы были очарованы автоматами, такими как утка Вокансона, показанная на рис. 1.1а. Эти машины, сложные по меркам того времени, демонстрировали то, что казалось людям *поведением живого существа*. В утке был задействован кулачковый механизм для выполнения последовательности движений, и впоследствии Вокансон механизировал с его помощью ткацкие станки для производства шелка. Жаккард развил его идеи и разработал ткацкий станок (рис. 1.1б), в котором узор ткани был закодирован как серия отверстий на перфокартах. ◀ У этого ткацкого станка было много признаков современного робота – он выполнял физическую задачу и был перепрограммируемым.

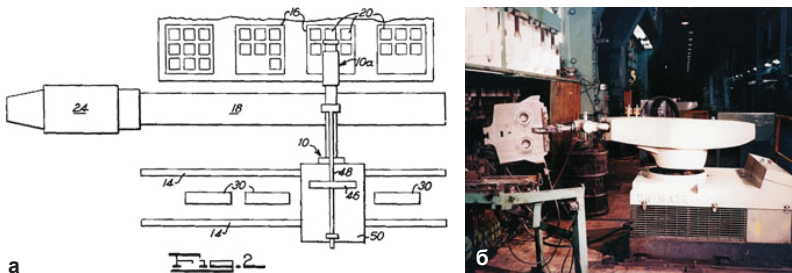
Это, в свою очередь, повлияло на сэра Чарльза Бэббиджа в его стремлении механизировать вычисления, что, в свою очередь, повлияло на графиню Аду Лавлейс, формализовавшую вычисления и создавшую первый алгоритм.

Термин *робот* впервые появился в 1920 г. в чешской научно-фантастической пьесе «Универсальные роботы Россума» Карела Чапека. Этот термин был придуман его братом Йозефом и на чешском языке означает крепостной труд, а в просторечии – тяжелую работу. Роботы в пьесе были искусственными людьми (андроидами), и, как и во многих других последующих историях, они восстанут, и это плохо кончается для человечества. Се-

рия книг Айзека Азимова о роботах, состоящая из множества книг и рассказов, написанных между 1950 и 1985 г., исследует морально-этические вопросы взаимодействия человека и робота. Роботы в этих историях оснащены «позитронными мозгами», в которых закодированы «три закона робототехники». Эти истории повлияли на последующие книги и фильмы, которые, в свою очередь, сформировали общественное представление о том, что такое роботы. В середине XX века также появился термин *кибернетика*, который ныне используется довольно редко, но тогда это была захватывающий раздел науки, стоявший на переднем крае понимания жизни и создания интеллектуальных машин.

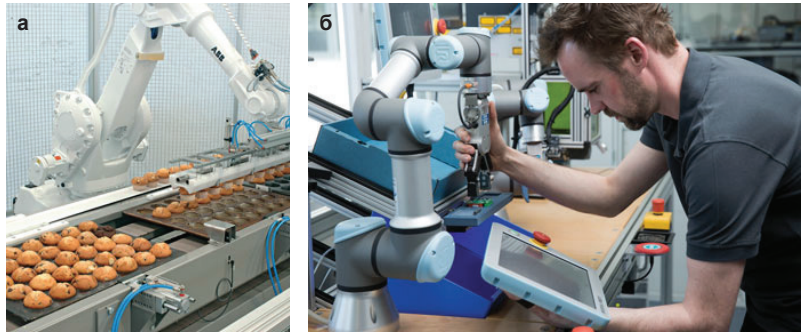


**Рис. 1.1.** Ранние программируемые машины: а) утка Вокансона (1739) – автомат, умевший хлопнуть крыльями, есть зерно и испражняться. Приводилась в движение часовым механизмом и выполняла одну программу; б) жаккардовый ткацкий станок (1801) – перепрограммируемое устройство, программа которого хранилась на перфокартах (изображение Джорджа П. Ландоу с сайта <https://www.victorianweb.org>)



**Рис. 1.2.** Универсальные автоматы: а) вид сверху на машину из патента Деволла; б) первый робот Unimate, запущенный на заводе General Motors (изображение предоставлено Джорджем К. Деволом)

Первая заявка на патент на то, что мы сейчас называем роботом-манипулятором, была подана в 1954 году Джорджем К. Деволом, а сам патент был выдан в 1961 году. Устройство состояло из механической руки с захватом, установленной на направляющей, а последовательность движений кодировалась магнитны-



**Рис. 1.3.** Промышленные роботы, технологические потомки робота Unimate, показанного на рис. 1.2: а) современный шестиосевой робот, обладающий высокой точностью и производительностью (изображение предоставлено ABB robotics); б) коллаборативный робот Universal Robotics может безопасно работать в паре с человеком (© 2022 Universal Robots A/S. Все права защищены. Изображение использовано с разрешения Universal Robots A/S)

### Отступление 1.1. Джордж Девол

Девол (1912–2011) – американский изобретатель, родившийся в Луисвилле, штат Кентукки. В 1932 году основал United Cinephone Corp., которая производила фонографические рычаги и усилители, приводы для печатных и упаковочных машин. В 1954 году подал заявку на патент № 2 988 237 с заголовком «Programmed Article Transfer», где была представлена концепция универсальной автоматизации (Unimation). В частности, в заявке описывался механизм манипулятора с полярными координатами на рельсах с захватом и программируемым контроллером – предшественник всех современных роботов.

В 2011 году он был включен в Национальный зал славы изобретателей (изображение предоставлено Джорджем К. Деволом).



### Отступление 1.2. Unimation Inc.

Девол искал финансирование для разработки своей технологии Unimation и однажды в 1954 году, будучи на коктейльной вечеринке, познакомился с Джозефом Энгельбергером, тогдашним инженером компании «Manning, Maxwell and Moore». В 1956 году они совместно основали Unimation (1956–1982) – первую компанию по производству робототехники в Дэнбери, штат Коннектикут. Впоследствии компания была приобретена компанией Consolidated Diesel Corp. (Condec) и стала подразделением Condec под названием Unimate Inc. Их первый робот приступил к работе в 1961 году на литейном заводе General Motors в Нью-Джерси. В 1968 году они продали лицензию на технологию компании Kawasaki Heavy Industries, которая выпустила первого японского промышленного робота. Энгельбергер занимал пост генерального директора до приобретения компании Unimation компанией Westinghouse в 1982 году. Сотрудники и технологии этой компании впоследствии оказали огромное влияние на всю сферу робототехники.

### Отступление 1.3. Джозеф Ф. Энгельбергер

Джозеф Энгельбергер (1925–2015) – американский инженер и предприниматель, которого часто называют «отцом робототехники». Получил степени бакалавра и магистра по физике в Колумбийском университете в 1946 и 1949 годах соответственно. Энгельбергер был неутомимым популяризатором робототехники. В 1966 году он появился в программе «Вечернее шоу с Джонни Карсоном» с роботом Unimate, который наливал пиво, бросал мяч для гольфа и дирижировал оркестром. Он активно продвигал развитие робототехники в Японии, что привело к значительным инвестициям в эту область.

