

世界著名计算机教材精选

数字图像处理

Java语言算法描述

Wilhelm Burger Mark J. Burge 著

黄 华 等译



DIGITAL IMAGE PROCESSING

An Algorithmic Introduction Using Java

清华大学出版社

世界著名计算机教材精选

Digital Image Processing
An Algorithmic Introduction Using Java

数字图像处理
Java 语言算法描述

Wilhelm Burger
Mark J. Burge 著
黄 华 等译

清华大学出版社
北 京

English reprint edition copyright © 2010 by Springer-Verlag and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java by

Wilhelm Burger, Mark J. Burge, Copyright © 2008

All Rights Reserved.

This edition has been authorized by Springer-Verlag (Berlin/Heidelberg/New York) for sale in the People's Republic of China only and not for export therefrom.

本书翻译版由 Springer-Verlag 授权给清华大学出版社出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2009-3433 号

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理:Java 语言算法描述/(德)伯格(Burger, W.), (德)伯奇(Burge, M. J.)著;黄
华等译. —北京:清华大学出版社, 2010.2

(世界著名计算机教材精选)

书名原文: Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java

ISBN 978-7-302-21365-9

I. ①数… II. ①伯… ②伯… ③黄… III. ①C 语言—数字图像处理—程序设计

IV. ①TP391.41 ②TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 195535 号

责任编辑:龙啟铭

责任校对:徐俊伟

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:30

字 数:743 千字

版 次:2010 年 2 月第 1 版

印 次:2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:59.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。

联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:031590-01

译者序

自 1970 年以来,电荷耦合器件(CCD)和 CMOS 图像传感器被广泛应用于数字图像的采集。随着这些传感器分辨率水平的不断提高以及其消费价格的不断下降,曾经被认为是奢侈品的数码相机和摄像机已经成为普通消费电子产品,进入了寻常百姓的日常生活,以至于现在图像无处不在。

视觉是人类认知世界的最重要手段,研究表明,人类接受信息的 83% 来自视觉。数字图像处理作为计算机视觉、遥感图像处理与识别、医学图像处理、视频编码与处理、图像与视频检索等的基础知识,逐渐成为计算机科学与技术、信号与信息处理等相关专业的必修基础课程之一。

目前国内专科、本科到研究生都开设了数字图像处理的课程。数字图像处理涉及的范围广泛,因为授课对象、讲授内容的重点以及应用的不同,数字图像处理方面的教材很多,因此,选择一本合适的教材成为了难题。我认为,Wilhelm Burger 和 Mark J. Burge 编写的这本书是一本难得的好教材,因为它具有以下特点:

1. 内容全面。本书内容包含了图像文件格式、直方图、点操作、滤波器、边缘与轮廓、角点检测、简单曲线检测、形态学滤波、二值图像区域、彩色图像与色彩空间、傅立叶变换、DCT 变换、几何操作等图像处理的基础知识。

2. 容易理解。本书从实际应用和具体实现的角度出发,通俗易懂地讲解了各种图像处理的原理、数学表达,同时给出了简要的伪代码算法和完整的 Java 程序实现,伪代码算法和程序实现有助于算法原理的理解。

3. 练习得当。本书大多数章节后面都列有难易适当的练习题,完成这些练习题有助于掌握学习内容、加深理解并提高实际动手能力。

4. 使用 Java 作为编程语言。与 C++、C# 等相比,Java 具有平台无关性,只要计算机上有 Java 虚拟机,Java 编写的同一程序能够在任何操作系统上运行。随着 Linux 在国内的普及,Java 也必将得到普及。

本书特别适合作为计算机与信息技术类专业高年级本科生或者研究生的教材。同时,对涉及图像处理的相关研究者和开发人员来讲,本书也是一本非常有用的技术参考书。

感谢清华大学出版社对我的信任,将这样一本重要的国外教材交给我翻译。由于时间和能力的限制,有错误和不妥之处,敬请读者谅解并批评指正。

参加本书翻译和校对工作的还有肖学中、张洪超、何慧婷、赵茜、王振锐、付田楠和臧彧。谢谢他们!

