

*Моей семье – Филиппе, Люси и Мадлен –  
за их снисходительность и поддержку;  
моим родителям Маргарет и Дэвиду за то,  
что разожгли мое любопытство;  
и Лу Полу, заронившему семя,  
из которого выросла эта книга.*

---

# Содержание

<i>Вступительное слово редакторов</i> .....	11
<i>Вступительное слово ко второму изданию</i> .....	12
<i>Предисловие</i> .....	14
<i>Примечание ко второму изданию</i> .....	21
<i>Специальные обозначения</i> .....	23
<b>1 Введение</b> .....	29
1.1 О книге .....	42
1.1.1 Программное обеспечение MATLAB и наборы инструментов .....	43
1.1.2 Условные обозначения, соглашения и структура книги .....	45
1.1.3 Целевая аудитория .....	46
1.1.4 Обучение с помощью книги .....	47
1.1.5 Преподавание с помощью книги .....	48
1.1.6 Структура книги .....	49
Дополнительное чтение .....	50
<b>Часть I Основы</b> .....	51
<b>2 Представление позиции и ориентации</b> .....	53
2.1 Работа в двух измерениях (2D).....	60
2.1.1 Ориентация в двух измерениях .....	61
2.1.2 Положение в двух измерениях .....	66
2.2 Работа в трех измерениях (3D) .....	73
2.2.1 Ориентация в трех измерениях .....	74
2.2.2 Положение в трех измерениях .....	94
2.3 Дополнительные темы .....	100
2.3.1 Нормализация .....	100
2.3.2 Понятие экспоненциального отображения .....	101
2.3.3 Подробнее о кручениях .....	103
2.3.4 Производная положения .....	107
2.3.5 Преобразование пространственных скоростей .....	109
2.3.6 Вращение, задаваемое в приращениях .....	111
2.3.7 Движение твердого тела, задаваемое в приращениях .....	113
2.4 Использование Toolbox .....	114
2.5 Подведение итогов .....	117
Дополнительное чтение .....	120
Упражнения .....	121

<b>Часть II</b>	<b>Компьютерное зрение</b>	123
<b>3</b>	<b>Свет и цвет</b>	125
3.1	Спектральное представление света	125
3.1.1	Поглощение	129
3.1.2	Отражение	130
3.1.3	Яркость	131
3.2	Цвет	132
3.2.1	Человеческий глаз	133
3.2.2	Измерение цвета	136
3.2.3	Воспроизведение цветов	138
3.2.4	Цветовое пространство	142
3.2.5	Названия цветов	147
3.2.6	Другие цветовые и хроматические пространства	148
3.2.7	Преобразование между различными основными цветами	152
3.2.8	Что такое белый цвет?	155
3.3	Дополнительные темы	155
3.3.1	Цветовая температура	156
3.3.2	Постоянство цвета	157
3.3.3	Баланс белого	157
3.3.4	Изменение цвета из-за поглощения	159
3.3.5	Двухцветное отражение	160
3.3.6	Гамма	162
3.4	Применение: цветное изображение	164
3.4.1	Сравнение цветовых пространств [examples/colourspace]	164
3.4.2	Удаление теней [examples/shadow]	166
3.5	Подведение итогов	168
	Дополнительное чтение	169
	Источники данных	171
	Упражнения	172
<b>4</b>	<b>Изображения и их обработка</b>	174
4.1	Получение изображения	175
4.1.1	Изображения из файлов	175
4.1.2	Изображения с подключенной камеры	181
4.1.3	Изображения из видеофайла	185
4.1.4	Изображения из интернета	186
4.1.5	Изображения с карт	187
4.1.6	Изображения из кода	188
4.2	Гистограммы изображений	190
4.3	Монадические операции	192
4.4	Диадические операции	195
4.5	Пространственные операции	200
4.5.1	Линейная пространственная фильтрация	201
4.5.2	Сравнение с шаблоном	216

