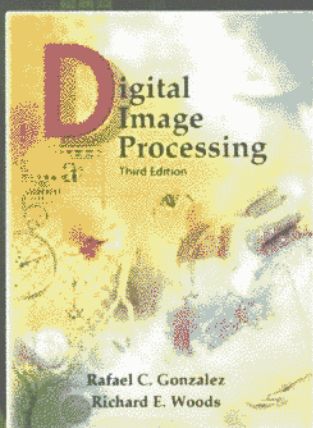


国外电子与通信教材系列

PEARSON

数字图像处理 (第三版)

Digital Image Processing, Third Edition



[美] Rafael C. Gonzalez 著
Richard E. Woods

阮秋琦 阮宇智 等译



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

数字图像处理 (第三版)

Digital Image Processing, Third Edition

在数字图像处理领域, 本书作为主要教材已有30多年。就像由Gonzalez和Wintz编写的1977年版和1987年版、由Gonzalez和Woods编写的1992年版和2002年版那样, 这一版也是我们用心为学生和教师准备的。基于对32个国家的134所高校的教师、学生和自学者的广泛调查, 这一版已做了大量的修订与更新。新增内容与与时俱进、可读性高, 并给出了大量具有实际意义的例子。覆盖的图像处理领域包括灰度变换和空间滤波、频率域中的傅里叶变换和滤波、图像增强、图像复原、计算机断层、模糊集合、彩色图像处理、小波、图像和视频压缩、形态学处理、图像分割、图像描述、目标识别。

新特性

- 为使读者更早地接触基础内容, 对介绍性概念进行了修订。
- 修订和更新了关于灰度变换、空间域相关、卷积及它们在空间滤波中的应用的讨论。
- 新增了关于模糊集合及其在图像处理中的应用的讨论。
- 扩充了关于离散傅里叶变换和频率域处理的内容。
- 扩充了关于计算机断层的内容。
- 对小波章节进行了较大的修订。
- 扩充了关于数据压缩的一章, 包括新的压缩技术、数字视频压缩、压缩标准和水印处理。
- 扩充了关于形态学重建、灰度形态学和现代形态学算法的内容。
- 扩充了关于Marr-Hildreth边缘检测算法和坎尼边缘检测算法的内容。
- 扩充了关于图像阈值处理的内容。
- 给出了许多新例子, 包括400余幅新图像和200多幅新图表。
- 扩充了习题集, 包含了80多道新习题。
- 更新了参考文献。

相关图书



ISBN 978-7-121-10207-3

本书网站 www.prenhall.com/gonzalezwoods

尽管本书完全自成体系, 但近来全新改版的配套网站为读者提供了额外的支持, 这些支持包括所选习题的答案、实验项目建议、课堂演示幻灯片等。教师手册可提供给采用本书作为教材的教师。

For sale and distribution in the mainland of China exclusively(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).
此版本仅限在中国大陆发行。

PEARSON

www.PearsonEd.com

ISBN 978-7-121-11008-5



9 787121 110085 >

定价: 79.00元



策划编辑: 谭海平
责任编辑: 谭海平
责任美编: 孙焱津



网络资源 免费下载
<http://www.hxedu.com.cn>

本书贴有激光防伪标志, 凡没有防伪标志者, 属盗版图书。

国外电子与通信教材系列

数字图像处理

(第三版)

Digital Image Processing, Third Edition

[美] Rafael C. Gonzalez 著
Richard E. Woods

阮秋琦 阮宇智 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

在数字图像处理领域,本书作为主要教材已有30多年。这一版本是作者在前两版的基础上修订而成的,是前两版的发展与延续。除保留了前两版的大部分内容外,根据读者的反馈,作者在13个方面对本书进行了修订,新增了400多幅图像、200多幅图表及80多道习题,融入了近年来数字图像处理领域的重要进展,因而本书特色鲜明且与时俱进。全书仍分为12章,即绪论、数字图像基础、灰度变换与空间滤波、频率域滤波、图像复原与重建、彩色图像处理、小波和多分辨率处理、图像压缩、形态学图像处理、图像分割、表示与描述、目标识别。

本书的读者对象主要是从事信号与信息处理、通信工程、电子科学与技术、信息工程、自动化、计算机科学与技术、地球物理、生物工程、生物医学工程、物理、化学、医学、遥感等领域的大学教师和科技工作者、研究生、大学本科高年级学生及工程技术人员。

Original edition, entitled *Digital Image Processing, Third Edition*, 9780132345637 by Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

China edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY, Copyright © 2011.