前 言

本书对数字图像处理进行了较新的完整介绍。本书不仅适用于那些希望得到坚实基础的初学者,而且考虑到了那些希望了解重要技术的关键分析和现代应用的从业人员。这是原德文版本的第一个英文版本,该书已经被以下人员广泛使用。

- 以图像处理为工具的科学家和工程师,并且希望能深入理解,以便在自己的领域中对图像问题形成自己的解决方案。
- 需要自学该课程的信息技术(IT)专家,这些课程要包含能够简单地进行改编的代码和已经实现的例子,以便使他们能够立刻上手。
- 需要包含丰富实例的介绍性教科书的所有从业人员和学生,教科书要适合本科高年级学生或者研究生,并且包含丰富的、经过教学实际检验的练习、项目和实例。

虽然我们专注于实际应用和具体实现,但是我们并没有忽略重要的细节和数学理论,因为这些对算法更深一层的理解是必须的。

在着手写这本教科书的时候,我们有着这样一种考虑:简单的一本图像解决方案的书不足以给读者提供更深层的理解,不能使读者将这些技术应用到新的问题当中去。为此我们从以下三个方面逐步展开:数学表达式的形式、简要的伪代码算法和完整的 Java 程序。我们再用一个统一的记号将这三个方面联系在一起——这样,我们就针对这个问题及其解决方案给出了多个角度的考虑,并且它们之间又是互相关联的。

预备知识

我们没有将数字图像处理当作一门数学学科,也没有严格地按照信号处理的形式来介绍,而是从一个从业者和编程人员的角度出发,将其他教科书普遍应用的形式替换为读者更容易理解的构成方式。为了更好地使用本书的程序部分,读者需要具备一些基本的数据结构和面向对象编程的知识,最好是 Java。我们选择 Java 出于很多方面的考虑,其中之一是:Java 是很多学生在工科课程中学习的第一门编程语言。对于具有相关语言知识(比如 C 或者 C++)的从业者来说,本书中的示例程序是很容易理解和扩展的。

本书中的软件是基于 ImageJ 进行设计的。ImageJ 是一个广泛应用的、可扩展编程的图像软件系统,由德国国家卫生总局(NIH)^①的维恩·拉斯本德进行开发、维护和发布。ImageJ 完全用 Java 语言来实现,因此它可以在所有的主流平台上运行。它被广泛应用的另外一个原因是它基于插件的结构使得它能够很容易地进行扩展。我们对在 ImageJ 下运

^① <http://rsb.info.nih.gov/ij/>。

行的所有的示例都进行了专门的设计,以便能够简单地移植到其他的环境和程序语言中。

研究和开发中的应用

我们将本书特别设计为教科书,其中的练习和精心构造的示例补充了基本概念和技术的综合细节。作为从业者和开发者,我们知道,正确理解和应用经典技术所需的细节资料有时是非常难以找寻的,所以,我们精心提供了这些细节、多年收集到的实际应用的实例以及成功应用这些技术所必须的东西。这使得这本教材相对于研究和开发中的其他教材来说更加宝贵,但这并不意味着它是一本综合的、完全引用的科学研究教材。相反,我们仔细地审查了我们的引用,确保他们可以从容易进入的资源中得到。

由于篇幅的限制,对于层次化方法、小波和特征图像等,我们只是简要地讨论了其基础,有些甚至完全省略。对于其他的一些内容,我们则是有意省略,包括一些高难度的话题,比如目标识别、图像理解和三维计算机视觉等。所以,虽然可以说该书中描述的多数技术可以被称为“聋哑的”,但是我们的经验是这样的:这些较简单方法的直接的、技术上规则的实现对于一些特定领域、甚至“智能”方法的成功实现都是十分重要的。

如果你只是在寻找 ImageJ 或者 Java 的编程手册,那么肯定有更好的资源。虽然这本书中包含了很多 ImageJ 的参考和很多代码实例,但是编程本身并不是我们的重点,编程只是在用精确而直接的可测试方法描述一项技术的过程中的重要一步。

为什么写这本书

无论是称为信号处理,还是图像处理,或者是多媒体计算,数字图像的操作多年来已经是多数计算机科学工程教程中不可或缺的一部分。今天,随着全数字化工作流的普及,它已经变成多种学科专业技术中不可或缺的一部分。在数字媒体激增之前,往往只是提供一门课程,在工程上称为“数字信号处理”,在计算机科学中称为“数字图像处理”,而且还是一门选修课。

