

Оглавление

Введение.....	1
Глава 1. Изображения и помехи.....	5
1.1. Объекты реального мира и их свойства.....	5
1.2. Двумерная растровая модель изображения сцен и составляющих их объектов.....	6
1.3. Векторная модель представления двумерных изображений.....	8
1.4. Виды изображений.....	10
1.5. Модели изображений.....	15
1.6. Пространственные спектры изображений.....	16
1.7. Спектральные интенсивности изображений.....	18
1.8. Функции автоковариации изображений.....	22
1.9. Плотность вероятности распределения яркости в изображениях.....	26
1.10. Коэффициент автокорреляции оболочек трехмерных объектов.....	30
Вывод формулы для коэффициента автокорреляции оболочек трехмерных объектов.....	32
Приближенный способ измерения коэффициентов автокорреляции оболочек трехмерных объектов.....	32
Зависимость коэффициента автокорреляции оболочек от угла θ	35
Зависимость коэффициента автокорреляции оболочек от их взаимного смещения вдоль оси z на величину ζ	36
1.11. Гистограммы оболочек реальных трехмерных изображений.....	36
1.12. Характеристики цвета.....	37
1.13. Помехи и их статистические характеристики.....	39
1.14. Источники флуктуационного шума в цифровых фото- и видеокамерах на ПЗС.....	44
1.15. Модель флуктуационного шума матрицы ПЗС.....	46
1.16. Технология маркирования изображений.....	47
Глава 2. Воспроизведение цвета на изображениях и управление цветом.....	49
2.1. Аксиомы Грассмана и законы смешения цветов.....	49
Опыты по уравниванию цветов.....	49
Аксиомы уравнивания цветов.....	51
2.2. Принципы построения колориметрической системы.....	52
2.3. Колориметрическая система RGB.....	55

2.4. Колориметрическая система XYZ.....	58
2.5. Цветовые расчеты в колориметрической системе XYZ.....	61
Определение цвета смеси двух цветов, заданных координатами цвета	62
Определение цвета смеси трех цветов, заданных цветовыми коэффициентами.....	62
Определение цвета смеси трех цветов, заданных координатами цветностей и величинами яркостей	63
Определение доминирующей длины волны и чистоты цвета	63
2.6. Цветовая температура.....	65
2.7. Другие колориметрические системы	66
Колориметрическая система Манселла.....	66
Колориметрическая система Мак-Адама.....	67
Колориметрическая система $L^*a^*b^*$	68
Колориметрические системы HLS и HSB.....	69
Колориметрические системы CMY и CMYK.....	69
2.8. Вывод на экран и печать цветных изображений.....	70
2.9. Управление цветом, калибровка, основы систем CMS	74
2.10. Баланс белого	77
Автоматический способ установки баланса белого.....	78
Способ с использованием ручной предустановки	79
Ручная установка баланса белого	79
2.11. Каналы, слои и изображения с прозрачным фоном	79
Каналы.....	79
Изобразительные слои изображения	80
Изображения с прозрачным фоном	81
Цветовая обработка изображения в области, ограниченной произвольным контуром.....	81
2.12. Работа с цветом в графических редакторах	82
Глава 3. Зрительная система и восприятие изображений	85
3.1. Проблема оценки качества воспроизведения изображений	85
3.2. Краткие сведения о строении зрительной системы.....	88
Оптика глаза.....	88
3.3. Адаптация зрительной системы к освещенности и контрастная чувствительность	92
3.4. Разрешающая способность зрительной системы в пространстве (острота зрения)	97
3.5. Инерционность зрения	101
3.6. Восприятие движения.....	104
3.7. Восприятие цвета	104
3.8. Восприятие объема	108
3.9. Обнаружение и опознавание изображений объектов в пороговых условиях наблюдения	109