This edition is manufactured in the People's Republic of China, and is authorized for sale only in the mainland of China exclusively (except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

本书中文简体字翻译版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2008-1832

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理:第3版/(美)冈萨雷斯(Gonzalez, R. C.), (美)伍兹(Woods, R. E.)著. 阮秋琦等译.

北京:电子工业出版社,2011.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *Digital Image Processing, Third Edition*

ISBN 978-7-121-11008-5

I. ①数… II. ①冈… ②伍… ③阮… III. 数字图像处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 100944 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:40.75 字数:1095千字 彩插:2

印 次:2011年6月第1次印刷

定 价:79.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

目 录

第1章 绪论	1	2.6.6 向量与矩阵操作	53
引言	1	2.6.7 图像变换	54
1.1 什么是数字图像处理	1	2.6.8 概率方法	56
1.2 数字图像处理的起源	2	小结	57
1.3 使用数字图像处理领域的实例	4	参考文献	58
1.3.1 伽马射线成像	5	习题	58
1.3.2 X射线成像	5	第3章 灰度变换与空间滤波	62
1.3.3 紫外波段成像	7	引言	62
1.3.4 可见光及红外波段成像	7	3.1 背景知识	62
1.3.5 微波波段成像	10	3.1.1 灰度变换和空间滤波基础	62
1.3.6 无线电波段成像	10	3.1.2 关于本章中的例子	63
1.3.7 使用其他成像方式的例子	11	3.2 一些基本的灰度变换函数	64
1.4 数字图像处理的基本步骤	14	3.2.1 图像反转	64
1.5 图像处理系统的组成	15	3.2.2 对数变换	64
小结	17	3.2.3 幂律(伽马)变换	66
参考文献	17	3.2.4 分段线性变换函数	68
第2章 数字图像基础	20	3.3 直方图处理	72
引言	20	3.3.1 直方图均衡	72
2.1 视觉感知要素	20	3.3.2 直方图匹配(规定化)	77
2.1.1 人眼的结构	20	3.3.3 局部直方图处理	83
2.1.2 眼睛中图像的形成	22	3.3.4 在图像增强中使用直方图统计	85
2.1.3 亮度适应和辨别	22	3.4 空间滤波基础	88
2.2 光和电磁波谱	24	3.4.1 空间滤波机理	88
2.3 图像感知和获取	26	3.4.2 空间相关与卷积	89
2.3.1 使用单个传感器获取图像	27	3.4.3 线性滤波的向量表示	92
2.3.2 使用条带传感器获取图像	27	3.4.4 空间滤波器模板的产生	93
2.3.3 使用传感器阵列获取图像	28	3.5 平滑空间滤波器	93
2.3.4 简单的图像形成模型	28	3.5.1 平滑线性滤波器	93
2.4 图像取样和量化	30	3.5.2 统计排序(非线性)滤波器	96
2.4.1 取样和量化的基本概念	30	3.6 锐化空间滤波器	97
2.4.2 数字图像表示	31	3.6.1 基础	97
2.4.3 空间和灰度分辨率	34	3.6.2 使用二阶微分进行图像锐化—— 拉普拉斯算子	99
2.4.4 图像内插	36	3.6.3 非锐化掩蔽和高提升滤波	100
2.5 像素间的一些基本关系	38	3.6.4 使用一阶微分对(非线性)图像锐 化——梯度	101
2.5.1 相邻像素	38	3.7 混合空间增强法	103
2.5.2 邻接性、连通性、区域和边界	38	3.8 使用模糊技术进行灰度变换和 空间滤波	105
2.5.3 距离度量	40	3.8.1 引言	106
2.6 数字图像处理中所用数学工具的介绍	41	3.8.2 模糊集合论原理	106
2.6.1 阵列与矩阵操作	41	3.8.3 模糊集合应用	110
2.6.2 线性操作与非线性操作	42	3.8.4 使用模糊集合进行灰度变换	116
2.6.3 算术操作	42		
2.6.4 集合和逻辑操作	46		
2.6.5 空间操作	49		