如今,这一课程已经被调整到了很多课程的前序阶段,成为了一门重要的基础课。这种迁移暴露了一个问题:许多作为研究生级课程所依赖的教科书对于初学者来说是不合适的。对于初学者来说,这些教科书通常太拘泥于形式,同时,不能对实际应用中多数流行的算法提供详细的介绍。结果,教师们发现选择一本教材或者是推荐少而精的文献给学生是一件十分困难的事情。我们也处在这样的两难境地,我们衷心希望这本书能够填补这一空缺。

接下来章节的内容可以分一学期或者连续的两学期来学习。为了让它比较灵活,我们增加了附加材料,以使每一章尽可能独立,也使教师在设计课程的过程中有更大的灵活性。第 13~15 章对图像处理中使用的频谱技术基础进行了详细的介绍,并且和本书中其他材料是独立的。根据教师和课程的要求,可以将这些内容根据具体要求包含进来,也可以完全不讲。

下面的计划图提供了用于一学期或者两个学期的课程建议。

一学期:一学期的课程可以围绕以下两个主题中的任意一个来展开:图像处理和图像分析。任意一个主题都可以很容易地融入之前学习的现代计算机科学或者 IT 课程中,图像分析更是医学信息学非常重要的基础课程。

两学期:如果该课程可以上两个学期,按照这里的设计,可以将内容按照难度(如下表所述)分成前后连贯的两部分(基础和高级)。

用于一学期或者两个学期的课程建议	图像处理	图像分析	基础	高级
第 1 章	⊗	⊗	⊗	○
第 2 章	⊗	⊗	⊗	○
第 3 章	⊗	⊗	⊗	○
第 4 章	⊗	○	⊗	○
第 5 章	⊗	○	⊗	○
第 6 章	⊗	⊗	⊗	○
第 7 章	⊗	⊗	⊗	○
第 8 章	○	⊗	○	⊗
第 9 章	○	⊗	○	⊗
第 10 章	⊗	○	⊗	○
第 11 章	○	⊗	⊗	○
第 12 章	⊗	○	○	⊗
第 13 章	○	⊗	○	⊗
第 14 章	○	⊗	○	⊗
第 15 章	○	○	○	⊗
第 16 章	⊗	○	○	⊗
第 17 章	○	⊗	○	⊗

英文版的补充

本书是从德文第 2 版(2000 年版)[17]翻译过来的,全书包含了很多优化处理。除了一些小的错误和改进外,我们对第 5 章中直方图匹配的表示、第 11 章中基于矩的集合区域特征、第 10 章中的形态学滤波器和第 16 章中的插值方法都进行了全面的修正。另外,重写了很多示例程序——比如,11.2.2 节中的单程区域标记和轮廓找寻算法,以提高其清晰性并且利用了 Java 5 中新的语言特点。

在线资源

读者可以从本书的网站:www.imagingbook.com 上下载补充材料,包括示例的完整源代码、示例中用到的测试图像和更正。对于教师来说还有一些额外的材料,包括本书中使用的所有公式和图表,都集中放在了一起。欢迎发邮件到:imagingbook@gmail.com 提出意见、问题或者更正。

致谢

没有家庭的理解和支持,这本书是不会问世的。感谢维恩·拉斯本德(NIH)开发的 ImageJ 及其对社区的突出支持,感谢(TU Graz 的)Axel Pinz 教授和(TU Prague 的)Vaclav Hlavac 教授的意见,感谢第 1 版、第 2 版的读者在这方面的宝贵投入,是你们的建议使我们不断提高,是你们的鼓励促使我们翻译这一版。作者由衷地感谢索尼和苹果笔记本,为了这部手稿,CPU 大约运转了 1.6 千万亿(10¹⁵)次,耗电 560 度,产生了 196 千克二氧化碳。最后感谢 Springer-Verlag、Ursula Zimpfer 和 Jutta Maria Fleschutz 的专家,和他们带领的德文版小组成员,以及负责英文版的 Wayne Wheeler、Catherine Brett 和 Jeffrey Taub。

