

**УДК 004.8**  
**ББК 32.81**  
**К48**

**К48 Рейнхард Клетте**

Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы / пер. с англ. А. А. Слинкин. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 506 с.: ил.

**ISBN 978-5-97060-702-2**

В этой книге рассмотрены основные аспекты компьютерного зрения: обработка и анализ изображений, анализ плотного движения, сегментация изображений, работа с камерами, трехмерная реконструкция, сопоставление стереоизображений, обнаружение объектов и др. Материал дополняется историческими справками, рекомендациями по дальнейшему чтению и сведениями о рассматриваемых математических понятиях. В конце каждой главы имеются проверенные на практике упражнения и вопросы на понимание материала.

Издание предназначено широкому кругу специалистов по анализу данных и изображений, а также может использоваться в качестве учебника для студентов старших курсов и для самообразования.

**УДК 004.8**  
**ББК 32.81**

First published in English under the title Concise Computer Vision; Copyright © Springer-Verlag London, 2014. This edition has been translated and published under licence from Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature. Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the translation. © 2019 by DMK Press. All rights reserved.

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.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-1-4471-6319-0 (англ.)  
 ISBN 978-5-97060-702-2 (рус.)

© Springer-Verlag London, 2014  
 © Оформление, перевод на русский язык, издание,  
 ДМК Пресс, 2019

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>11</b>
Предмет книги	11
Характер изложения	11
Целевая аудитория	12
Использование материала на практике	12
Замечания для преподавателя и рекомендуемый порядок использования книги	13
Дополнительные ресурсы	13
Благодарности (в алфавитном порядке по фамилии)	13
<b>Обозначения</b>	<b>16</b>
<b>Глава 1. Данные изображения</b>	<b>18</b>
1.1. Изображения в пространственной области	18
1.1.1. Пиксели и окна	19
1.1.2. Значения и основные статистики изображения	21
1.1.3. Пространственные и временные меры данных	26
1.1.4. Ступенчато-граничная модель	29
1.2. Изображения в частотной области	34
1.2.1. Дискретное преобразование Фурье	34
1.2.2. Обратное дискретное преобразование Фурье	35
1.2.3. Комплексная плоскость	37
1.2.4. Данные изображения в частотной области	39
1.2.5. Фазово-конгруэнтная модель признаков изображения	44
1.3. Цвет и цветные изображения	47
1.3.1. Определения цвета	49
1.3.2. Цветовое восприятие, дефекты зрения и уровни серого	51
1.3.3. Представления цвета	56
1.4. Упражнения	61
1.4.1. Упражнения по программированию	61
1.4.2. Упражнения, не требующие программирования	64
<b>Глава 2. Обработка изображений</b>	<b>65</b>
2.1. Точечные, локальные и глобальные операторы	65
2.1.1. Градационные функции	65
2.1.2. Локальные операторы	68
2.1.3. Фильтрация Фурье	71
2.2. Три процедурных компонента	75
2.2.1. Интегральные изображения	75
2.2.2. Регулярные пирамиды изображений	76
2.2.3. Порядок обхода	78