Энгельбергер занимал должность генерального директора Unimation Inc. до 1982 года, а в 1984 году основал компанию Transitions Research Corporation, которая впоследствии получила название HelpMate Robotics Inc. и стала одним из первых участников рынка роботов для больниц. Был избран в Национальную инженерную академию, получил премию Бекмана и национальную премию Японии, написал две книги: «Robotics in Practice» (1980) и «Robotics in Service» (1989). Ежегодно Ассоциация передовой автоматизации (<https://www.automate.org>) вручает награду в его честь «лицам, внесшим выдающийся вклад в развитие науки и практики робототехники».



ми шаблонами, устанавливаемыми на вращающемся барабане. Первая робототехническая компания Unimation была основана Деволом и Джозефом Энгельбергером в 1956 году, а их первый промышленный робот, показанный на рис. 1.2б, был установлен в 1961 году. Первоначальное видение Девола и Энгельбергера относительно роботизации впоследствии стало реальностью. Многие миллионы роботов-манипуляторов, подобных изображенному на рис. 1.3, были построены и запущены в работу для выполнения таких задач, как сварка, покраска, погрузка и разгрузка машин, сборка, сортировка, упаковка и паллетирование. Использование роботов повысило производительность и улучшило качество продукции. В настоящее время многие товары, которые мы покупаем, были собраны или обработаны роботом.

## 1.2 Типы роботов

Роботы *первого поколения* были стационарными и не могли перемещаться по заводу. В отличие от них, *мобильные роботы* (рис. 1.4 и 1.5) могут перемещаться в пространстве, используя различные формы передвижения: по земле с помощью колес или ног, по воздуху с помощью крыльев или винтов, по воде или под водой.

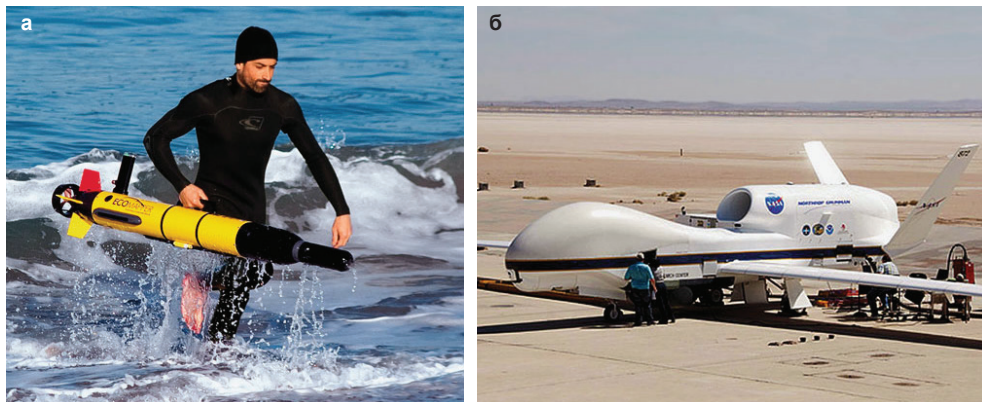


Рис. 1.4. Мобильные роботы, перемещающиеся не по суше: а) небольшой автономный подводный аппарат (Todd Walsh © 2013 MBARI); б) беспилотный летательный аппарат (БПЛА) Global Hawk (изображение предоставлено NASA)



Рис. 1.5. Мобильные роботы: а) марсоход Perseverance на Марсе, автопортрет. На мачте установлено множество камер, включая стереопары, с помощью которых робот может определять трехмерную структуру окружающей среды (изображение предоставлено NASA/JPL-Caltech/MSSS); б) робот-доставщик Savioke Relay (изображение предоставлено Savioke); в) беспилотный автомобиль (изображение предоставлено кафедрой информационной инженерии Оксфордского университета); г) шагающий робот Boston Dynamics Spot (изображение предоставлено Дорианом Цаем)

Другой способ классификации основан на выполняемой роботом функции. *Промышленные роботы* работают на заводах и являются технологическими потомками роботов первого поколения, созданных компанией Unimation Inc. *Сервисные роботы* оказывают людям такие услуги, как уборка помещений, выполнение гигиенических процедур, медицинская реабили-

#### Отступление 1.4. Универсальные роботы Россума

Термин «робот» впервые появился в 1920 г. в чешской научно-фантастической пьесе «Универсальные роботы Россума» Карела Чапека. Во вступительной сцене Хелен Глори встречается с Гарри Домином, генеральным директором Rossum's Universal Robots, и его роботизированной секретаршей Суллой.

**Домин:** Сулла, позволь мисс Глори взглянуть на тебя.

**Хелен:** (встает и протягивает руку) Приятно познакомиться. Вам, наверно, тяжело быть здесь, отрезанной от остального мира (фабрика находится на острове).

**Сулла:** Я незнакома с остальным миром, мисс Глори. Пожалуйста, садитесь.

**Хелен:** (садится) Откуда вы?

**Сулла:** Отсюда, с фабрики.

**Хелена:** О, вы здесь родились.

**Сулла:** Да, я была создана здесь.

**Хелен:** (пораженно). Что?

**Домин:** (смеется) Сулла не человек, мисс Глори, она – робот.

**Хелен:** О, пожалуйста, простите меня...

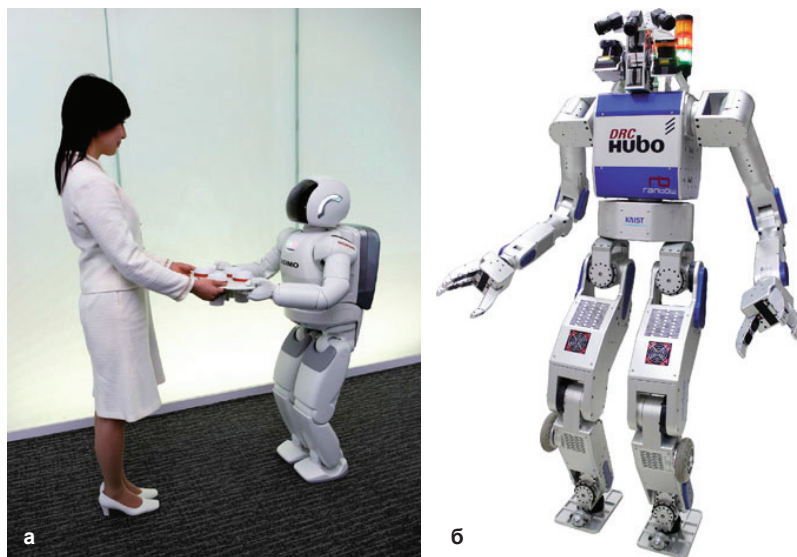
Полный текст пьесы можно найти на <https://www.gutenberg.org/ebooks/59112>. Даже сто лет спустя она остается пророческой и заставляет задуматься. (Фото любезно предоставлено Библиотекой Конгресса, артикул 96524672.)



тация или подноска грузов (рис. 1.5б). *Полевые роботы* (рис. 1.4), например, работают на открытом воздухе и используются в мониторинге окружающей среды, сельском хозяйстве, горнодобывающей промышленности, строительстве и лесном хозяйстве. *Человекоподобные роботы* (рис. 1.6) имеют физическую форму человека – они одновременно являются мобильными и сервисными роботами.

*Промышленный робот* обычно представляет собой манипулятор наподобие механической руки на фиксированном основании (рис. 1.3а), который выполняет повторяющиеся задачи в локальной рабочей ячейке. Детали подаются роботу строго упорядоченно, что позволяет максимально использовать преимущество высокой скорости и точности робота. Эти роботы быстро работают, неспособны чувствовать людей и обычно размещаются за защитным барьером. В отличие от них, коллаборативные роботы (рис. 1.3б) безопасны для человека – они работают на низкой скорости и останавливаются при столкновении с препятствием.