4.5.3	Нелинейные операции.....	223
4.6	Математическая морфология.....	225
4.6.1	Удаление шума.....	229
4.6.2	Обнаружение границы.....	231
4.6.3	Преобразование «попадание или промах».....	232
4.6.4	Преобразование расстояния [examples/chamfer_match.m].....	233
4.7	Изменение формы.....	235
4.7.1	Обрезка.....	235
4.7.2	Изменение размера изображения.....	236
4.7.3	Пирамиды изображений.....	238
4.7.4	Деформация изображения.....	239
4.8	Подведение итогов.....	243
	Дополнительное чтение.....	245
	Источники изображений.....	246
	Примечания к MATLAB.....	247
	Программные инструменты общего назначения.....	247
	Упражнения.....	248
<b>5</b>	<b>Извлечение признаков изображения.....</b>	<b>251</b>
5.1	Получение признаков из области.....	252
5.1.1	Классификация.....	254
5.1.2	Оформление.....	266
5.1.3	Описание.....	270
5.1.4	Промежуточный итог.....	285
5.2	Признаки, извлекаемые из линий.....	287
5.2.1	Промежуточный итог.....	293
5.3	Признаки, извлекаемые из точек.....	294
5.3.1	Классические детекторы углов.....	294
5.3.2	Угловые детекторы в масштабируемом пространстве.....	301
5.4	Подведение итогов.....	308
	Примечания к MATLAB.....	309
	Дополнительное чтение.....	310
	Упражнения.....	314
	<b>Часть III Геометрия зрения.....</b>	<b>317</b>
<b>6</b>	<b>Формирование изображения.....</b>	<b>319</b>
6.1	Перспективная камера.....	320
6.1.1	Перспективная проекция.....	320
6.1.2	Моделирование перспективной камеры.....	324
6.1.3	Дискретная плоскость изображения.....	326
6.1.4	Матрица камеры.....	328
6.1.5	Точки проекции.....	331
6.1.6	Дисторсия объектива.....	334
6.2	Калибровка камеры.....	336

6.2.1	Метод гомогенного преобразования.....	337
6.2.2	Разложение калибровочной матрицы камеры .....	340
6.2.3	Вычисление положения .....	341
6.2.4	Инструменты для калибровки камеры .....	343
6.3	Изображения с широким полем зрения .....	345
6.3.1	Камера с объективом «рыбий глаз» .....	346
6.3.2	Катадиоптрическая камера .....	349
6.3.3	Сферическая камера .....	352
6.4	Унифицированная модель формирования изображений .....	354
6.4.1	Сопоставление широкоугольных изображений со сферой .....	356
6.4.2	Преобразование сферического изображения в перспективное .....	358
6.5	Новые типы камер.....	360
6.5.1	Многокамерные массивы.....	360
6.5.2	Камеры светового поля.....	361
6.6	Дополнительные темы .....	364
6.6.1	Проецирование произвольных линий в трехмерном пространстве .....	364
6.6.2	Неперспективные камеры .....	366
6.6.3	Камера и движение изображения .....	368
6.7	Подведение итогов .....	375
	Дополнительное чтение и ресурсы .....	377
	Примечания к инструментам .....	379
	Упражнения.....	380
<b>7</b>	<b>Использование нескольких изображений .....</b>	<b>382</b>
7.1	Совмещение признаков .....	384
7.2	Геометрия нескольких ракурсов .....	390
7.2.1	Фундаментальная матрица.....	393
7.2.2	Существенная матрица.....	396
7.2.3	Вычисление фундаментальной матрицы по данным реального изображения .....	398
7.2.4	Планарная гомография.....	404
7.3	Стереозрение .....	411
7.3.1	Разреженное стереозрение .....	411
7.3.2	Плотное стереосопоставление .....	416
7.3.3	Уточнение пика.....	426
7.3.4	Очистка и реконструкция.....	427
7.3.5	Отображение 3D-текстуры.....	432
7.3.6	Анаглифы .....	433
7.3.7	Исправление изображения .....	435
7.4	Пакетная подстройка.....	437
7.5	Облака точек .....	447
7.5.1	Поиск плоскости .....	447
7.5.2	Сопоставление двух наборов точек .....	449