澳大利亚哈根堡/美国华盛顿

目 录

第 1 章 品味像素	1
1.1 图像编程	1
1.2 图像分析和计算机视觉	2
第 2 章 数字图像	4
2.1 数字图像的类型	4
2.2 图像获取	5
2.2.1 针孔照相机模型	5
2.2.2 “薄”透镜	6
2.2.3 数字化	6
2.2.4 图像尺寸和分辨率	8
2.2.5 图像坐标系统	9
2.2.6 像素值	9
2.3 图像文件格式	11
2.3.1 光栅和矢量数据	11
2.3.2 标签图像文件格式(TIFF)	12
2.3.3 图形交换格式(GIF)	13
2.3.4 可移植网络图形(PNG)	13
2.3.5 JPEG	14
2.3.6 Windows 位图(BMP)	16
2.3.7 简易位图格式(PBM)	16
2.3.8 其他文件格式	17
2.3.9 比特和字节	17
2.4 练习	19
第 3 章 ImageJ	20
3.1 图像操作和处理	20
3.2 ImageJ 综述	21
3.2.1 关键特征	22
3.2.2 交互式工具	22
3.2.3 ImageJ 插件	23
3.2.4 第一个例子: 图像取反	24

3.3	ImageJ 和 Java 的其他信息	26
3.3.1	ImageJ 的资源	26
3.3.2	用 Java 编程	26
3.4	练习	27
第 4 章	直方图	28
4.1	什么是直方图	28
4.2	解读直方图	30
4.2.1	图像获取	30
4.2.2	图像缺陷	32
4.3	直方图计算	34
4.4	多于 8 位图像的直方图	36
4.4.1	像素组合	36
4.4.2	例子	36
4.4.3	实现	36
4.5	彩色图像直方图	37
4.5.1	强度直方图	38
4.5.2	单个颜色通道直方图	38
4.5.3	合并颜色直方图	39
4.6	累积直方图	39
4.7	练习	40
第 5 章	点运算	42
5.1	图像强度修正	43
5.1.1	对比度和亮度	43
5.1.2	利用设定门限限制结果值	43
5.1.3	图像求反	43
5.1.4	阈值操作	44
5.2	点运算和直方图	45
5.3	自动对比度调整	45
5.4	修正的自动对比度调整	47
5.5	直方图均衡化	48
5.6	直方图规定化	51
5.6.1	频率和概率	51
5.6.2	直方图规定化的原理	52
5.6.3	调整为分段线性分布	52
5.6.4	调整到给定直方图(直方图匹配)	54
5.6.5	例子	57
5.7	Gamma 校正	59
5.7.1	为什么是 Gamma	60
5.7.2	Gamma 函数	60

5.7.3	真实 Gamma 值	61
5.7.4	Gamma 校正应用	61
5.7.5	实现	63
5.7.6	修正 Gamma 校正	63
5.8	ImageJ 中的点运算	65
5.8.1	利用查找表进行点运算	66
5.8.2	算术运算	66
5.8.3	包含多幅图像的点运算	67
5.8.4	两幅图像进行点运算的方法	67
5.8.5	多幅图像的 ImageJ 插件	67
5.9	练习	69
第 6 章	滤波器	72
6.1	什么是滤波器	72
6.2	线性滤波器	73
6.2.1	滤波矩阵	74
6.2.2	运用滤波器	74
6.2.3	计算滤波器算子	75
6.2.4	滤波器插件示例	76
6.2.5	整数系数	78
6.2.6	任意尺寸的滤波器	79
6.2.7	线性滤波器的类型	80
6.3	线性滤波器的性质	82
6.3.1	线性卷积	82
6.3.2	线性卷积的性质	83
6.3.3	线性滤波的可分离性	84
6.3.4	滤波器的脉冲响应	85
6.4	非线性滤波器	87
6.4.1	最小值和最大值滤波	87
6.4.2	中值滤波	88
6.4.3	带权中值滤波器	91
6.4.4	其他非线性滤波器	92
6.5	滤波器的实现	92
6.5.1	滤波程序的效率	92
6.5.2	图像边界的处理	93
6.5.3	调试滤波器程序	93
6.6	ImageJ 中的滤波运算	94
6.6.1	线性滤波器	94
6.6.2	高斯滤波器	95
6.6.3	非线性滤波器	95