*Полевые и сервисные роботы* сталкиваются со специфическими и серьезными проблемами. Первая проблема – робот должен работать и двигаться в сложной, изменчивой и загроможденной предметами среде. Например, робот-доставщик в больнице должен работать в условиях скопления людей и меняющейся

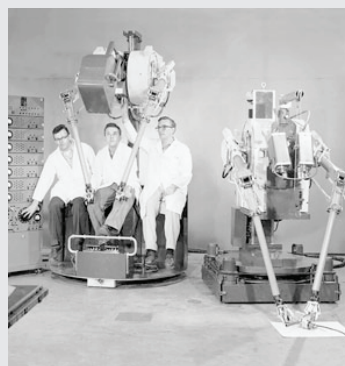


**Рис. 1.6.** Человекоподобные роботы: а) человекоподобный робот Asimo компании Honda (изображение предоставлено Honda Motor Co., Япония); б) робот Hubo, победивший в конкурсе робототехники DARPA Robotics Challenge в 2015 году (изображение предоставлено KAIST, Корея)

конфигурации припаркованных тележек. Марсоход, показанный на рис. 1.5а, должен ориентироваться среди скал и небольших кратеров, несмотря на отсутствие точной карты местности перед началом исследований. Роботизированные, или беспил-

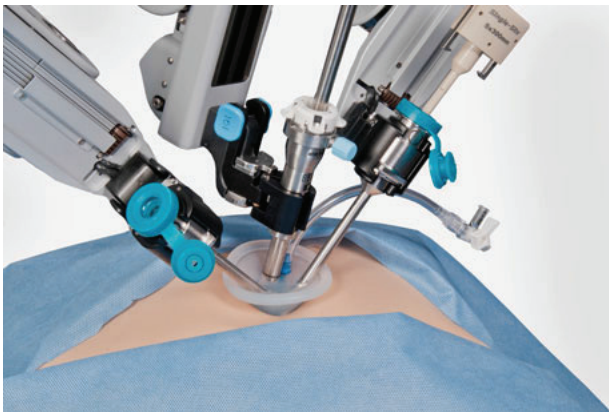
### Отступление 1.5. Телероботы

В рамках Манхэттенского проекта во время Второй мировой войны начались разработки первого ядерного оружия, что потребовало работы с радиоактивными материалами. Рэй Гетц из Аргоннской национальной лаборатории создал дистанционно управляемые манипуляторы, использовавшие ловкость рук людей-операторов и защищавшие их от прямого контакта с рабочими материалами. Операторы наблюдали за рабочим пространством через толстые окна из свинцового стекла или по телевизионной связи и управляли ведущей рукой (слева). Ведомая рука (справа) следовала за движением, и усилия, ощущаемые ведомой рукой, отражались обратно на ведущую руку, что позволяло оператору ощущать вес и силу сопротивления. Телеробототехника и сегодня используется для выполнения работы, которую люди не могут выполнять напрямую, но которая слишком сложна для выполнения машиной, например в подводных роботах, обследовавших затонувший «Титаник». (Изображение предоставлено Аргоннской национальной лабораторией.)



лотные, автомобили, показанные на рис. 1.5в, должны передвигаться по дорогам, объезжать препятствия, соблюдать сигналы светофора и правила дорожного движения. Вторая сложность для таких роботов – безопасность для окружающих людей. Робот-доставщик в больнице работает среди людей, беспилотный автомобиль перевозит людей, а роботизированный хирургический аппарат выполняет операции *внутри* людей.

*Телероботы* – это роботоподобные машины, которыми дистанционно управляет человек-оператор. Самым ранним примером, пожалуй, была радиоуправляемая лодка, продемонстрированная Николой Теслой в 1898 году, которую он называл телеавтоматом. Такие машины были важным предшественником роботов и до сих пор важны для выполнения задач в условиях, где люди не могут работать, но которые слишком сложны для выполнения машиной самостоятельно. Например, «подводные роботы», обследовавшие место крушения «Титаника», технически представляли собой дистанционно управляемые аппараты. Современный хирургический робот (рис. 1.7) тоже является телеуправляемым – хирург дистанционно управляет движением небольших инструментов внутри пациента. Применение таких роботов благотворно сказывается на здоровье пациента, поскольку процедура выполняется через гораздо меньший разрез, чем при старом подходе, когда хирург работал внутри тела руками.



**Рис. 1.7.** Хирургический робот, несколько инструментов проходят через один небольшой разрез (изображение © 2015 Intuitive Surgical, Inc)

Различные марсоходы способны автономно перемещаться по поверхности Марса, но более общие цели задаются операторами-людьми. То есть операторы сообщают роботу, куда идти, а робот сам прокладывает маршрут. Локальное принятие решений на Марсе крайне важно, учитывая задержку связи в несколько минут. Некоторые телероботы являются гибридными, и задачи управления решаются совместно с человеком-опе-

ратором. В таком случае функция управления периодически передается между человеком-оператором и компьютером. Например, пилот самолета может передать управление автопилоту и взять его обратно. При совместном управлении функция управления выполняется человеком-оператором и компьютером, работающими совместно. Например, в легковом автомобиле, оснащенный системой автоматического управления, компьютер может удерживать автомобиль в пределах полосы движения, а водитель-человек – контролировать скорость.

### **Отступление 1.6. Кибернетика, искусственный интеллект и робототехника**

Кибернетика как область исследований процветала с 1930-х по 1960-е годы и подпитывалась новыми идеями и результатами исследований в нейрологии, теории управления и теории информации. Как показали исследования в области нейрологии, мозг представляет собой сеть нейронов, обменивающихся электрическими сигналами. Гарольд Блэк, Хенрик Боде и Гарри Найквист из Bell Labs занимались исследованием отрицательной обратной связи и устойчивости электрических сетей, Клод Шеннон продвигал теорию информации, описывавшую цифровые сигналы, а Алан Тьюринг исследовал основы вычислений. В 1943 году Уолтер Питтс и Уоррен Маккалок предложили модель искусственного нейрона и показали, как он может выполнять простые логические функции. В 1951 году Марвин Мински в рамках своего дипломного проекта построил на базе автопилота от B24 и 3000 электронных ламп машину SNARC (Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator – стохастический нейронно-аналоговый калькулятор с подкреплением), которая стала первой обучающейся машиной на основе нейронных сетей. Роботизированные черепахи Уильяма Грея Уолтера демонстрировали поведение, похожее на поведение живых существ (см. раздел 5.1). Исследователи предвкусывали возможность создания электронного мозга!

Важной вехой стал выход книги Винера «Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine» (1965). Характерной чертой кибернетической системы является использование обратной связи, распространенной в инженерных и биологических системах. Эти идеи впоследствии были применены в эволюционной биологии, психологии и экономике.