7.6	Структурированный свет.....	453
7.7	Приложения .....	455
7.7.1	Коррекция перспективы.....	455
7.7.2	Мозаика [examples/mosaic].....	459
7.7.3	Сопоставление и поиск изображений [examples/retrieval].....	463
7.7.4	Визуальная одометрия [examples/vodemo] .....	471
7.8	Подведение итогов .....	476
	Примечания к MATLAB и Toolbox.....	477
	Дополнительное чтение.....	478
	Дополнительные ресурсы.....	484
	Упражнения.....	486
	<b>Приложения</b> .....	493
<b>A</b>	<b>Установка наборов инструментов</b> .....	495
<b>B</b>	<b>Линейная алгебра: краткое повторение</b> .....	499
B.1	Векторы .....	499
B.2	Матрицы .....	501
<b>C</b>	<b>Геометрия</b> .....	509
C.1	Евклидова геометрия.....	509
C.2	Однородные координаты .....	522
C.3	Геометрические преобразования .....	526
<b>D</b>	<b>Группы и алгебра Ли</b> .....	530
<b>E</b>	<b>Линеаризация, якобианы и гессианы</b> .....	537
<b>F</b>	<b>Решение систем уравнений</b> .....	543
F.1	Линейные задачи.....	543
F.2	Нелинейные задачи .....	545
<b>G</b>	<b>Графы</b> .....	555
<b>H</b>	<b>Определение пика</b> .....	559
	<i>Литература</i> .....	564
	<i>Предметный указатель</i> .....	579

---

# Вступительное слово редакторов

На заре третьего десятилетия века робототехника радует нас удивительными успехами и продолжает стремительно развиваться, опираясь на передовые технологии. Это безостановочное развитие способствует широчайшему внедрению роботов в человеческую жизнь в больницах и домах, на фабриках и в школах; в поле роботы тушат пожары, производят товары и продукты, собирают фрукты и поливают сельскохозяйственные угодья, сохраняя человеческие жизни и сберегая драгоценное время. Сегодня мы ожидаем, что роботы окажут значительное влияние на самые разные отрасли, от промышленного производства до здравоохранения, транспорта и исследования дальнего космоса и моря. Завтра роботы станут будничным явлением и еще больше проникнут в различные аспекты нашей жизни.

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.

Эта книга представляет собой доработанный ремейк одного из томов второго издания книги Питера Корка «Робототехника, зрение и управление – фундаментальные алгоритмы в MATLAB», вышедшего в 2017 г. Его работа теперь состоит из двух отдельных томов: один посвящен робототехнике и управлению, а другой – роботизированному зрению. Первый том содержит материал из первых девяти глав предыдущего издания и раскрывает такие понятия, как: положение, время и движение; мобильные роботы с навигацией и локализацией; кинематика, динамика и управление роботами-манипуляторами. Второй том содержит материал из первых двух глав и глав с десятой по четырнадцатую предыдущего издания и охватывает следующие темы: основы положения наблюдателя в пространстве, компьютерного зрения, обработки изображений и выделения признаков; формирование изображений и множественные изображения в контексте геометрии зрения.

В результате мы получили комплект из двух книг, который, по отзывам читателей, стал настоящей жемчужиной в нашей серии STAR!

Редакторы STAR  
*Бруно Сицилиано* (Неаполь, Италия)  
*Усама Хатиб* (Стэнфорд, США)

Ноябрь 2020 г.

---

# Вступительное слово ко второму изданию

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 убежденность в этом подтверждает эффективное использование программного обеспечения MATLAB Toolbox.

Читатель ознакомится с такими ключевыми понятиями зрения роботов, как моделирование камеры, обработка изображений, выделение признаков и многокурсовая геометрия. В процессе обсуждения автор дает представление о том, как сложные проблемы могут быть разделены 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

Цифровые изображения окружают нас повсюду – у большинства из нас есть коллекции из тысяч цифровых изображений, снятых на различных устройствах. Каждое изображение содержит информацию, о которой мы обычно не задумываемся, – в наборе пикселей скрыта информация о трехмерной структуре сцены, материалах, из которых она состоит, и условиях освещения в данный момент. В повседневной жизни мы используем зрение, чтобы выполнять огромное количество разнообразных действий: узнавать людей, читать текст, манипулировать объектами и ориентироваться в пространстве. Некоторые простые визуальные задачи теперь могут решать машины. Например, камеры могут определить, улыбаемся ли мы, платформы социальных сетей и таможенные терминалы могут распознавать отдельные лица; мы можем искать фотоснимки в онлайн-альбомах, используя ключевые слова. Роботы обязаны овладеть визуальными навыками, если они хотят реализовать свой потенциал в качестве полезных и вездесущих машин в нашей повседневной жизни.