3.8.5 使用模糊集合进行空间滤波	117	4.8.4 低通滤波的其他例子	174
小结	119	4.9 使用频率域滤波器锐化图像	176
参考文献	119	4.9.1 理想高通滤波器	176
习题	120	4.9.2 布特沃斯高通滤波器	178
第4章 频率域滤波	124	4.9.3 高斯高通滤波器	178
引言	124	4.9.4 频率域的拉普拉斯算子	179
4.1 背景	124	4.9.5 钝化模板、高提升滤波和高频 强调滤波	180
4.1.1 傅里叶级数和变换简史	124	4.9.6 同态滤波	182
4.1.2 关于本章中的例子	125	4.10 选择性滤波	184
4.2 基本概念	125	4.10.1 带阻滤波器和带通滤波器	184
4.2.1 复数	125	4.10.2 陷波滤波器	185
4.2.2 傅里叶级数	126	4.11 实现	187
4.2.3 冲激及其取样特性	126	4.11.1 二维 DFT 的可分性	187
4.2.4 连续变量函数的傅里叶变换	128	4.11.2 用 DFT 算法计算 IDFT	187
4.2.5 卷积	130	4.11.3 快速傅里叶变换(FFT)	187
4.3 取样和取样函数的傅里叶变换	131	4.11.4 关于滤波器设计的一些注释	190
4.3.1 取样	131	小结	190
4.3.2 取样函数的傅里叶变换	132	参考文献	190
4.3.3 取样定理	134	习题	191
4.3.4 混淆	135	第5章 图像复原与重建	196
4.3.5 由取样后的数据重建(复原)函数	137	引言	196
4.4 单变量的离散傅里叶变换(DFT)	138	5.1 图像退化/复原过程的模型	197
4.4.1 由取样后的函数的连续变换得 到 DFT	138	5.2 噪声模型	197
4.4.2 取样和频率间隔间的关系	140	5.2.1 噪声的空间和频率特性	197
4.5 两个变量的函数的扩展	141	5.2.2 一些重要的噪声概率密度函数	198
4.5.1 二维冲激及其取样特性	141	5.2.3 周期噪声	201
4.5.2 二维连续傅里叶变换对	141	5.2.4 噪声参数的估计	202
4.5.3 二维取样和二维取样定理	142	5.3 只存在噪声的复原——空间滤波	203
4.5.4 图像中的混淆	143	5.3.1 均值滤波器	203
4.5.5 二维离散傅里叶变换及其反变换	147	5.3.2 统计排序滤波器	205
4.6 二维离散傅里叶变换的一些性质	148	5.3.3 自适应滤波器	208
4.6.1 空间和频率间隔的关系	148	5.4 用频率域滤波消除周期噪声	211
4.6.2 平移和旋转	148	5.4.1 带阻滤波器	211
4.6.3 周期性	148	5.4.2 带通滤波器	211
4.6.4 对称性	150	5.4.3 陷波滤波器	212
4.6.5 傅里叶谱和相角	154	5.4.4 最佳陷波滤波	213
4.6.6 二维卷积定理	157	5.5 线性、位置不变的退化	216
4.6.7 二维离散傅里叶变换性质的小结	159	5.6 估计退化函数	218
4.7 频率域滤波基础	161	5.6.1 图像观察估计	218
4.7.1 频率域的其他特性	161	5.6.2 试验估计	218
4.7.2 频率域滤波基础	162	5.6.3 建模估计	219
4.7.3 频率域滤波步骤小结	165	5.7 逆滤波	221
4.7.4 空间和频率域滤波间的对应	166	5.8 最小均方误差(维纳)滤波	222
4.8 使用频率域滤波器平滑图像	169	5.9 约束最小二乘滤波	224
4.8.1 理想低通滤波器	169	5.10 几何均值滤波	227
4.8.2 布特沃斯低通滤波器	172	5.11 由投影重建图像	228
4.8.3 高斯低通滤波器	173	5.11.1 引言	228