В 1956 году Джон Маккарти организовал конференцию в Дартмутском колледже, где присутствовали Мински, Шеннон, Герберт Саймон, Аллен Ньюэлл и другие. На этой конференции был определен термин «искусственный интеллект» (ИИ) в его современном виде, с акцентом на цифровые компьютеры и символическую обработку, что привело к началу новых исследований в области робототехники, компьютерного зрения, естественного языка, семантики и рассуждений. Маккарти и Мински сформировали группу ИИ в Массачусетском технологическом институте, которую Маккарти покинул в 1962 году, чтобы основать Стэнфордскую лабораторию ИИ. Мински сосредоточился на искусственно упрощенном «мире блоков». Саймон и его студент Ньюэлл оказали влияние на исследования ИИ в Университете Карнеги–Меллона, на базе которого в 1979 году был создан Институт робототехники. Эти группы, занимающиеся ИИ, оказали огромное влияние на развитие робототехники и компьютерного зрения в США. Общества и издания, специализирующиеся на кибернетике, действуют и поныне.

---

## 1.3 Определение робота

« Я не могу дать определение роботу, но я узнаю его, когда вижу.

– Джозеф Энгельбергер

Итак, что такое робот? Существует множество определений робота, но не все они одинаково полезны. Вот определение, которое нам пригодится:

« машина, способная ощущать, планировать и целенаправленно действовать.

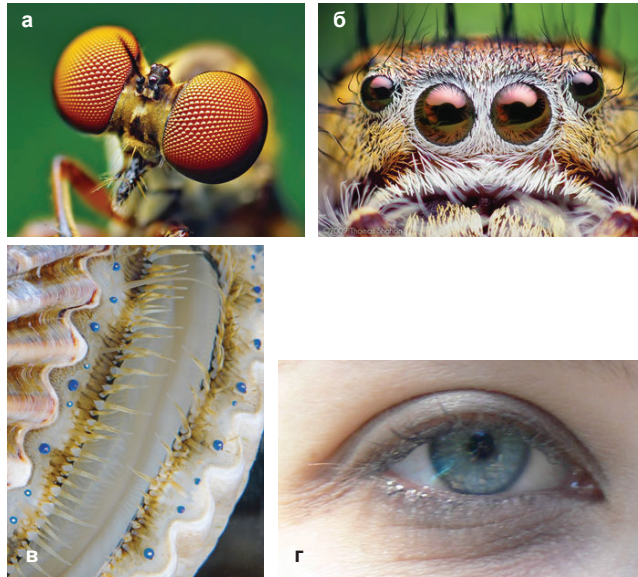
Робот *ощущает* свое окружение и целенаправленно использует эту информацию, чтобы спланировать какое-то действие. Действие может заключаться, например, в перемещении инструмента манипулятора робота для захвата объекта или в перемещении самого робота в другое место.

*Восприятие* (sensing) имеет решающее значение для роботов. *Проприоцептивные* сенсоры измеряют состояние самого робота: угол изгиба сочленений руки, количество оборотов колеса мобильного робота или ток, потребляемый электродвигателем. *Экстероцептивные* сенсоры измеряют состояние внешнего мира по отношению к роботу. Сенсор может быть простейшим датчиком удара на роботе-пылесосе для обнаружения столкновений. Это может быть GPS-приемник, измеряющий расстояние до орбитальной группировки спутников, или компас, измеряющий направление вектора магнитного поля Земли относительно робота. Это также может быть активный сенсор, испускающий акустические, оптические или радиоимпульсы для измерения расстояния до некоторой точки в пространстве и оценивающий ее удаленность по времени, которое необходимо, чтобы эхо импульса вернулось обратно.

---

## 1.4 Зрение роботов

Другой способ восприятия мира – улавливание и интерпретация игры света, отраженного от объекта. Именно это делают наши глаза и мозг, обеспечивая нам зрение. Наш собственный опыт показывает, что зрение – очень эффективный сенсор, необходимый для выполнения подавляющего большинства наших действий, включая распознавание, навигацию, обход препятствий и манипулирование предметами. И мы такие не одни – почти все виды животных используют глаза. На самом деле эволюция *изобретала* глаз много раз. На рис. 1.8 показаны некоторые виды глаз, встречающихся в природе.



**Рис. 1.8.** Разнообразие глаз: а) муха-разбойница, *Holocephala fusca*; б) паук-скакун, *Phidippus putnami* (изображения а и б предоставлены Томасом Шаханом, <https://thomasshahan.com>); в) морской гребешок (снимок предоставил Шонке Джонсен), каждая из маленьких синих сфер – это глаз; г) человеческий глаз.

Интересно отметить, что даже очень простые животные, например пчелы с мозгом, насчитывающим всего  $10^6$  нейронов (по сравнению с нашими  $10^{11}$ ), способны с помощью одного лишь зрения решать сложные и жизненно важные задачи, такие как поиск пищи и доставка ее в улей. Для более высоко развитых животных, таких как млекопитающие, преимущества зрения перевешивают очень высокую биологическую цену обладания глазом: сам сложно устроенный глаз, мышцы, управляющие им, веки и слезные протоки для его защиты, а также обширная зрительная кора (треть нашего мозга) для обработки получаемых данных.

Зрение давно интересует исследователей в области робототехники: камеры могут имитировать функцию глаза и создавать изображения, а алгоритмы компьютерного зрения способны извлекать из изображений полезную информацию. Вместе они позволяют реализовать такие полезные возможности для роботов, как распознавание объектов и манипулирование ими, а также навигация в пространстве. Например, робот-футболист может определить координаты круглого красного объекта на поле, а дрон – оценить траекторию своего движения в пространстве, основываясь на том, как мир движется относительно него. На рис. 1.9 показан робот с несколькими типами камер, обеспечивающих навигацию на открытом воздухе.

Технологические разработки позволили оснащать роботы камерами, выполняющими функцию глаз, и компьютерами, выполняющими функции мозга. На протяжении большей части истории компьютерного зрения, начиная с 1960-х годов, электронные камеры были громоздкими и дорогими, а вычис-

лительные устройства (компьютеры) – недостаточно мощными. В настоящее время существуют КМОП-камеры, разработанные для мобильных телефонов и стоимостью всего в несколько долларов, а современные персональные компьютеры обладают огромной вычислительной мощностью и поддерживают параллельные вычисления. Новые алгоритмы, недорогие датчики и высокая вычислительная мощность сделали зрение практичным датчиком, и этому посвящена данная книга.



**Рис. 1.9.** Группа камер на мобильном роботе для наружного применения: стереопара переднего обзора, широкоугольная камера бокового обзора, зеркало с панорамной камерой над головой (мобильный робот CSIRO)

Существенное ограничение камеры, или глаза, – потеря трехмерной структуры сцены в результирующем двумерном изображении. Несмотря на это, люди способны очень хорошо определять трехмерность сцены, основываясь на получаемой ими зрительной информации. Один из подходов, используемых людьми и роботами, – стереозрение, когда информация, поступающая от двух глаз, объединяется для оценки трехмерной структуры окружения. Марсоход, показанный на рис. 1.5а, оснащен стереокамерой на мачте, а робот на рис. 1.9 – стереокамерой на турели.

Если окружающая среда робота неизменна, то он может обойтись точной картой и отказаться от отслеживания состояния мира, за исключением определения своего собственного положения. Представьте, что вы едете в машине с полностью

непрозрачными стеклами и все, что вам доступно, – это GPS-навигатор. Если бы дорога целиком была в вашем распоряжении, то вы, вероятно, смогли бы успешно доехать из пункта А в пункт Б, хотя и пришлось бы понервничать.