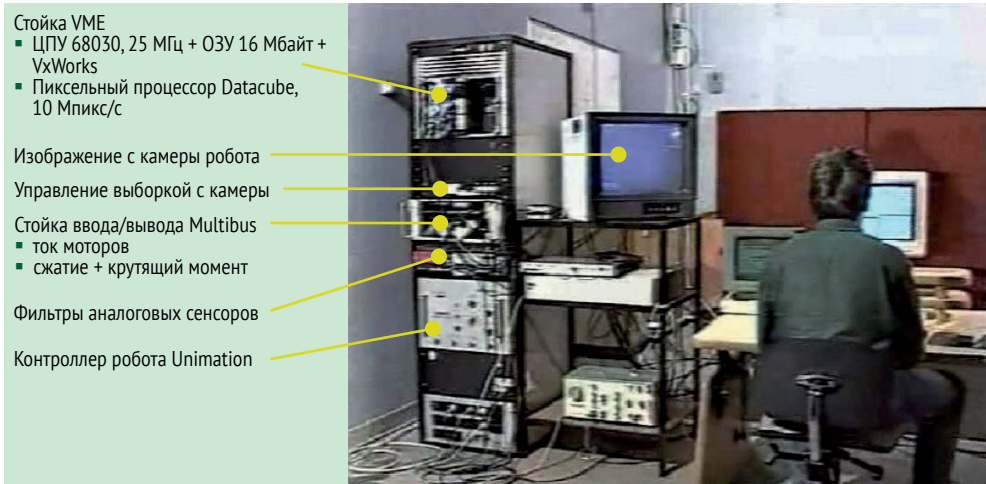
Роботы – это машины, управляемые данными: они собирают данные, обрабатывают их и предпринимают действия на их основе. Данные поступают от различных датчиков, включая камеры. Изображение состоит из миллионов пикселей, и объем данных, которые необходимо обрабатывать в режиме реального времени, огромен.

Прогресс роботизированного зрения всегда был обусловлен появлением более эффективных способов обработки этих данных. Все успехи в области роботизированного зрения достигнуты за счет новых и более эффективных алгоритмов, а также резкого увеличения вычислительной мощности в соответствии с законом Мура ►. Когда я начал заниматься робототехникой и компьютерным зрением в середине 1980-х (рис. 0.1), как раз

«В будущем компьютеры могут весить не более 1.5 тонн». Журнал *Popular Mechanics*, предсказавший развитие науки в 1949 г.

Тема глубокого обучения выходит за рамки этой книги.

появился компьютер IBM PC – он имел 16-разрядный микропроцессор с частотой 4.77 МГц и 16 Кбайт памяти (с возможностью расширения до 256 Кбайт). За прошедшие 30 с лишним лет вычислительная мощность выросла более чем в миллион раз. За последние пять лет на передний план вышли графические процессоры (GPU), которые породили новую волну алгоритмов, управляемых данными, в первую очередь в области глубокого обучения ◀.



**Рис. 0.1.** Когда-то для экспериментов с роботизированным зрением требовалось много специального оборудования. Здесь автор книги сидит возле стойки, набитой модулями для обработки изображений в реальном времени и управления роботами (1992 г.)

«Понимание» – это слово с очень обширной смысловой нагрузкой, и философский вопрос о том, сможет ли машина когда-либо «понимать», пока остается открытым. В этом контексте мы используем узкую интерпретацию «понимания», которая подразумевает распознавание объектов и, возможно, действий.