5.11.2	计算机断层(CT)原理	230
5.11.3	投影和雷登变换	232
5.11.4	傅里叶切片定理	235
5.11.5	使用平行射线束滤波反投影的重建	236
5.11.6	使用扇形射线束滤波反投影的重建	240
小结		244
参考文献		244
习题		245
第6章 彩色图像处理		249
引言		249
6.1	彩色基础	249
6.2	彩色模型	254
6.2.1	RGB 彩色模型	254
6.2.2	CMY 和 CMYK 彩色模型	257
6.2.3	HSI 彩色模型	257
6.3	伪彩色图像处理	262
6.3.1	灰度分层	262
6.3.2	灰度到彩色的变换	265
6.4	全彩色图像处理基础	267
6.5	彩色变换	268
6.5.1	公式	269
6.5.2	补色	271
6.5.3	彩色分层	271
6.5.4	色调和彩色校正	273
6.5.5	直方图处理	275
6.6	平滑和锐化	276
6.6.1	彩色图像平滑	276
6.6.2	彩色图像锐化	278
6.7	基于彩色的图像分割	279
6.7.1	HSI 彩色空间的分割	279
6.7.2	RGB 向量空间中的分割	279
6.7.3	彩色边缘检测	281
6.8	彩色图像中的噪声	283
6.9	彩色图像压缩	284
小结		285
参考文献		285
习题		286
第7章 小波和多分辨率处理		289
引言		289
7.1	背景	289
7.1.1	图像金字塔	290
7.1.2	子带编码	292
7.1.3	哈尔变换	297
7.2	多分辨率展开	300
7.2.1	级数展开	300
7.2.2	尺度函数	301
7.2.3	小波函数	304
7.3	一维小波变换	306

7.3.1	小波级数展开	306
7.3.2	离散小波变换	308
7.3.3	连续小波变换	309
7.4	快速小波变换	311
7.5	二维小波变换	317
7.6	小波包	322
小结		330
参考文献		330
习题		331

第8章 图像压缩		334
引言		334
8.1	基础知识	335
8.1.1	编码冗余	336
8.1.2	空间冗余和时间冗余	337
8.1.3	不相关的信息	337
8.1.4	图像信息的度量	338
8.1.5	保真度准则	340
8.1.6	图像压缩模型	341
8.1.7	图像格式、容器和压缩标准	343
8.2	一些基本的压缩方法	345
8.2.1	霍夫曼编码	345
8.2.2	Golomb 编码	346
8.2.3	算术编码	350
8.2.4	LZW 编码	351
8.2.5	行程编码	353
8.2.6	基于符号的编码	357
8.2.7	比特平面编码	359
8.2.8	块变换编码	361
8.2.9	预测编码	373
8.2.10	小波编码	387
8.3	数字图像水印	394
小结		398
参考文献		398
习题		399

第9章 形态学图像处理		402
引言		402
9.1	预备知识	402
9.2	腐蚀和膨胀	404
9.2.1	腐蚀	404
9.2.2	膨胀	406
9.2.3	对偶性	407
9.3	开操作与闭操作	407
9.4	击中或击中不中变换	411
9.5	一些基本的形态学算法	412
9.5.1	边界提取	412
9.5.2	孔洞填充	413
9.5.3	连通分量的提取	414
9.5.4	凸壳	416

9.5.5	细化	417
9.5.6	粗化	418
9.5.7	骨架	418
9.5.8	裁剪	420
9.5.9	形态学重建	421
9.5.10	二值图像形态学操作小结	426
9.6	灰度级形态学	428
9.6.1	腐蚀和膨胀	428
9.6.2	开操作和闭操作	430
9.6.3	一些基本的灰度级形态学算法	431
9.6.4	灰度级形态学重建	435
	小结	437
	参考文献	437
	习题	438
第10章 图像分割 443		
	引言	443
10.1	基础知识	443
10.2	点、线和边缘检测	445
10.2.1	背景知识	445
10.2.2	孤立点的检测	447
10.2.3	线检测	449
10.2.4	边缘模型	450
10.2.5	基本边缘检测	454
10.2.6	更先进的边缘检测技术	459
10.2.7	边缘连接和边界检测	467
10.3	阈值处理	476
10.3.1	基础知识	476
10.3.2	基本的全局阈值处理	478
10.3.3	用Otsu方法的最佳全局阈值处理	479
10.3.4	用图像平滑改善全局阈值处理	483
10.3.5	利用边缘改进全局阈值处理	484
10.3.6	多阈值处理	487
10.3.7	可变阈值处理	488
10.3.8	多变量阈值处理	492
10.4	基于区域的分割	493
10.4.1	区域生长	493
10.4.2	区域分裂与聚合	495
10.5	用形态学分水岭的分割	497
10.5.1	背景知识	497
10.5.2	水坝构建	498
10.5.3	分水岭分割算法	499
10.5.4	标记的使用	501
10.6	分割中运动的应用	502
10.6.1	空间域技术	502
10.6.2	频率域技术	504
	小结	507