Однако если на дороге будут также другие машины, пешеходы, светофоры или дорожные работы, то такой подход не работает. Чтобы справиться с этой более реалистичной ситуацией, необходима возможность видеть окружающий мир, ощущать его и планировать свои действия соответствующим образом. Люди с легкостью справляются с этой задачей, даже без участия сознания, но пока сложно запрограммировать машину на то же самое – это задача *роботизированного зрения*.

### Отступление 1.7. Развитие глаза

Считается, что все глаза животных имеют общего предка в виде протоглаза, который развился 540 млн лет назад. Однако наиболее крупные эволюционные успехи, по-видимому, произошли всего за последние несколько миллионов лет. Самые ранние глаза, называемые глазными пятнами, представляли собой простые участки белка-фоторецептора у одноклеточных животных, которые могли ощущать яркость света, но не его направление. Многоклеточные животные развили несколько глазных пятен, выстилающих небольшую зрительную ямку, что давало ограниченную способность различать направленную яркость в зависимости от того, какие клетки были освещены. Со временем ямка углубилась, отверстие стало меньше, а количество фоторецепторных клеток увеличилось, образуя камеру-обскуру, способную различать формы. Затем последовало разрастание прозрачных клеток для защиты глазного пятна, что привело к заполнению глазной камеры и в конечном итоге – к глазу, который мы знаем сегодня. Глаз с хрусталиком развивался независимо семь раз у разных видов. Природа создала десять совершенно разных конструкций глаз, включая те, что показаны на рис. 1.8.

## 1.5 Этические аспекты робототехники

Появление робототехники порождает ряд этических проблем. Пожалуй, наибольшую обеспокоенность у широкой общественности вызывает распространенное мнение, что «роботы отнимут работу у людей». Уже сегодня системы искусственного интеллекта берут на себя решение многих задач по обработке информации, включая анализ изображений, принятие решений, составление спортивных и финансовых отчетов, а также оценку кредитоспособности. Люди опасаются, что роботы вскоре займут их место и в других областях деятельности, но

в настоящее время навыки роботов в выполнении повседневных задач оставляют желать лучшего, их надежность и скорость невысоки, а обходятся они довольно дорого. Однако весьма вероятно, что со временем эти проблемы будут преодолены – мы не можем игнорировать тот факт, что многие задачи, выполняемые сейчас людьми, в будущем смогут выполняться роботами.

Проблема роботов и рабочих мест даже сегодня остается сложной. Очевидно, что есть работы, которые людям не следовало бы выполнять, например работа во вредных или опасных условиях. Существует множество низкоквалифицированных работ, где найти человеческую рабочую силу становится все сложнее, например сбор фруктов. Во многих развитых странах люди не стремятся заниматься тяжелым физическим трудом на открытом воздухе в отдаленных районах. Но кто-то же должен выполнять эту работу! Возьмем тот же пример со сбором фруктов и рассмотрим возможные альтернативы: перестать есть фрукты; резко повысить зарплату сборщикам фруктов (и увеличить стоимость фруктов); импортировать фрукты из других мест (и увеличить стоимость фруктов, а также их влияние на окружающую среду); использовать роботов для сбора местных фруктов.

В таких областях, как обрабатывающая промышленность, особенно автомобилестроение, развитие робототехники сыграло решающую роль в повышении производительности труда, что позволило этой отрасли стать экономически жизнеспособной в странах с высоким уровнем заработной платы, таких как Европа, Япония и США. Без роботов эти отрасли не смогли бы существовать: они не нанимали бы людей, не платили бы налоги и не потребляли товары и услуги из других секторов экономики. Да, автоматизированная промышленность создает меньше рабочих мест, но она все равно вносит важный вклад в развитие общества. Роботизация и автоматизация не отнимают рабочие места, а, наоборот, обеспечивают жизнеспособность обрабатывающей промышленности в странах с высокой стоимостью рабочей силы. Как сбалансировать благо общества и благо каждого человека?

Помимо рабочих мест, есть и другие проблемы. Взять, к примеру, беспилотные автомобили. Мы на удивление спокойно относимся к автомобилям, которыми управляют люди, даже притом что они ежегодно убивают более миллиона человек, однако многим не нравится идея беспилотных автомобилей, хотя они значительно сократят количество аварий, в том числе и со смертельным исходом. Мы беспокоимся о том, кто будет виноват, если роботизированный автомобиль совершит ошибку, и это в то время, когда на дорогах продолжается кровавая бойня, устроенная водителями-людьми. Похожие опасения возникают, когда речь идет о роботизированной медицине и хи-

рургии: хирурги-люди не идеальны, но роботы, по-видимому, несут гораздо большую ответственность. Много говорят об использовании роботов для ухода за пожилыми людьми, но ухудшает ли это качество их жизни, лишая их человеческого контакта, разговоров и общения? Должны ли мы использовать роботов для ухода за нашими детьми и даже для их обучения? Что мы думаем об армиях роботов, сражающихся и убивающих людей?

Роботизированный сбор фруктов, автомобили, здравоохранение, уход за пожилыми и детьми могут принести экономическую выгоду нашему обществу, но правильно ли это? Хотим ли мы, чтобы наше общество развивалось в этом направлении? Как нам сбалансировать благо общества с благом отдельного человека? Это глубокие этические вопросы, которые не могут и не должны решаться робототехниками в одиночку. Но робототехники не должны их игнорировать. Мы не должны идти в технологическое будущее, как лунатики, просто «потому что мы можем это». Наша обязанность – помогать формировать будущее осознанно и гарантировать, что оно будет благом для всех. Это важная дискуссия для всего общества, и робототехники обязаны принимать в ней активное участие.

---

## 1.6 О книге

Эта книга посвящена робототехнике и компьютерному зрению по отдельности и их совокупности – роботизированному зрению. Это большая тема, и охват обязательно должен быть широким. Цели этой книги:

- сформировать широкую и прочную основу для понимания с помощью теории и примеров, чтобы сделать абстрактные понятия осязаемыми;
- научить читателя решать более сложные задачи в других специализированных учебниках благодаря мощным вычислительным инструментам и лежащему в их основе программному обеспечению;
- предоставлять моментальную отдачу, решая сложные задачи с относительно небольшим количеством кода;
- дополнить множество отличных публикаций по робототехнике и компьютерному зрению;
- развивать интуицию посредством вычислительных экспериментов.

Подход, использованный в этой книге, заключается в объединении предыстории, теории и примеров. Код и примеры яв-

ляются важнейшими элементами этой книги и не помещаются в конец главы или на веб-сайт издателя, а включены непосредственно в текст и выглядят примерно так:

```
>>> R = rot2(0.3)
array([[ 0.9553, -0.2955],
       [ 0.2955, 0.9553]])
```

где код дополняет обсуждаемую тему и обычно приводит к четкому числовому ответу, изображению или графику, который затем обсуждается. Примеры иллюстрируют использование соответствующих наборов инструментов, и эти знания можно затем применить для решения других задач.

## 1.6.1 Python и книга

Хорошая работа начинается с хороших инструментов.

– *Китайская пословица*

Все вычисления в этой книге основаны на использовании Python 3 – мощного и популярного языка программирования, который наверняка знаком студентам, исследователям и любителям. Базовую функциональность Python можно расширить с помощью дополнительных пакетов. Python в сочетании с популярными пакетами, такими как NumPy, SciPy и Matplotlib ►, предоставляет мощную интерактивную среду, которая упрощает использование линейной алгебры, анализ данных и создание высококачественной графики. Функциональность для робототехники и компьютерного зрения обеспечивается дополнительными легко устанавливаемыми пакетами, которые перечисляются ниже.