За относительно короткую историю роботизированного зрения было разработано очень большое количество алгоритмов для эффективного решения крупномасштабных задач понимания сцены ◀, оценки движения и трехмерной реконструкции – значительное, осязаемое и коллективное достижение исследовательского сообщества. Однако объем и сложность этих знаний представляют собой вполне реальную преграду для новичков. При взгляде на изобилие доступных алгоритмов возникает реальный и важный вопрос:

*Какой алгоритм выбрать для моей конкретной задачи?*

Разумеется, можно попробовать несколько разных алгоритмов и посмотреть, какой из них лучше всего подходит для текущей задачи, но это очень трудоемкий подход, и он приводит нас к следующему вопросу:

*Как я могу оценить алгоритм X на своих собственных данных, не тратя дни на его реализацию и отладку исходного кода из оригинальных исследовательских работ?*

К счастью, нам благоволят два важных фактора. Во-первых, это доступное математическое программное обеспечение общего назначения, которое упрощает создание прототипов алгоритмов. Существуют коммерческие пакеты, такие как MATLAB®, Mathematica®, Maple® и MathCad® ►, а также проекты с открытым исходным кодом, такие как SciLab, Octave и Matplotlib. Все эти инструменты эффективно работают с векторами и матрицами, способны рисовать сложную и красивую графику и могут применяться в интерактивном режиме или в качестве среды программирования. Во-вторых, это сообщество сторонников открытого исходного кода. Многие алгоритмы, разработанные исследователями, доступны в виде открытого исходного кода. Они могут быть реализованы на одном из только что упомянутых математических языков общего назначения или написаны на распространенном языке, таком как C, C++, Java или Python.

Соответственно  
товарные знаки  
The MathWorks Inc.,  
Wolfram Research,  
MapleSoft и PTC.

Более двадцати лет я участвую в жизни сообщества разработчиков программного обеспечения с открытым исходным кодом и поддерживаю два набора инструментов MATLAB с открытым исходным кодом: один для машинного зрения и один для робототехники. Их основы были заложены еще в моей докторской диссертации, и с тех пор они развивались, обретая новые функции и отслеживая изменения в языке MATLAB. Именно они составляют основу этой книги.

У этих наборов инструментов есть несколько важных достоинств. Во-первых, они существуют уже давно, и тысячи пользователей применяют их для решения самых разных задач, поэтому коду можно доверять. Новые алгоритмы или даже традиционные подходы, закодированные на новых языках или выполняемые в новых средах, вполне можно сопоставить с реализациями в MATLAB Toolbox.

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

Во-вторых, они позволяют пользователю работать с реальными задачами, а не только с тривиальными примерами. Когда мы беремся за обработку реальных изображений с миллионами пикселей, необходимые вычисления многократно превышают возможности человека. В-третьих, они позволяют нам 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 2D- и 3D-графического отображения MATLAB. В-четвертых, код Toolbox делает многие распространенные алгоритмы осязаемыми и доступными. Вы можете

прочитать код, применить его к своим задачам, расширить или переписать. Это дает вам серьезную фору на старте, когда вы начинаете свой путь к роботизированному зрению.

Я старался использовать в книге свободное разговорное повествование, переплетая текст, математические формулы и примеры кода. Я хотел показать, как сложные проблемы можно разложить на части и решить, используя всего несколько простых строк кода. Строго говоря, это индуктивный подход к обучению – переход от конкретных и частных примеров к более общему знанию.

» показать, как сложные проблемы можно разложить на части

Выбор тем, затронутых в этой книге, основан на моих собственных научных интересах, а также отражает реальные проблемы, которые я наблюдал в течение многих лет как практик робототехники и компьютерного зрения. Я хочу 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 движения, визуальную одометрию и поиск изображений. Мы также рассматриваем неперспективную визуализацию с использованием объективов типа «рыбий глаз», катадиоптрической оптики и новых камер светового поля. Эти темы становятся все более важными для робототехники, но обычно не освещаются в массовой литературе. Зрение – это мощный источник сенсорной информации, и робототехники должны хорошо разбираться в основах его работы.

» программное обеспечение является важнейшей частью этой книги

Эта книга не похожа на другие учебники, и это сделано намеренно. Во-первых, программное обеспечение является важнейшей частью книги. Программное обеспечение – это осязаемая реализация описанных алгоритмов. Его можно прочитать, его можно разобрать, изменить и снова собрать. 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 700 примеров в этой книге иллюстрируют, как можно использовать программное обеспечение Toolbox, и, как правило, обеспечивают мгновенный результат спустя всего пару строк кода MATLAB.

» мгновенный результат спустя всего пару строк кода  
MATLAB

Во-вторых, построение книги на основе MATLAB и Toolbox означает, что мы можем решать более реалистичные и более сложные задачи, чем в других книгах.