3.10. Функциональные модели зрительной системы.....	111
3.11. Обобщенная функциональная модель зрительной системы.....	113
3.12. Особенности восприятия семантических изображений зрительной системой человека.....	120
3.13. Методы оценки качества воспроизведения изображений	127
3.14. Корреляционно-энергетический критерий качества изображения, кодированного по стандарту MPEG-2	129
Глава 4. Оцифровка изображений.....	133
4.1. Представление изображений в памяти компьютера.....	133
4.2. Теорема Котельникова	134
4.3. Помеха пространственной дискретизации	137
4.4. Метод уменьшения помехи пространственной дискретизации	143
4.5. Структуры расположения отсчетов при дискретизации изображений.....	146
4.6. Интерполяция при воспроизведении изображений	149
4.7. Квантование изображений по яркости.....	150
4.8. Ложные контуры и методы их ослабления	154
4.9. Моды представления изображений.....	156
4.10. Контраст, детальность, разрешение принтера и частота пространственной дискретизации	157
4.11. Сканеры.....	159
4.12. Цифровые фото- и видеокамеры	161
Глава 5. Линейная фильтрация изображений	163
5.1. Цели применения линейной фильтрации изображений.....	163
5.2. Метод фильтрации цифровых изображений путем их свертки с импульсной характеристикой	164
5.3. Метод фильтрации цифровых изображений в спектральной области	169
5.4. Апертурные искажения изображений.....	171
Апертурные искажения, обусловленные неточной фокусировкой оптической системы.....	171
Апертурные искажения изображения, обусловленные смазом вследствие недостаточно короткой экспозиции при съемке движущегося объекта	174
Апертурные искажения изображения, обусловленные несовершенством преобразователей изображения в сигнал	176
Апертурные искажения изображения, обусловленные несовершенством воспроизводящих устройств.....	178
Искажения, обусловленные турбулентностью атмосферы	178
5.5. Фильтрация изображений, искаженных гауссовым белым шумом	179
5.6. Коррекция апертурных искажений в изображениях при наличии шума	183
5.7. Принципы обработки изображений, основанные на учете особенностей их восприятия зрительной системой.....	189

5.8. Ослабление шума на изображениях методом адаптивной анизотропной фильтрации	191
5.9. Фильтрация изображений в ограниченной пространственной области	195
5.10. Подчеркивание световых границ на изображениях	197
5.11. Метод нерезкого маскирования	198
5.12. Другие линейные методы подчеркивания границ на изображениях	202
5.13. Ослабление дефектов изображения путем размытия	205
5.14. Пределы увеличения разрешения	206
5.15. Линейная фильтрация изображений в графических редакторах	211
Глава 6. Нелинейная обработка изображений	215
6.1. Искажения воспроизведения градаций яркости	215
Фотоматериалы	216
Преобразователи изображения в видеосигнал	217
Воспроизводящие устройства	217
6.2. Коррекция искажений воспроизведения градаций яркости	218
6.3. Видоизменение гистограмм	220
6.4. Методы согласования динамического диапазона изображений с динамическим диапазоном дисплея	222
6.5. Проблема разрежения шкалы квантования при коррекции световых характеристик	230
6.6. Тоновая коррекция	233
6.7. Фотографирование сцен с большим динамическим диапазоном яркостей	234
6.8. Методы отображения сцен с большим динамическим диапазоном яркостей на дисплеях с ограниченным динамическим диапазоном	237
6.9. Билатеральная фильтрация изображений	241
Применение билатеральной фильтрации для улучшения воспроизведения небольших малоконтрастных деталей на изображениях сцен с большим динамическим диапазоном на носителях, у которых динамический диапазон сравнительно невелик	244
Применение билатеральной фильтрации для ослабления заметности ложных контуров на проквантованном изображении	245
Применение билатеральной фильтрации для ослабления заметности гауссова шума на изображении	246
Применение билатеральной фильтрации для выделения текстур из изображений	247
6.10. Методы коррекции апертурных искажений изображений, основанные на использовании их семантической структуры	248
6.11. Гомоморфная фильтрация изображений	253
6.12. Ослабление искажений фотокопии, обусловленных неравномерностью освещенности поверхности фотографируемого оригинала	256
6.13. Медианная и ранговая фильтрация изображений	259
6.14. Адаптивная медианная фильтрация изображений	263