2.3. Классы локальных операторов .....	80
2.3.1. Сглаживание .....	80
2.3.2. Повышение резкости .....	85
2.3.3. Простые детекторы границ .....	86
2.3.4. Простые детекторы углов .....	91
2.3.5. Удаление артефактов освещения .....	95
2.4. Более сложные детекторы границ .....	98
2.4.1. LoG и DoG и их пространства масштабов .....	98
2.4.2. Встроенная уверенность .....	103
2.4.3. Алгоритм Ковеси .....	107
2.5. Упражнения .....	113
2.5.1. Упражнения по программированию .....	113
2.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	115
<b>Глава 3. Анализ изображений .....</b>	<b>117</b>
3.1. Основы топологии изображений .....	117
3.1.1. 4- и 8-смежность в бинарных изображениях .....	118
3.1.2. Топологически непротиворечивая смежность пикселей .....	123
3.1.3. Трассировка краев .....	126
3.2. Анализ двумерных геометрических фигур .....	130
3.2.1. Площадь .....	130
3.2.2. Длина .....	133
3.2.3. Кривизна .....	136
3.2.4. Дистанционное преобразование .....	140
3.3. Анализ значений изображения .....	147
3.3.1. Матрицы совместной встречаемости и метрики .....	148
3.3.2. Анализ участков с привлечением моментов .....	151
3.4. Поиск прямых и окружностей .....	153
3.4.1. Прямые .....	153
3.4.2. Окружности .....	160
3.5. Упражнения .....	162
3.5.1. Упражнения по программированию .....	162
3.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	167
<b>Глава 4. Анализ плотного движения .....</b>	<b>169</b>
4.1. 3D-движение и двумерный оптический поток .....	169
4.1.1. Локальное смещение и оптический поток .....	169
4.1.2. Проблема апертуры и градиентный поток .....	173
4.2. Алгоритм Хорна–Шанка .....	175
4.2.1. Подготовительная часть .....	175
4.2.2. Алгоритм .....	183
4.3. Алгоритм Лукаса–Канаде .....	187
4.3.1. Линейное решение методом наименьших квадратов .....	188
4.3.2. Оригинальный алгоритм и алгоритм с весами .....	191

4.4. Алгоритм BBPW .....	193
4.4.1. Исходные предположения и функция энергии.....	193
4.4.2. Краткое описание алгоритма .....	195
4.5. Оценка качества алгоритмов вычисления оптического потока .....	197
4.5.1. Стратегии тестирования .....	197
4.5.2. Меры ошибки для сравнения с контрольными данными.....	200
4.6. Упражнения .....	202
4.6.1. Упражнения по программированию.....	202
4.6.2. Упражнения, не требующие программирования .....	204
<b>Глава 5. Сегментация изображений .....</b>	<b>206</b>
5.1. Простые примеры сегментации изображений .....	207
5.1.1. Бинаризация изображения.....	209
5.1.2. Сегментация путем выращивания семян.....	212
5.2. Сегментация методом сдвига среднего.....	218
5.2.1. Примеры и подготовка .....	218
5.2.2. Модель сдвига среднего .....	221
5.2.3. Алгоритмы и оптимизация по времени.....	224
5.3. Сегментация изображений как задача оптимизации .....	230
5.3.1. Метки, пометка и минимизация энергии.....	231
5.3.2. Примеры членов данных и гладкости.....	234
5.3.3. Передача сообщений.....	237
5.3.4. Алгоритм распространения доверия .....	239
5.3.5. Распространение доверия в задаче о сегментации изображений.....	245
5.4. Сегментация видео и прослеживание сегментов.....	247
5.4.1. Использование согласованности признаков изображений.....	248
5.4.2. Использование временной согласованности .....	249
5.5. Упражнения .....	254
5.5.1. Упражнения по программированию.....	254
5.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	257
<b>Глава 6. Камеры, координаты и калибровка .....</b>	<b>262</b>
6.1. Камеры .....	263
6.1.1. Свойства цифровой камеры .....	263
6.1.2. Центральная проекция.....	268
6.1.3. Система с двумя камерами.....	271
6.1.4. Системы панорамных камер.....	273
6.2. Координаты .....	276
6.2.1. Мировые координаты.....	276
6.2.2. Однородные координаты .....	279
6.3. Калибровка камеры .....	281
6.3.1. Калибровка камеры с точки зрения пользователя.....	282
6.3.2. Ректификация пар стереоизображений.....	286
6.4. Упражнения .....	292