» эта книга предполагает комплексный подход

Акцент на программном обеспечении и примерах не означает, что строгость и теория не важны – они очень важны, но эта книга предполагает комплексный подход. Ее лучше всего читать в сочетании 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. Я старался дать читателям необходимое и достаточно развернутое математическое обоснование каждой темы, но, если вам нужна глубокая и строгая математика, возможно, эта книга не для вас.

Набор инструментов также включает в себя отличное программное обеспечение с открытым исходным кодом, и я благодарен за следующий код, который был включен в набор инструментов машинного зрения: RANSAC Питера Ковеси; оценку пространственного положения сделал Франческо Морено-Ногер, Винсент Лепети и Паскаль Фуа; преобразование цветового пространства выполнил Паскаль Гетройер; числовые процедуры для геометрического зрения разработаны различными членами группы визуальной геометрии в Оксфорде (с веб-сайта книги Хартли и Зиссермана, 2003 г.); алгоритмы k-means, SIFT и MSER заимствованы из замечательного пакета VLFeat (vlfeat.org) Андреа Ведальди и Брайана Фулкерсона; программное обеспечение для сегментации изображений на основе графов разработал Педро Фельзеншвальб; также был использован детектор признаков OpenSURF Дирка-Яна Кроона и набор инструментов для калибровки камеры Жан-Ива Буге.

Работая над этой книгой, я был очарован математиками, учеными и инженерами, чьи труды сотни лет назад легли в основу современной науки о роботизированном зрении. Некоторые

имена стали прилагательными, например гауссов, лапласов или декартов, или существительными, такими как якобиан. 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.

В моей собственной карьере мне посчастливилось работать со многими замечательными людьми, которые вдохновляли и направляли меня. Давным-давно в Мельбурнском университете Джон Андерсон пробудил во мне интерес к управлению роботами, а Грэм Холмс с переменным успехом пытался заставить меня «думать, прежде чем писать код». В начале пути я провел десять месяцев, изменивших направление моей жизни, работая с Ричардом (Лу) Полом в лаборатории GRASP Пенсильванского университета в период с 1988 по 1989 г. Разработка инструментария Toolbox легла в основу докторской диссертации (1991–1994), и мои консультанты Малкольм Гуд (Мельбурнский университет) и Пол Данн (CSIRO) задавали мне хорошие вопросы и руководили моими исследованиями. Ласло Немес (CSIRO) поделился мудростью о жизни и способах организации исследований и надоумил меня опубликовать открытый исходный код моего программного обеспечения. Большая часть моей карьеры прошла в CSIRO, где у меня была привилегия и возможность работать над разнообразными реальными проектами в области робототехники и технического зрения, а также сотрудничать с действительно талантливыми коллегами и друзьями. На пути к написанию первого издания я присоединился к Технологическому университету Квинсленда, который выделил время для завершения этой работы, а в 2015 г. ушел в творческий отпуск, чтобы закончить второе издание.

Многие люди помогали мне в моем начинании, и я благодарен им. На период работы над книгой меня щедро поддерживали Пол Ньюман в Оксфорде (оба издания) и Даниэла Рус в Массачусетском технологическом институте (первое издание). Даниэла, Поль и Седрик Прадалье внесли конструктивные предложения и комментарии по первым наброскам этого издания. В работе над вторым изданием мне помогли комментарии к черновикам глав, которые предоставили Тим Барфут, Дмитрий Братанов, Дункан Кэмпбелл, Дональд Дансеро, Том Драммонд, Малкольм Гуд, Питер Куджала, Обадия Лам, Йорн Мальзан, Фелипе Насименто Мартинс, Аджай Пандей, Седрик Прадалье, Дэн Ричардс, Даниэла Рус, Сарех Ширази, Сурья Сингх, Райан Смит, Бен Талбот, Дориан Цай и Бен Апкрофт. Я благодарен за мудрые советы о содержании книги, которые мне дали Франсуа Шометт, Дональд Дансеро, Кевин Линч, Роберт Махони и Фрэнк Парк.

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.