Импортируйте  
numpy, scipy  
и matplotlib.  
pyplot  
соответственно.

- *Spatial Maths Toolbox for Python* включает функции для манипулирования данными, такими как векторы, матрицы поворота, однородные преобразования, трехмерные представления, повороты и единичные кватернионы, необходимые для представления трехмерного положения, ориентации и позы.
- *Robotics Toolbox for Python* предоставляет широкий спектр функций для моделирования мобильных роботов и манипуляторов. Toolbox поддерживает самый общий метод представления структуры последовательных манипуляторов и предлагает функции для прямой и обратной кинематики, дифференциальной кинематики, динамики, визуализации и анимации. Toolbox включает и функции для моделирования мобильных роботов, в том числе колесных

транспортных средств и квадрокоптеров, а также контроллеров для них. Кроме того, в нем имеются стандартные алгоритмы для планирования движения робота, определения местоположения, построения карт и SLAM.

- *Machine Vision Toolbox for Python* предоставляет богатый набор функций для моделирования камер, обработки изображений, извлечения признаков из изображений, многокурсной геометрии и управления на основе машинного зрения. Toolbox также содержит функции для получения и отображения изображений, фильтрации, выделения пятен, точек и линий, математической морфологии, деформации изображения, стереозрения, гомографии и вычисления фундаментальной матрицы, робастной оценки, регулировки пучка, визуальных якобианов, геометрического моделирования камеры, калибровки камеры и операций с цветовым пространством. Многие базовые операции реализованы с использованием популярного, эффективного и зрелого пакета OpenCV.
- *Block Diagram Simulator (bdsim)* позволяет моделировать и симулировать блок-схемы на Python. Он поддерживает более 70 типов блоков, позволяет использовать в качестве сигналов между блоками любые типы данных, допустимые в Python, и поддерживает деление на подсистемы. Сложные модели можно выразить с помощью компактного кода Python, а также используя графический редактор.

### Отступление 1.8. Python

Python – интерпретируемый язык программирования высокого уровня, неизменно пользующийся высочайшей популярностью. Python был разработан Гвидо ван Россумом в 1989 году как любительский проект. Свое название он получил в честь британского сериала «Летающий цирк Монти Пайтона» (Monty Python’s Flying Circus), и в документации есть множество других подобных отсылок к спаму и сыру, постоянно упоминаемых в сериале. Первая версия вышла в 1991 году, в 2000-м появилась версия Python 2 (ее поддержка была прекращена в 2020 году на номере версии 2.7.18), а в 2008-м – Python 3. Python наследует идеи многих предшествовавших ему языков программирования и поддерживает процедурные, объектно-ориентированные и функциональные парадигмы программирования. Обладает понятным и простым синтаксисом, динамической типизацией и сборкой мусора.

Ключевая особенность Python – его высокая расширяемость с помощью пакетов. Основной репозиторий стороннего программного обеспечения для Python – Python Package Index (PyPI; <https://pypi.org>) – содержит более 300 000 пакетов, которые можно установить с помощью команды `pip`.

Гвидо ван Россум (1956–) – голландский математик и информатик. Работал в Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) над языком программирования ABC, который оказал большое влияние на Python. До 2018 года был «пожизненным великодушным диктатором» Python, а в настоящее время является членом руководящего совета.

Первые три пакета – это повторные реализации известного пакета `Toolboxes for MATLAB®`.

Если вы только начинаете заниматься робототехникой или машинным зрением, то наборы инструментов станут важной исходной базой кода для вашего проекта. Перечисленные выше наборы инструментов предоставляются в виде исходного кода. В целом код инструментов написан как можно проще для облегчения понимания, возможно, в ущерб вычислительной эффективности. Приложение А содержит подробные сведения об установке наборов пакетов и о том, как получить другие ресурсы книги, такие как примеры и рисунки.

В этой книге приводятся примеры использования многих функций Toolbox в контексте решения конкретных задач, но она не является справочным руководством. Полная документация по всем функциям Toolbox доступна в онлайн-документации, созданной на основе исходного кода.

## 1.6.2 Условные обозначения, соглашения и структура книги

Математические обозначения, используемые в книге, сведены в таблицу, размещенную во введении. Поскольку охват книги широк, удобных символов не хватает, и некоторые символы неизбежно обозначают разные понятия в разных частях книги.

В книге много кода на Python, и он обозначен моноширинным шрифтом, например

```
>>> a = 6 * 7
a =
42
```

Три символа `>>>` – это приглашение к вводу командной строки Python, а за ними следует команда пользователя на языке Python. Последующие строки без приглашения представляют ответ Python. Длинные команды после переноса на следующую строку начинаются с многоточия (`...`). ► Все функции, классы и методы, упомянутые в тексте или в сегментах кода, снабжены перекрестными ссылками и имеют собственные указатели в конце книги, позволяющие найти различные способы использования конкретных функций.

Для выделения и разграничения частей контента используются различные блоки.

Блоки кода с символами приглашения к вводу можно просто копировать и вставлять в оболочку IPython, и они будут интерпретированы правильно.

В таких блоках сообщаются особенно важные сведения.

- ❗ Так оформляются предупреждения о некоторых аспектах, которые часто становятся ловушками для новичков.

Они имеют вид заметок на полях с соответствующим маркером в тексте.

Мне, как автору, пришлось преодолевать противоречия между полнотой, ясностью и краткостью. По этой причине многие детали были помещены в выноски на полях ◀ и в выделенные блоки, и при первом чтении их можно пропустить. В конце некоторых глав есть раздел «Дополнительные материалы», который тоже можно пропустить при первом чтении. Однако если вы пытаетесь понять конкретный алгоритм и применить его к своей собственной задаче, то понимание деталей и нюансов может быть важным, и не стоит игнорировать примечания и дополнения.

### Отступление 1.9

Такие блоки содержат техническую, историческую или биографическую информацию, которая дополняет основной текст, но не имеет решающего значения для его понимания.

Каждая глава заканчивается разделом «Подведение итогов», в котором обобщаются важные уроки из главы, обсуждаются рекомендации для дальнейшего чтения и предлагаются упражнения. В разделе «Дополнительная литература» перечислены предшествующие работы, ссылки на них и более полное описание алгоритмов. В разделе «Ресурсы» приводятся ссылки на соответствующий онлайн-код и наборы данных. Упражнения укрепляют понимание материала главы и обычно связаны с конкретными примерами кода в главе. Упражнения различаются по сложности: от простого дополнения примеров кода до более сложных задач.



Многие примеры кода включают команду `plot`, которая генерирует рисунок. Рисунки в книге обычно снабжены подписями осей, сеткой, легендами и рисками на осях. Для всего этого требуется множество дополнительных строк кода, которые загромождают примеры, поэтому я поместил в репозиторий GitHub более детальные сценарии на Python, генерирующие все опубликованные рисунки.

CoLaboratory является товарным знаком Google LLC, и эта книга никак не одобрена и не связана с Google. Некоторые анимации и 3D-визуализации (пока) не поддерживаются в CoLaboratory.