参考文献	507
习题	508

第11章 表示和描述 514

引言	514
11.1 表示	514
11.1.1 边界追踪	514
11.1.2 链码	516
11.1.3 使用最小周长多边形的多边形近似	518
11.1.4 其他多边形近似方法	522
11.1.5 标记图	523
11.1.6 边界线段	525
11.1.7 骨架	525
11.2 边界描绘子	527
11.2.1 一些简单的描绘子	527
11.2.2 形状数	528
11.2.3 傅里叶描绘子	529
11.2.4 统计矩	531
11.3 区域描绘子	532
11.3.1 一些简单的描绘子	532
11.3.2 拓扑描绘子	532
11.3.3 纹理	534
11.3.4 不变矩	542
11.4 使用主分量进行描绘	544
11.5 关系描绘子	550
小结	553
参考文献	553
习题	554

第12章 目标识别 557

引言	557
12.1 模式和模式类	557
12.2 基于决策理论方法的识别	560
12.2.1 匹配	560
12.2.2 最佳统计分类器	564
12.2.3 神经网络	570
12.3 结构方法	585
12.3.1 匹配形状数	585
12.3.2 串匹配	586
小结	587
参考文献	588
习题	588

附录A 图像压缩编码表 591

附录B 参考书目 595

索引 620

第1章 绪 论

百闻不如一见。

——无名氏

引言

数字图像处理方法的重要性源于两个主要应用领域：改善图示信息以便人们解释；为存储、传输和表示而对图像数据进行处理，以便于机器自动理解。本章有几个主要目的：(1)定义我们称之为图像处理领域的范围；(2)从历史观点回顾图像处理的起源；(3)通过考察一些主要的应用领域，给出图像处理技术状况的概念；(4)简要讨论数字图像处理中所用的主要方法；(5)概述通用目的的典型图像处理系统的组成；(6)列出公开发表的数字图像处理领域的一些图书和文献。

1.1 什么是数字图像处理

一幅图像可定义为一个二维函数 $f(x, y)$ ，其中 x 和 y 是空间(平面)坐标，而在任何一对空间坐标 (x, y) 处的幅值 f 称为图像在该点处的强度或灰度。当 x 、 y 和灰度值 f 是有限的离散数值时，我们称该图像为数字图像。数字图像处理是指借助于数字计算机来处理数字图像。注意，数字图像是由有限数量的元素组成的，每个元素都有一个特定的位置和幅值。这些元素称为图画元素、图像元素或像素。像素是广泛用于表示数字图像元素的术语。在第2章，我们将用更正式的术语来考虑这些定义。

视觉是人类最高级的的感知，所以，图像在人类感知中扮演着最重要的角色并不奇怪。然而，人类的感知仅限于电磁波谱的视觉波段，与人类不同，成像机器几乎可以覆盖从伽马射线到无线电波的整个电磁波谱。它们可以对非人类所习惯的那些图像源进行加工，这些图像源包括超声波、电子显微镜和计算机产生的图像。因而，数字图像处理涉及很宽泛的各种各样的应用领域。

关于图像处理止于哪里或其他相关领域(如图像分析和计算机视觉)从哪里开始，在创造人之间并没有一致的看法。有时，用处理的输入和输出内容都是图像这一规范来界定图像处理的范围。我们认为这有点局限，是人为的界定。例如，在这种定义下，甚至像计算一幅图像的平均灰度(结果为一个数字)这样简单的任务都不能算是图像处理。另一方面，有些领域(如计算机视觉)的最终目标是使用计算机来模拟人的视觉，包括理解并根据视觉输入采取行动等。该领域本身是人工智能(AI)的一个分支，其目的是模仿人类智能。人工智能领域处在其发展过程的初级阶段，它的发展比预期的慢得多。图像分析(也称为图像理解)领域则处在图像处理和计算机视觉之间。

① 每页下方阴影框中的数字表示译文对应的原书页码，索引中的页码为原书页码。——编者注

从图像处理到计算机视觉的这个连续统一体内并没有明确的界限。然而,一种有用的范例是在这个连续的统一体中考虑三种典型的计算处理,即低级、中级和高级处理。低级处理涉及初级操作,如降低噪声的图像预处理、对比度增强和图像尖锐化。低级处理以输入、输出都是图像为特征。中级处理涉及诸多任务,譬如(把一幅图像分为不同区域或目标的)分割,减少这些目标物的描述,以使其更适合计算机处理及对不同目标的分类(识别)。中级图像处理以输入为图像但输出是从这些图像中提取的特征(如边缘、轮廓及各物体的标识等)为特点。最后,高级处理涉及“理解”已识别目标的总体,就像在图像分析中那样,以及在连续统一体的远端执行与视觉相关的认知功能。