Второе издание было написано при финансовой поддержке гранта платформы EPSRC EP/M019918/1, гранта научно-технического факультета QUT, премии вице-канцлера QUT, кафедры робототехнических систем QUT и Центра передового опыта ARC в области робототехнического зрения (грант CE140100016).

Во время работы над обоими изданиями я получил замечательную помощь от авторской программы MathWorks и издательства Springer. Мой редактор Springer Томас Дитцингер оказал большую поддержку этому проекту, а Армин Сташ, с его огромным терпением и самоотверженностью в верстке и наборе текста, превратил мои неаккуратные наброски в нечто прекрасное.

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.

Питер Корк,  
Брисбен, Квинсленд,  
август 2018 г.



---

## Примечание ко второму изданию

Принцип доработки заключался в том, чтобы сохранить в книге хорошее (стиль повествования, приоритет кода, мягкая ламинарированная обложка) и устранить плохое (ошибки и пропущенные темы). Ошибок было больше, чем мне бы хотелось, и я благодарю всех, кто прислал исправления и предложил улучшения.

Первое издание было написано до того, как я начал преподавать в университете или создал МООС, что противоречит тому, как обычно пишутся книги. Подготовка к преподаванию дала мне понимание того, как лучше изложить некоторые темы, особенно связанные с представлением поз, кинематикой и динамикой роботов, поэтому описания были соответствующим образом скорректированы.

Добавления включают матричную экспоненциальную запись; основы теории винтов и алгебры Ли; инерциальную навигацию; дифференциальное управление и всенаправленных мобильных роботов; более глубокую обработку систем SLAM, включая сопоставление сканирования и графов поз; более широкое использование компьютерной алгебры MATLAB; оперативный контроль пространства; более глубокое рассмотрение динамики и управления манипулятором; визуальный SLAM и визуальную одометрию; структурированный свет и светосильные камеры.

В первом издании я избегал алгебры Ли, матричных экспонент и кручений, но теперь считаю важным осветить их. Темы глубоко математические, и я попытался найти золотую середину между жесткой алгебраической топологией и подходом большинства других книг к описанию только однородных преобразований, оставаясь при этом верным общему подходу этой книги.

Все сгенерированные MATLAB рисунки были обновлены, чтобы отразить последние улучшения графики MATLAB, и все примеры кода были обновлены и протестированы в соответствии с актуальными требованиями и доступны в виде MATLAB Live Scripts.

Второму изданию книги соответствуют новые базовые версии моих наборов инструментов: Robotics Toolbox (выпуск 10) и Machine Vision Toolbox (выпуск 4). Эти более новые версии наборов инструментов имеют некоторые незначительные не-

совместимости с предыдущими выпусками наборов инструментов и, следовательно, также с примерами кода в первом издании книги.

---

## Примечание к этому изданию

Эта книга, изданная в виде самостоятельного тома, по существу, является частями I и IV второго издания книги «Робототехника, зрение и управление». Часть IV предыдущей версии книги была переработана и разделена на две части, а содержание, относящееся к робототехнике и управлению на основе зрения, было исключено.

# Специальные обозначения

К сожалению, в книгах и научных статьях, посвященных роботизированному зрению, нет единообразия, и применяемые в них символы и обозначения могут значительно различаться. Символы, используемые в этой книге, и их единицы измерения, где это уместно, перечислены ниже. Некоторые символы имеют несколько значений, и для устранения неоднозначности следует четко понимать контекст, в котором они применяются.

Обозначение	Описание
$x^*$	желаемое значение $x$
$\hat{x}$	спрогнозированное значение $x$
$x^o$	измеренное или наблюдаемое значение $x$
$\hat{x}$	ожидаемое значение $x$
$\bar{x}$	среднее по $x$ или относительное значение
$x(k)$	$k$ -й элемент временного ряда
$\boldsymbol{v}$	вектор
$\hat{\boldsymbol{v}}$	единичный вектор, параллельный $\boldsymbol{v}$
$\tilde{\boldsymbol{v}}$	однородное представление вектора $\boldsymbol{v}$
$v[i]$	$i$ -й элемент вектора $\boldsymbol{v}$
$v_x$	компонент вектора
$\boldsymbol{A}$	матрица
$\boldsymbol{A}[i,j]$	элемент $(i,j)$ матрицы $\boldsymbol{A}$
$\boldsymbol{A}_{ij}$	элемент $(i,j)$ матрицы $\boldsymbol{A}$
$f(x)$	функция от $x$
$F_x(x)$	производная $\partial f/\partial x$
$F_{xy}(x,y)$	производная $\partial^2 f/\partial x \partial y$
$\hat{q}$	единичный кватернион $\hat{q} \in \mathbb{S}^3$
$\mathbf{0}_{m \times n}$	матрица нулей $m \times n$
$\mathbf{1}_{m \times n}$	матрица единиц $m \times n$