6.15. Некоторые другие виды нелинейной фильтрации изображений	267
Среднегеометрический фильтр	267
Среднегармонический фильтр	267
Контргармонический фильтр	268
6.16. Методы фильтрации гауссова шума, основанные на учете особенностей восприятия семантических изображений зрительной системой	268
Метод, базирующийся на использовании кусочно-гладкой модели изображения	269
Метод, базирующийся на регенерации контурных, градиентных и фактурных компонентов	272
6.17. Нелинейные преобразования изображений в области, ограниченной произвольным контуром	276
6.18. Методы нелинейной обработки изображений в графических редакторах	277
Глава 7. Геометрические преобразования изображений	281
7.1. Геометрические искажения изображений	281
7.2. Аффинные преобразования изображений	282
Сдвиг изображения	283
Поворот изображения относительно начала координат	283
Изменение масштаба изображения	284
7.3. Дисторсия и методы ее коррекции	285
7.4. Перспективные искажения изображений и их коррекция	287
7.5. Коррекция геометрических искажений изображений в общем случае	289
7.6. Метод определения функций, описывающих геометрические искажения	292
7.7. Наложение текстуры на полигональную оболочку объекта	293
7.8. Увеличение изображений	296
Интерполяция нулевого порядка	296
Билинейная интерполяция	299
Бикубическая интерполяция	300
Интерполяция посредством функций $\sin x/x$	302
7.9. Метод триангуляции	304
7.10. Уменьшение изображений	306
7.11. Интерполяция при использовании матриц Байера	308
Глава 8. Морфологические операции и их применение	315
8.1. Морфологические операции	315
8.2. Бинарные изображения и их характеристики	315
8.3. Логические операции над бинарными изображениями	317
8.4. Понятие связности	318
8.5. Логическая апертура	320
8.6. Морфологические операции дилатации и эрозии бинарных изображений	322
8.7. Использование шаблонов при выполнении морфологических операций	326

8.8. Морфологические операции бинарного открытия и бинарного закрытия.....	329
8.9. Морфологические операции утончения и утолщения бинарных изображений.....	333
8.10. Морфологические операции: усечение, мост и удаление центрального пиксела в конфигурациях с <i>H</i> -связностью бинарных изображений.....	335
8.11. Заполнение (заливка) областей бинарных изображений.....	339
8.12. Построение скелета объекта на бинарном изображении.....	340
8.13. Производные морфологические операции над бинарными изображениями.....	341
8.14. Использование "интегральных" шаблонов при выполнении морфологических операций над бинарными изображениями.....	343
8.15. Морфологические операции дилатации, эрозии, открытия и закрытия полутоновых изображений.....	344
8.16. Морфологические операции <i>tophat</i> , <i>bothat</i> и морфологический градиент при фильтрации полутоновых изображений.....	347
8.17. Фильтрация полутоновых изображений посредством логической апертуры.....	350
Глава 9. Сегментация изображений.....	353
9.1. Сегментация изображений на отдельные области.....	353
9.2. Обнаружение на изображении точек и отрезков прямых линий.....	354
9.3. Обнаружение перепадов яркости на изображении.....	355
Перекрестный градиентный оператор Робертса.....	357
Градиентный оператор Превитта.....	358
Градиентный оператор Собела.....	358
9.4. Методы выделения контуров на изображениях.....	359
9.5. Метод сегментации путем связывания пирамиды.....	365
9.6. Пороговая обработка.....	368
9.7. Метод выращивания областей.....	370
9.8. Метод разделения и слияния областей.....	371
9.9. Метод сегментации на основе движения.....	372
9.10. Сегментация, основанная на применении морфологических операций эрозии и наращивания.....	374
9.11. Особенности сегментации изображений в случае, когда признак, по которому она выполняется, является векторной величиной.....	376
9.12. <i>K</i> -метод сегментации изображений.....	378
9.13. Сегментация изображений на основе статистических характеристик текстуры.....	378
9.14. Интерактивная сегментация изображений.....	380
9.15. Гранулометрия.....	383
9.16. Обнаружение и различение на изображении объектов известной формы.....	385

Глава 10. Объемные изображения	387
10.1. Стереоскопические изображения.....	387
Методы получения стереоизображений.....	390
Методы наблюдения стереоизображений.....	391
10.2. 2,5D-изображения.....	395
10.3. Воксельная модель представления трехмерных изображений.....	396
10.4. Векторная полигональная модель представления трехмерных изображений.....	398
10.5. Модель освещения.....	401
10.6. Определение нормали к поверхности и вектора отражения.....	403
10.7. Методы закраски граней.....	406
Метод Гуро.....	407
Метод Фонга.....	408
10.8. Трассировка лучей.....	408
Метод прямой трассировки лучей.....	408
Метод обратной трассировки лучей.....	409
10.9. Проекция трехмерных изображений на плоскость.....	410
10.10. 3D-сканеры.....	411
Контактный метод сканирования и реализующие его сканеры.....	412
Бесконтактные методы сканирования и реализующие их сканеры.....	412
10.11. Трехмерное сканирование, основанное на диффузном отражении света сканируемыми объектами.....	420
10.12. Определение координаты глубины по 2D-изображению.....	426
10.13. 3D-печать.....	431
10.14. Обработка оболочек трехмерных изображений.....	434
Глава 11. Цифровое видео и телевидение	439
11.1. Динамические изображения.....	439
11.2. Съемка исходного материала.....	440
11.3. Форматы растров цветных изображений.....	443
Формат 4:4:4.....	444
Формат 4:2:2.....	444
Формат 4:2:0.....	445
Формат 4:1:1.....	446
11.4. Элементы нелинейного монтажа.....	446
11.5. Разбивка видеоматериала на отдельные сцены.....	449
11.6. Создание переходов.....	450
11.7. Морфинг и варпинг.....	453
11.8. Принципы анимации.....	455
11.9. Спецэффекты.....	457
11.10. Цифровая запись видеоданных.....	460
11.11. Мобильное телевидение и видео.....	464