基于上述讨论我们可以看到,图像处理和图像分析之间合乎逻辑的重叠部分就是图像中各个区域或目标的识别这一领域。这样,在本书中,我们就将数字图像处理界定为其输入和输出都是图像的处理,另外,包含从图像中提取特征的处理,直至包括各个目标的识别。作为一个澄清这些概念的说明,我们考虑文本自动分析这一领域。获取包含有文本的区域的一幅图像,对该图像进行预处理,以提取(分割)各个字符,以适合于计算机处理的形式描述这些字符,识别这些个别字符,这些都在本书界定的数字图像处理范畴内。理解一页的内容可能要根据“理解”词句的复杂度从图像分析领域甚至计算机视觉来考虑。这很快就会变得很明显,就像我们已定义的那样,数字图像处理可成功地用于具有特殊社会和经济价值的广泛领域。后面各章中给出的概念是这些应用领域中所用方法的基础。

1.2 数字图像处理的起源

数字图像的最早应用之一是在报纸业,当时,图片第一次通过海底电缆从伦敦传往纽约。早在20世纪20年代曾引入巴特兰(Bartlane)电缆图片传输系统,把横跨大西洋传送一幅图片所需的时间从一个多星期减少到了3小时。为了用电缆传输图片,首先使用特殊的打印设备对图片编码,然后,在接收端重构这些图片。图1.1就是用这种方法传送并利用装有打印机字体的电报打印机模拟中间色调还原出来的图像。

这些早期数字图片视觉质量的改进中的初始问题涉及打印过程的选择和亮度等级的分布。用于得到图1.1所示图像的打印方法到1921年底就被彻底淘汰了,转而支持一种基于照相还原的技术,即在电报接收端使用穿孔纸带来还原图片。图1.2显示了使用这种方法得到的一幅图像。与图1.1相比,它在色调质量和分辨率方面的改进都很明显。



图1.1 1921年由电报打印机采用特殊字体在编码纸带上产生的数字图片(原图像由McFarlane提供^①)

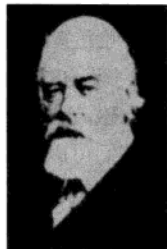


图1.2 1922年在信号两次穿越大西洋后,由穿孔纸带得到的数字图片(原图像由McFarlane提供)

早期的巴特兰系统可以使用5个不同的灰度级来编码图像。到1929年,这一能力已增大到15级。图1.3所示的这种典型图像就是用15级色调设备得到的。在这一时期,由于引入了一种使用编码图片纸带调制光束而使底片感光的系统,因而明显地改善了还原过程。

^① 本书后面提供的参考文献按作者姓氏的字母顺序列出。

虽然刚才引用的例子中涉及数字图像,但并不认为它们就是我们定义的数字图像处理,因为创建这些图像时并未涉及计算。因此,数字图像处理的历史与数字计算机的发展密切相关。事实上,数字图像要求非常大的存储和计算能力,因此数字图像处理领域的发展必须依靠数字计算机及数据存储、显示和传输等相关支撑技术的发展。

计算机的概念可追溯到 5000 多年前亚洲算盘的发明。更近一些,过去两个世纪以来已有的发展也奠定了我们今天称之为计算机的基础。然而,我们称之为现代计算机的基础还要回溯到 20 世纪 40 年代由约翰·冯·诺依曼提出的两个重要概念:(1)保存程序和数据的存储器;(2)条件分支。这两个概念是中央处理单元(CPU)的基础,今天,它是计算机的心脏。从冯·诺依曼开始,已有的一系列重要的进展使得计算机强大到足以用于数字图像处理。

简单地说,这些进展可归纳为如下几点:(1)1948 年美国贝尔实验室发明了晶体管;(2)20 世纪 50 年代和 20 世纪 60 年代高级编程语言 COBOL(Common Business-Oriented Language)和 FORTRAN(Formula Translator)的开发;(3)1958 年美国德州仪器公司发明了集成电路(IC);(4)20 世纪 60 年代早期操作系统的开发;(5)20 世纪 70 年代早期 Intel 公司开发了微处理器(由中央处理单元、存储器和输入/输出控制组成的单一芯片);(6)1981 年 IBM 公司推出了个人计算机;(7)元器件的逐步小型化,随着 20 世纪 70 年代末大规模集成电路(LI)开始出现,20 世纪 80 年代出现了甚大规模集成电路(VLSI),现在出现了超大规模集成电路(ULSI)。伴随着这些进展,数字图像处理的两个基本需求——大容量存储和显示系统领域也随之快速发展。