6.7 练习	96
第 7 章 边缘和轮廓	98
7.1 边缘是怎么来的	98
7.2 基于梯度的边缘检测	99
7.2.1 偏导数和梯度	99
7.2.2 导数滤波器	100
7.3 边缘检测算子	101
7.3.1 Prewitt 算子和 Sobel 算子	101
7.3.2 Roberts 算子	103
7.3.3 罗盘算子	104
7.3.4 ImageJ 中的边缘检测算子	104
7.4 其他边缘检测算子	105
7.4.1 基于二阶导数的边缘检测	105
7.4.2 不同尺度下的边缘	105
7.4.3 Canny 算子	106
7.5 从边缘到轮廓	107
7.5.1 轮廓跟踪	108
7.5.2 边缘图	108
7.6 边缘锐化	108
7.6.1 边缘锐化和拉普拉斯滤波器	108
7.6.2 USM 锐化	111
7.7 练习	114
第 8 章 角点检测	116
8.1 感兴趣点	116
8.2 Harris 角点检测器	116
8.2.1 局部结构矩阵	117
8.2.2 角点响应函数	117
8.2.3 确定角点	118
8.2.4 例子	120
8.3 实现	121
8.3.1 步骤 1：计算角点响应函数	121
8.3.2 步骤 2：选择“好的”角点	123
8.3.3 显示角点	126
8.3.4 小结	127
8.4 练习	128
第 9 章 检测简单曲线	129
9.1 显著结构	129
9.2 Hough 变换	130
9.2.1 参数空间	131

9.2.2	累加器数组	132
9.2.3	更好的直线表达式	132
9.3	Hough 变换的实现	133
9.3.1	填写累加器数组	134
9.3.2	分析累加器数组	136
9.3.3	Hough 变换的扩展	136
9.4	圆与椭圆的 Hough 变换	139
9.4.1	圆与弧	139
9.4.2	椭圆	141
9.5	练习	142
第 10 章	形态学滤波器	143
10.1	收缩和放大	143
10.1.1	像素的邻域	145
10.2	基本的形态学运算	145
10.2.1	结构元素	145
10.2.2	点集	145
10.2.3	膨胀	146
10.2.4	腐蚀	147
10.2.5	膨胀与腐蚀的性质	147
10.2.6	设计形态学滤波器	149
10.2.7	应用举例：轮廓	152
10.3	复合运算	153
10.3.1	开运算	153
10.3.2	闭运算	153
10.3.3	开运算和闭运算的性质	153
10.4	灰度形态学	154
10.4.1	结构元素	154
10.4.2	膨胀与腐蚀	155
10.4.3	灰度开运算与闭运算	157
10.5	实现形态学滤波器	158
10.5.1	ImagJ 中的二值图像	158
10.5.2	膨胀与腐蚀	159
10.5.3	开运算与闭运算	160
10.5.4	Outline 函数	160
10.5.5	ImageJ 中的形态学运算	161
10.6	练习	162
第 11 章	二值图像中的区域	164
11.1	寻找图像区域	164
11.1.1	使用洪泛法进行区域标记	165

11.1.2	顺序区域标记	168
11.1.3	区域标记——总结	172
11.2	区域轮廓	173
11.2.1	外部和内部轮廓	173
11.2.2	组合区域标记和轮廓寻找	174
11.2.3	实现	177
11.2.4	实例	178
11.3	表征图像区域	179
11.3.1	矩阵表示	179
11.3.2	行程长度编码	180
11.3.3	链式编码	180
11.4	二值区域的属性	182
11.4.1	形状特征	183
11.4.2	几何特征	183
11.4.3	统计形状属性	185
11.4.4	基于矩的几何属性	188
11.4.5	投影	191
11.4.6	拓扑属性	192
11.5	练习	193
第 12 章	彩色图像	195
12.1	RGB 彩色图像	195
12.1.1	彩色图像的组织	197
12.1.2	ImageJ 中的彩色图像	199
12.2	颜色空间和颜色转换	208
12.2.1	转换为灰度图像	209
12.2.2	彩色图像的去饱和	211
12.2.3	HSV/HSB 和 HLS 彩色空间	212
12.2.4	电视颜色空间——YUV、YIQ 和 $YCbCr$	222
12.2.5	用于印刷的颜色空间——CMY 和 CMYK	225
12.3	比色颜色空间	228
12.3.1	CIE 颜色空间	228
12.3.2	CIE $L^*a^*b^*$	233
12.3.3	sRGB	235
12.3.4	Adobe RGB	238
12.3.5	色度适应	238
12.3.6	Java 中的比色支持	242
12.4	彩色图像统计	248
12.4.1	一幅图像中有多少种颜色	248
12.4.2	颜色直方图	249