6.4.1. Упражнения по программированию.....	292
6.4.2. Упражнения, не требующие программирования.....	294
<b>Глава 7. Трехмерная реконструкция .....</b>	<b>296</b>
7.1. Поверхности .....	296
7.1.1. Топология поверхности .....	297
7.1.2. Локальные параметризации поверхности .....	301
7.1.3. Кривизна поверхности .....	304
7.2. Структурная подсветка.....	308
7.2.1. Проекция световой плоскости.....	308
7.2.2. Анализ световой плоскости .....	311
7.3. Стереоскопическое зрение.....	314
7.3.1. Эпиполярная геометрия .....	314
7.3.2. Бинокулярное зрение в канонической геометрии стереоскопической системы.....	316
7.3.3. Бинокулярное зрение в конвергентной системе .....	319
7.4. Фотометрический метод анализа стереоизображений.....	324
7.4.1. Ламбертовская отражательная способность.....	325
7.4.2. Восстановление градиентов поверхности.....	327
7.4.3. Интегрирование градиентных полей.....	331
7.5. Упражнения.....	340
7.5.1. Упражнения по программированию .....	340
7.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	343
<b>Глава 8. Сопоставление стереоизображений .....</b>	<b>345</b>
8.1. Сопоставление, стоимость данных и уверенность.....	346
8.1.1. Общая модель сопоставления.....	347
8.1.2. Функции стоимости данных .....	351
8.1.3. От глобального сопоставления к локальному.....	354
8.1.4. Тестирование функций стоимости данных.....	358
8.1.5. Меры уверенности.....	360
8.2. Сопоставление методом динамического программирования .....	362
8.2.1. Динамическое программирование .....	363
8.2.2. Ограничение порядка.....	364
8.2.3. Сопоставление методом динамического программирования с использованием ограничения порядка .....	367
8.2.4. Алгоритм DPM с ограничением гладкости .....	373
8.3. Сопоставление методом распространения доверия.....	379
8.4. Техника третьего глаза.....	382
8.4.1. Построение виртуального изображения, снятого третьей камерой.....	383
8.4.2. Сходство между виртуальным и третьим изображениями .....	388
8.5. Упражнения .....	391
8.5.1. Упражнения по программированию.....	391
8.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	393

<b>Глава 9. Обнаружение и отслеживание признаков .....</b>	<b>396</b>
9.1. Инвариантность, признаки и множества признаков .....	396
9.1.1. Инвариантность.....	396
9.1.2. Особые точки и векторы трехмерного потока .....	398
9.1.3. Множества особых точек в соседних кадрах.....	402
9.2. Примеры признаков .....	407
9.2.1. SIFT-признаки .....	407
9.2.2. SURF-признаки .....	410
9.2.3. ORB-признаки .....	411
9.2.4. Оценка признаков.....	414
9.3. Отслеживание и обновление признаков .....	417
9.3.1. Отслеживание – задача разреженного соответствия.....	419
9.3.2. Отслеживатель Лукаса–Канаде.....	420
9.3.3. Фильтр частиц.....	426
9.3.4. Фильтр Калмана .....	435
9.4. Упражнения .....	442
9.4.1. Упражнения по программированию.....	442
9.4.2. Упражнения, не требующие программирования .....	447
<b>Глава 10. Обнаружение объектов.....</b>	<b>449</b>
10.1. Локализация, классификация и оценка .....	449
10.1.1. Дескрипторы, классификаторы и обучение .....	450
10.1.2. Качество детекторов объектов.....	456
10.1.3. Гистограмма ориентированных градиентов .....	458
10.1.4. Вейвлеты и признаки Хаара.....	460
10.1.5. Метод Виолы–Джонса.....	464
10.2. AdaBoost.....	467
10.2.1. Алгоритм .....	468
10.2.2. Параметры .....	470
10.2.3. Почему именно такие параметры?.....	474
10.3. Случайные решающие леса .....	476
10.3.1. Энтропия и информационный выигрыш .....	476
10.3.2. Применение леса .....	479
10.3.3. Обучение леса.....	481
10.3.4. Леса Хафа.....	486
10.4. Обнаружение пешеходов.....	488
10.5. Упражнения.....	491
10.5.1. Упражнения по программированию .....	491
10.5.2. Упражнения, не требующие программирования .....	493
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>495</b>