Символ	Описание	Единица
$\mathbf{C}$	матрица камеры, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$	
$E$	освещенность (люкс)	лк
$f$	фокусное расстояние	м
$\mathbf{f}$	вектор признаков изображения	
$\mathbb{H}$	множество всех кватернионов ( $\mathbb{H}$ происходит от Гамильтона)	
$I_{n \times n}$	единичная матрица $n \times n$ , матрица тождественности	
$\mathbf{J}$	матрица Якоби, якобиан	
${}^A\mathbf{J}_B$	преобразованная по Якоби скорость в системе координат $B$ по отношению к системе $A$	
$k, K$	константа	
$\mathbf{K}$	калибровочная матрица камеры	
$L$	яркость (нит, 1 нт = 1 кд/1 м <sup>2</sup> )	нт
$N(\mu, \sigma^2)$	нормальное (гауссово) распределение со средним $\mu$ и стандартным отклонением $\sigma$	
$\mathbf{p}$	точка в плоскости изображения, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^2$	
$P$	мировая точка	
$\mathbb{P}^2$	проективное пространство всех двумерных точек, 3-кортеж	
$\mathbb{P}^3$	проективное пространство всех трехмерных точек, 4-кортеж	
$\mathbf{q}$	обобщенные (лагранжевы) координаты, конфигурация $\mathbf{q} \in \mathcal{C}$	м, рад
$\mathbf{R}$	ортонормальная матрица вращения, $\mathbf{R} \in \mathbf{SO}(2)$ или $\mathbf{SO}(3)$	
$\mathbb{R}$	множество вещественных чисел	
$\mathbb{R}^2$	множество всех точек в двумерном пространстве	
$\mathbb{R}^3$	множество всех точек в трехмерном пространстве	
$S^1$	единичная окружность, множество углов $[0, 2\pi)$	
$S^n$	единичная сфера, вписанная в $\mathbb{R}^{n+1}$	
$\mathbf{se}(n)$	алгебра Ли для $\mathbf{SE}(n)$ , $\mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ -дополненная кососимметричная матрица	
$\mathbf{so}(n)$	алгебра Ли для $\mathbf{SO}(n)$ , кососимметричная матрица $\mathbb{R}^{n \times n}$	
$\mathbf{SE}(n)$	особая евклидова группа, множество всех положений в $n$ измерениях, представленное гомогенной матрицей преобразования $\mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$	
$\mathbf{SO}(n)$	особая ортогональная группа, множество всех ориентаций в $n$ измерениях, представленное ортогональной матрицей $\mathbb{R}^{n \times n}$	
$\mathbf{S}$	скручивание в трех измерениях, $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^6$	
$t$	время	с
$T$	температура	К
$\mathcal{T}$	оптическая прозрачность, светопропускание	м <sup>-1</sup>
${}^A\mathbf{T}_B$	гомогенное преобразование, представленное системой координат $\{B\}$ по отношению к системе $\{A\}$ . Если $A$ не дано, система рассматривается относительно точки 0 мировой системы координат	
$u, v$	координаты на плоскости изображения камеры	пиксели
$u_0, v_0$	координаты главной точки	пиксели
$\bar{u}, \bar{v}$	нормализованные координаты плоскости изображения относительно главной точки	м
$v$	скорость	м/с
$\mathbf{v}$	вектор скорости	м/с
$X, Y, Z$	декартовы координаты	
$\bar{x}, \bar{y}$	нормализованные координаты плоскости изображения	
$\mathbb{Z}$	множество всех целых чисел	
$\mathbb{Z}^+$	множество всех целых чисел больше нуля	

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)