Наконец, в книге содержатся ссылки на онлайн-ресурсы, к которым легко получить доступ через веб-браузер. Они имеют короткие URL-адреса (кликабельные в электронной версии) и QR-коды, размещенные на полях. Каждая глава содержит ссылку на блокнот Jupyter Notebook в Google CoLaboratory™ (Colab), что позволяет запустить код этой главы без установки на свой компьютер. ◀ Некоторые рисунки изображают трехмерные сцены, и плоское двухмерное изображение не передает их в полной мере – соответствующие им ссылки ведут к интерактивным веб-средствам 3D-просмотра этих сцен.

### 1.6.3 Целевая аудитория

Книга предназначена в первую очередь для студентов третьего или четвертого курсов инженерного бакалавриата, магистрантов и аспирантов. Студентам бакалавриата книга будет служить вспомогательным пособием по курсу робототехники, мехатроники или компьютерного зрения или для поддержки крупного проекта в области робототехники или машинного зрения. Учащиеся должны изучить часть I и приложения для усвоения основных понятий, а затем соответствующую часть книги: мобильная робототехника, роботы-манипуляторы, машинное зрение или управление на основе зрения. Пакеты Toolbox предоставляют надежный набор инструментов для различных целей, а упражнения в конце каждой главы предлагают дополнительные задачи, помимо детальных примеров.

Студентам, поступающим в аспирантуру и ранее изучавшим инженерное дело или компьютерные науки, книга поможет заполнить пробелы между знаниями, полученными в бакалавриате, и тем, что потребуется для более глубокого изучения робототехники и машинного зрения. Примеры кода в книге помогут начать исследования, быстрее приступить к работе и продуктивно трудиться над своими проблемами и идеями. Поскольку исходный код свободно доступен, вы можете изменить его в соответствии с вашими потребностями, а когда придет время (как это обычно бывает), реализовать ваши алгоритмы на каком-либо другом языке программирования, тогда можно использовать Toolbox для перекрестной проверки вашей реализации.

Для тех, кто уже не является студентом, – исследователей или практикующих специалистов, – книга послужит полезным дополнением к литературе по широкому кругу тем робототехники и машинного зрения, а также справочником и руководством по пакетам Toolbox.

Книга предполагает знание линейной алгебры (матрицы, векторы, собственные значения), базовой теории множеств и теории графов, исчисления, динамики (силы, моменты, инерция) и теории управления на уровне бакалавра. В приложениях приводится сокращенное описание основных понятий. Студенты, изучающие информатику, могут быть незнакомы с понятиями, представленными в главах 4 и 9, такими как преобразование Лапласа, передаточные функции, линейное управление (пропорциональное управление, пропорционально-дифференциальное управление, пропорционально-интегральное управление) и обозначениями блок-схем. При первом чтении эти главы можно просто пробежать глазами, а работа Альбертоса и Марелиса (Albertos и Mareels, 2010) может стать полезным введением в некоторые из этих тем. Книга также предполагает

ет, что читатель знаком с программированием на языке Python и с методами объектно-ориентированного программирования.

### 1.6.4 Обучение с помощью книги

Лучший способ обучения – это практика. Хотя в книге показаны команды Python и результаты их выполнения, ничто не заменит самостоятельную работу. Воспринимайте книгу как приглашение поработать. Выполняя команды самостоятельно, вы можете просматривать результаты так, как вам удобно, отображать их по-другому или опробовать алгоритм на других данных или с другими параметрами. Книга специально разработана так, чтобы дать вам возможность вводить команды во время чтения. Вы также можете просмотреть онлайн-документацию по функциям пакетов Toolbox, открыть для себя дополнительные функции и параметры и поэкспериментировать с ними или прочитать код, чтобы увидеть, как они работают на самом деле, и, возможно, изменить их.

Большинство примеров довольно короткие, поэтому не составит труда ввести их, однако их очень много – более 1600. Код для каждой главы доступен в виде блокнота Jupyter Notebook (см. приложение А), который позволяет выполнять код ячейку за ячейкой или копировать и вставлять в свои файлы сценариев.

Также предоставляется инструмент командной строки `gvc-tool` – оболочка для IPython, – который предварительно загружает все наборы инструментов с помощью инструкции `import *` в текущее пространство имен. Возможно, это не лучшая практика программирования на Python, но она позволяет запускать примеры именно так, как они написаны в книге.

Robot Academy (<https://robotacademy.net.au/>) – это бесплатный и открытый учебный ресурс, который содержит более 200 коротких видеоуроков по многим темам этой книги. Во многих уроках для иллюстрации концепций используется код MATLAB вместо Python. Однако в версиях пакетов Toolbox для Python существуют функции с похожими именами.

И версия 9  
исходного кода  
Robotics Toolbox  
для MATLAB.

### 1.6.5 Преподавание с помощью книги

Книгу можно использовать как методическое пособие для курсов по роботизированному зрению, компьютерному зрению и мехатронике. Все курсы должны содержать введение в положение, ориентацию, позу, композицию позы и системы координат, которое обсуждается в главе 7. Для курса мобильной робо-

тотехники или машинного зрения достаточно описать только двухмерный случай. При преподавании роботизированных манипуляторов и многокурсной геометрии необходимо изучать двухмерные и трехмерные случаи.

Весь код и большинство рисунков, что приводятся в этой книге, доступны на веб-сайте книги, и вы можете свободно использовать их при условии указания авторства. Весь код из этой книги доступен в виде блокнотов Jupyter Notebook, которые можно использовать в качестве основы для демонстраций на лекциях или в учебных пособиях. Рисунки представлены в виде PDF-файлов, а для рисунков, сгенерированных кодом на Python, доступны соответствующие сценарии, позволяющие их воссоздать. Подробности ищите в приложении А.

Упражнения в конце каждой главы можно использовать в качестве основы для заданий, в качестве примеров для работы в классе или при разработке учебных пособий. Некоторые вопросы специально рассчитаны на открытую дискуссию, чтобы стимулировать исследование влияния параметров и поиск пределов производительности алгоритмов. Это исследование должно сопровождаться дискуссиями о показателях эффективности и о том, какие из них наиболее информативны. Истинное понимание алгоритмов включает оценку не только влияния параметров, но и того, как и при каких обстоятельствах алгоритмы терпят неудачу.

Подход к обучению также может быть обратным: сначала погрузиться в конкретную задачу, а затем разобрать соответствующий базовый материал. Подходящие задачи можно выбрать из разделов «Применение» глав или из любых упражнений. Особо сложные упражнения снабжены пометкой.

Если вы хотите использовать обратный подход к обучению, то ряд задач можно найти в вышеупомянутой Robot Academy (<https://robotacademy.net.au>). Студенты будут смотреть видео и готовиться вне аудитории, а вы можете использовать время в классе для работы над наборами задач.

Для преподавания в аспирантуре следует использовать статьи и учебники, упомянутые в разделе «Дополнительные материалы», которые также могут стать основой списка дополнительной литературы. Они также могут пригодиться при проведении исследований и подготовке научных публикаций.