12.5	颜色量化	251
12.5.1	标量颜色量化	252
12.5.2	矢量量化	253
12.6	练习	258
第 13 章	频谱技术介绍	260
13.1	傅里叶变换	260
13.1.1	正弦和余弦函数	260
13.1.2	周期函数的傅里叶级数	263
13.1.3	傅里叶积分	263
13.1.4	傅里叶频谱和变换	264
13.1.5	傅里叶变换对	265
13.1.6	傅里叶变换的重要性质	267
13.2	离散信号	268
13.2.1	采样	269
13.2.2	离散周期函数	273
13.3	离散傅里叶变换(DFT)	275
13.3.1	DFT 的定义	275
13.3.2	离散基函数	276
13.3.3	又是混叠现象	278
13.3.4	信号空间和频率空间的单位	279
13.3.5	功率谱	280
13.4	DFT 的实现	281
13.4.1	直接实现	281
13.4.2	快速傅里叶变换(FFT)	282
13.5	练习	283
第 14 章	二维离散傅里叶变换	284
14.1	二维 DFT 的定义	284
14.1.1	二维基函数	284
14.1.2	二维 DFT 的实现	286
14.2	二维傅里叶变换的可视化	287
14.2.1	频谱范围	287
14.2.2	中心表示法	288
14.3	2D 下的频率和方向	289
14.3.1	有效频率	289
14.3.2	2D 下的频率限制和混叠	290
14.3.3	方向	291
14.3.4	二维频谱几何校正	291
14.3.5	周期性效应	292
14.3.6	窗口	292

14.3.7	窗口函数	294
14.4	二维傅里叶变换的例子	296
14.5	DFT 的应用	300
14.5.1	频率空间的线性滤波运算	300
14.5.2	线性卷积和互相关	301
14.5.3	逆滤波器	301
14.6	练习	302
第 15 章	离散余弦变换(DCT)	303
15.1	一维 DCT	303
15.1.1	DCT 基函数	303
15.1.2	一维 DCT 的实现	305
15.2	二维 DCT	306
15.2.1	分离性	306
15.2.2	例子	306
15.3	其他频谱变换	307
15.4	练习	308
第 16 章	几何运算	309
16.1	二维映射函数	310
16.1.1	简单映射	310
16.1.2	齐次坐标	311
16.1.3	仿射(三点)映射	311
16.1.4	投影(四点)映射	313
16.1.5	双线性映射	317
16.1.6	其他非线性图像变换	318
16.1.7	局部图像变换	320
16.2	图像重采样	321
16.2.1	源到目标的映射	321
16.2.2	目标到源的映射	322
16.3	插值	323
16.3.1	简单插值方法	323
16.3.2	理想插值	324
16.3.3	通过卷积进行插值	327
16.3.4	三次插值	327
16.3.5	样条插值	328
16.3.6	Lanczos 插值	331
16.3.7	二维插值	333
16.3.8	混叠	339
16.4	Java 实现	341
16.4.1	几何变换	341

16.4.2	像素插值	351
16.4.3	采样的应用	353
16.5	练习	355
第 17 章	图像比较	356
17.1	灰度图像的模板匹配	357
17.1.1	图像之间的距离	358
17.1.2	实现	364
17.1.3	在旋转和比例变换下进行匹配	366
17.2	二值图像匹配	366
17.2.1	直接比较	366
17.2.2	距离变换	367
17.2.3	斜面匹配	370
17.3	练习	373
附录 A	数学记号	374
A.1	符号	374
A.2	集合算子	375
A.3	复数	375
A.4	算法复杂度和 O 记号	376
附录 B	Java 摘记	378
B.1	算术运算	378
B.1.1	整数除法	378
B.1.2	求模算子	379
B.1.3	无符号字节型	380
B.1.4	数学函数(类 Math)	381
B.1.5	舍入	381
B.1.6	反正切函数	382
B.1.7	Float 和 Double(类)	382
B.2	数组和集合	382
B.2.1	创建数组	382
B.2.2	数组大小	383
B.2.3	访问数组元素	383
B.2.4	二维数组	383
B.2.5	克隆数组	385
B.2.6	对象数组, 排序	386
B.2.7	集合体(Collection)	387
附录 C	ImageJ 的简短参考	388
C.1	安装与设置	388
C.2	ImageJ API	389
C.2.1	图像及其处理器	390