11.12. Объемное телевидение и видео	466
11.13. Виртуальные студии	468
11.14. Аппаратные средства и пакеты программ для работы с цифровым видео	470
Глава 12. Сжатие изображений без потерь информации	473
12.1. Проблема сжатия изображений	473
12.2. Избыточность изображений	474
12.3. Декорреляция сигнала изображения	477
12.4. Кодирование длин серий	478
12.5. Кодирование методом LZW	480
12.6. Метод кодирования Хаффмена	482
12.7. Арифметическое кодирование	484
12.8. Некоторые детали алгоритмов арифметического кодирования	488
Сжатие	488
Протяженность цепочек кодируемых символов	490
Адаптивное арифметическое кодирование	490
12.9. Разделение кодируемого сигнала изображения на контексты	491
12.10. Проблема накопления ошибок преобразования при сжатии изображений ...	494
12.11. Предварительная логическая фильтрация изображений для увеличения степени их сжатия кодерами без потерь информации	497
12.12. Экспериментальное исследование метода предварительной обработки изображений	498
12.13. Кодирование битовых плоскостей	502
Глава 13. Сжатие изображений с потерями информации	507
13.1. Дифференциальная кодово-импульсная модуляция	507
13.2. Кодирование с использованием ортогональных преобразований	510
13.3. Дискретное косинусное преобразование	514
13.4. Метод оптимального распределения двоичных единиц кода между спектральными коэффициентами	516
13.5. Сжатие изображений в формате JPEG	519
13.6. Вейвлет-преобразование	522
13.7. Сжатие изображений на основе вейвлет-преобразования	526
13.8. Сжатие изображений в формате JPEG 2000	530
13.9. Фрактальное кодирование	531
13.10. Сжатие изображений в формате MPEG-2	533
13.11. Определение векторов движения	536
13.12. Сжатие изображений в формате MPEG-4	538
13.13. Сжатие изображений в формате H.264	540
13.14. Метод сжатия, основанный на использовании 3D-моделей, для представления движущихся объектов на 2D-изображениях	541
13.15. Обзор форматов записи изображений	543

Глава 14. Виртуальная реальность	547
14.1. Виртуальная реальность и области ее применения	547
14.2. Объектно-ориентированный подход.....	548
14.3. Простейшие сцены в виртуальном мире	550
14.4. Более сложные сцены в виртуальном мире.....	553
14.5. Объекты, обеспечивающие путешествие в виртуальном мире	556
14.6. Объекты, обеспечивающие взаимодействие пользователя с объектами виртуального мира	559
14.7. Алгоритмические языки, применяемые в системах виртуальной реальности	564
14.8. Имитация искусственного интеллекта.....	565
14.9. Тренажеры	566
Тренажер NASA, имитирующий работу аэропортов.....	566
Тренажер, имитирующий взлет шаттла	567
Виртуальный тренажер бензопилы, основанный на принципе смешанной реальности	567
Тренажер "комната виртуальной реальности"	568
14.10. Компьютерные игры.....	568
14.11. Периферийные устройства.....	569
Шлем виртуальной реальности	569
Системы трекинга	570
Джойстик и руль автомобиля.....	570
Перчатки виртуальной реальности (VR Gloves)	570
Всенаправленная беговая дорожка	571
14.12. Методы записи движений человеческого тела	572
Заключение	575
Литература	577
Предметный указатель	589

Введение

В основу данной книги положены курсы лекций, поставленные и читаемые автором в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения, а также результаты научных исследований, выполненных автором и руководимым им коллективом в данной области за последние более чем 40 лет.

Эта книга, по мнению автора, отличается от других книг на аналогичную тему, в основном переводных, тремя особенностями:

- изложение материала ведется с учетом свойств получателя информации, как правило, это зрительная система человека;
- в одном контексте рассматривается обработка и отображение двумерных и трехмерных изображений;
- в книге наряду с уже ставшими классическими методами рассматриваются новейшие методы обработки изображений.