---

## 1.6.6 Структура книги

Я обещал книгу с моментальной отдачей, но, прежде чем мы сможем приступить к изучению робототехники, необходимо разобраться с фундаментальными понятиями. Часть I знако-

мит читателей с понятиями положений (поз, pose) и систем координат – как мы представляем положение и ориентацию робота, камеры или объектов, с которыми робот должен работать. Мы обсудим, как движение между двумя положениями (позами) можно *разложить* на последовательность элементарных перемещений и поворотов и как из элементарных движений можно *составить* более сложные движения. В главе 2 обсуждается компьютерное представление поз, а в главе 3 – взаимосвязь между скоростью и производной позы, генерация последовательности поз, плавно следующих некоторому пути в пространстве и времени, и оценка движения с помощью датчиков.

Оставив позади эти формальности, мы перейдем к главной теме – роботам. Существует два важных класса роботов: мобильные роботы и манипуляторы, которые рассматриваются в частях II и III соответственно. ◀

Хронологически первыми появились манипуляторы, однако мобильная робототехника в основном сводится к решению более понятных двумерных задач, чем задач управления манипулятором в трехмерном пространстве.

Часть II начинается с главы 4, где рассматриваются модели движения нескольких типов колесных транспортных средств и многвинтового летательного аппарата. Рассматриваются различные законы управления колесными транспортными средствами, такие как движение к точке, следование по заданной траектории и перемещение в заданную позу. Глава 5 посвящена навигации, т. е. как робот находит путь между точками А и В в реальном мире. Здесь рассматриваются два важных случая: с картой и без нее. Большинство методов навигации требуют знания местоположения робота, и в главе 6 мы рассмотрим различные подходы к решению этой задачи, основанные на подсчете пути или наблюдении за ориентирами и карте. Мы также посмотрим, как робот может составить карту и даже определить свое местоположение, одновременно картографируя неизвестную область – задача SLAM.

Часть III посвящена роботам-манипуляторам, а точнее манипуляторам с последовательным интерфейсом. Манипуляторы используются для таких задач, как сборка, сварка, погрузка-разгрузка материалов и даже хирургия. Глава 7 вводит понятие кинематики, которая связывает углы сочленений робота с положением его инструмента в трехмерном пространстве. Обсуждаются методы создания плавных траекторий движения инструмента, а также показаны два примера, как робот-манипулятор может нарисовать букву на поверхности и как несколько рук (действующих как ноги) можно использовать для создания модели простого шагающего робота. Глава 8 рассматривает взаимосвязь между скоростями изменения углов в сочленениях и положением инструмента, матрицу Якоби и такие понятия, как сингулярность, управляемость, движение в нуль-пространстве и управление движением с заданной скоростью. Также обсуждаются роботы мало-

приводные (underactuated) и многоприводные (overactuated) и общее численное решение обратной кинематики. Глава 9 знакомит с системами управления сочленениями, динамическими уравнениями движения для манипуляторов с последовательным интерфейсом и взаимосвязью между силами, действующими в сочленениях. В ней рассматриваются такие важные темы, как изменение инерции, влияние полезной нагрузки, гибкие трансмиссии, сравнение стратегий управления с независимыми и нелинейными сочленениями, а также управление в пространстве задач.

Компьютерное зрение – это обширная область, связанная с обработкой и улучшением изображений для удобства человека, интерпретации содержимого сцены или создания трехмерной модели, соответствующей сцене. Часть IV посвящена машинному зрению, подвиду компьютерного зрения, которое здесь определяется как извлечение числовых характеристик из изображений с целью формирования входных данных для управления роботом. Обсуждение начинается в главе 10 с описания основных понятий, таких как свет, освещение и цвет. Глава 11 обсуждает *обработку изображений* – область обработки двумерных сигналов, в ходе которой одно изображение преобразуется в другое. Обсуждение начинается с получения изображений реального мира, а потом рассматриваются различные арифметические и логические операции с изображениями. Затем вводятся пространственные операторы, такие как свертка, сегментация, морфологическая фильтрация и, наконец, изменение формы и размера изображения. Эти операции лежат в основе обсуждения в главе 12, которое описывает, как извлекать числовые признаки из изображений. Признаки описывают однородные области (пятна), линии или отдельные точки на сцене и являются основой для управления роботом на основе зрения. Также рассматривается применение методов глубокого обучения для обнаружения объектов. Глава 13 описывает геометрическую модель создания перспективного изображения с помощью линз и обсуждает такие темы, как калибровка камеры и оценка положения (позы). Здесь будет представлена тема неперспективной визуализации с использованием широкоугольных объективов и зеркальных систем, массивов камер и камер светового поля. В главе 14 рассматриваются приемы оценки геометрии простой трехмерной сцены с использованием классических методов, таких как структурированное освещение, а также комбинирование характеристик, обнаруженных в разных ракурсах одной и той же сцены. Эти приемы помогают получать информацию о геометрии и пространственном соотношении между ракурсами камер, которая кодируется в фундаментальных, существенных и гомографических матрицах. Мы также обсудим тему определения струк-

туры объекта по движению, а также такие приложения, как коррекция перспективы, монтирование и поиск изображений и визуальная одометрия.

В части V обсуждается, как можно использовать визуальные признаки, получаемые с камеры, для управления манипуляторами и мобильными роботами. Этот подход известен как управление на основе зрения или визуальное сервоуправление. В данной части обобщаются концепции, представленные в предыдущих частях книги. Глава 15 знакомит с классическими подходами к визуальному сервоуправлению, известными как визуальное сервоуправление на основе оценки положения и визуальное сервоуправление на основе изображения, а также рассматривает их ограничения. Глава 16 обсуждает более современные подходы, устраняющие эти ограничения, а также использование неперспективных камер, малоприводных и мобильных роботов.

Это большая книга, но любую из частей можно читать отдельно, периодически обращаясь к рассмотренным ранее понятиям. По-настоящему обязательной для чтения в этой книге является только глава 2. Части II, III или IV могут быть использованы соответственно для преподавания вводного или продвинутого курса мобильных роботов, роботов-манипуляторов или компьютерного зрения. Альтернативный подход, основанный на теме мгновенной отдачи, состоит в том, чтобы сразу же перейти к любой главе и начать изучение, заглядывая в предыдущие главы по мере необходимости.

---

### 1.6.7 Дополнительное чтение

«Handbook of Robotics» (Siciliano and Khatib, 2016) представляет энциклопедическое освещение современной робототехники, включая теорию, технологию и различные типы роботов, такие как телероботы, сервисные роботы, полевые роботы, воздушные роботы, подводные роботы и т. д. В классической работе Шеридана (Sheridan, 2003) рассматривается спектр автономности: от дистанционного управления, через совместное и коммерческое управление, до полной автономности.

Подробный обзор компьютерного зрения можно найти в книге Селиски (Szeliski, 2022). Увлекательные статьи о глазах и биологии зрения можно найти в работах Шринивасана и Венкатеша (Srinivasan and Venkatesh, 1997), Лэнда и Нильссона (Land and Nilsson, 2002), Ингса (Ings, 2008), Фрисби и Стоуна (Frisby and Stone, 2010) и Стоуна (Stone, 2012). Введение в искусственный интеллект можно найти в книге Рассела и Норвига (Russell and Norvig, 2020).

В ряде очень интересных книг обсуждается будущее влияние робототехники и искусственного интеллекта на общество, например в книгах Форда (Ford, 2015), Бриньолфссона и Макафи (Brynjolfsson and McAfee, 2014) и Бострома (Bostrom, 2016). Видеоролик на YouTube «Grey» (Grey, 2014) содержит ряд важных тезисов о будущем труда и может служить отличным поводом для обсуждения.