Впервые изображения в цифровой форме были переданы по трансокеанскому подводному кабелю между Лондоном и Нью-Йорком в начале 1920-х годов посредством системы "Бартлейн", однако интенсивное развитие методов цифровой обработки и передачи изображений начинается лишь с 60-х годов прошлого века [23]. Связано это с появлением и быстрым развитием вычислительной техники, которая в это время становится доступной. Первыми разработчиками и исследователями этой новой технологии стали специалисты, работающие в области прикладной математики, программирования и теории связи, что в значительной степени определило направление исследований. Если обратиться к наиболее значимым публикациям того времени, например, к [83], то легко заметить, что постановка задач была примерно такой. Имеется искаженное изображение, которое рассматривается как случайная функция двух переменных (координат) и не более, статистические характеристики которой известны. Требуется найти такое преобразование, в результате которого восстановленное изображение минимально бы отличалось от неискаженного изображения, считающегося известным. В качестве критерия отличия при этом принимался средний квадрат попиксельной разности изображений.

Чрезмерная упрощенность такого подхода, неизбежная на начальном этапе исследований, заключается в том, что при этом не учитываются ни свойства получателя

информации (как правило, это зрительная системы человека), ни важные для зрителя характеристики обрабатываемого изображения, например, свойства контурного компонента изображения, т. е. его гладкость, непрерывность и т. д. Отсутствие учета свойств получателя информации и характеристик изображений, важных для зрителя при таком подходе, не позволяет синтезировать оптимальные алгоритмы их обработки не только в системах, предназначенных для визуального наблюдения, но и в автоматических системах наблюдения, а это создает серьезные трудности для дальнейшего развития эффективных алгоритмов обработки изображений.

В отличие от такого подхода в предлагаемой книге изложение материала проводится применительно не к абстрактным двумерным массивам чисел, над которыми совершаются некоторые математические преобразования, как это часто практикуется при изложении подобных вопросов, а применительно к реальным семантическим изображениям, характеризуемым вполне определенными свойствами. При этом целью обработки является улучшение изображений в рамках того или иного критерия качества, полученного на основе модели зрения. Такой подход обусловил включение в книгу глав, посвященных описанию характеристик семантических изображений, зрительной системы человека и ее моделей, а также основных положений колориметрии. При изложении материала показаны имеющиеся ограничения в достижении результатов обработки, обусловленные самой природой используемых процессов.

В книге рассмотрен широкий круг вопросов, начиная от ввода изображений в память компьютера, их обработки и вывода либо на экран монитора, в случае мультимедиа и цифрового видео, либо на печать в случае полиграфии. Большое внимание уделено вопросам оцифровки изображений, вопросам сжатия, линейной и нелинейной обработкам, вопросам коррекции геометрических искажений, а также трехмерным изображениям.

В этой книге дается систематическое изложение теоретических основ цифровой, в основном компьютерной, обработки изображений с иллюстрацией их практического применения в наиболее популярных графических редакторах. Такой подход к теме позволяет не только сознательно использовать существующие методы цифровой обработки изображений, применяемые в графических редакторах, но и создавать новые, а также готовить квалифицированных специалистов в этой области.

Кроме того, в книге рассмотрены методы получения 3D-изображений путем сканирования трехмерных объектов, а также методы их обработки. Значительное внимание уделено практическому применению рассматриваемых методов в цифровом видео и системах виртуальной реальности. Это особенно актуально, поскольку в последнее время имеет место значительное усиление интереса к трехмерным кино и телевидению.

И, наконец, в данной книге приведено описание эффективных методов обработки изображений, развитых в самое последнее время, таких как:

- методы ослабления аддитивного гауссового шума на изображении путем его адаптивной фильтрации, основанной на учете свойств зрительной системы;

- методы фотографирования и отображения сцен с большим динамическим диапазоном яркости;
- методы интерполяции, применяемые при использовании матриц Байера;
- методы интерполяции, направленные на устранение ступенчатости границ на изображениях при их увеличении,

а также ряда других.

На протяжении всей книги изложение материала иллюстрируется практическими примерами обработки изображений посредством наиболее распространенных в нашей стране компьютеров IBM с использованием наиболее популярных графических редакторов.

Книга ориентирована на специалистов, работающих в области обработки изображений, аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Автор считает своим долгом поблагодарить Красильникову Ольгу Ивановну за участие в обсуждении и редактировании рукописи книги на этапе ее подготовки к изданию. Автор также выражает благодарность руководству Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и руководству Северо-западной академии государственной службы за активную поддержку издания книги.