第一台功能强大到足以执行有意义图像处理任务的大型计算机出现在 20 世纪 60 年代初。我们今天称之为数字图像处理的诞生可追溯至这一时期这些机器的使用 and 空间项目的开发。这两大发展的结合把人们的注意力集中到数字图像处理概念的潜能上。利用计算机技术改善空间探测器发回的图像的工作始于 1964 年美国加利福尼亚的喷气推进实验室(加利福尼亚,帕萨第那)。当时由“徘徊者 7 号”卫星传送的月球图像由一台计算机进行了处理,以校正航天器上电视摄像机中各种类型的图像畸变。图 1.4 显示了由“徘徊者 7 号”于 1964 年 7 月 31 日上午(东部白天时间)9 点 09 分在撞击月球表面约 17 分钟时摄取的第一张月球图像[网状标记用于第 2 章讨论的几何校正]。这也是由美国航天器拍摄的第一幅月球图像。“徘徊者 7 号”积累的图像处理方法可作为增强和复原图像方法的基础,譬如“探索者”登月飞行、“水手号”火星飞越任务及“阿波罗”载人登月和其他任务。

在空间应用的同时,数字图像处理技术在 20 世纪 60 年代末和 20 世纪 70 年代初开始用于医学成像、地球资源遥感监测和天文学等领域。早在 20 世纪 70 年代发明的计算机轴向断层术,简称为计算机断层(CT),是图像处理在医学诊断领域最重要的应用之一。计算机轴向断层术是一种处理方法,在这种处理中,检测器环绕着一个物体(或病人),并且一个与该环同心的 X 射线源(与检测器环同心)绕



图 1.3 美国将军潘兴和法国元帅福熙的照片,该照片未加修饰,是在 1929 年从伦敦到纽约使用 15 级色调设备通过电缆传送的(原图像由 McFarlane 提供)



图 1.4 美国航天器传回的第一张月球照片,它是由“徘徊者 7 号”探测器在撞击月球表面约 17 分钟于美国东部时间 1964 年 7 月 31 日上午 9 点 09 分拍摄的(原图像由 NASA 提供)

着物体旋转。X 射线穿过物体并由环中对面的检测器进行收集。当 X 射线源旋转时,重复这一过程。断层由一些算法组成,这些算法使用感知的数据来重建通过物体的“切片”图像。当物体沿垂直于检测器环的方向运动时,就产生一系列这样的“切片”,这些切片组成该物体内部的三维再现。断层摄影术是由 Godfrey N. Hounsfield 先生和 Allan M. Cormack 教授分别发明的。由于这项发明,他们共同获得了 1979 年的诺贝尔医学奖。有趣的是,X 射线是 1895 年由 Wilhelm Conrad Roentgen(威廉·康拉德·伦琴)发现的,由于这一发现,他获得了 1901 年的诺贝尔物理学奖。今天,这两个相差近 100 年的发明引领着图像处理的一些最重要的应用。

从 20 世纪 60 年代至今,图像处理领域一直在生机勃勃地发展。除了医学和空间项目应用外,数字图像处理技术现在已用于更广泛的范围。计算机方法用于增强对比度或将灰度编码为彩色,以便于解释工业、医学及生物科学等领域中的 X 射线图像和其他图像。地理学者使用相同或相似的技术,从航空和卫星成像中研究污染模式。图像增强和复原方法用于处理不可修复物体的退化图像,或太昂贵以至于不可复制的实验结果。在考古学领域,使用图像处理方法已成功地复原了模糊的图片,这些图片是丢失或损坏的稀有物品的唯一现有的记录。在物理学和相关领域,计算机技术通常用于增强如高能等离子和电子显微镜等领域的实验图像。类似地,图像处理技术也成功地应用在天文学、生物学、核医学、法律实施、国防及工业领域中。

这些例子说明图像处理的结果主要用于人类解译。本章开始时曾提到,数字图像处理技术的第二个主要应用领域是解决机器感知的问题。在这种情况下,兴趣在于以更适合计算机处理的形式从图像中提取信息的过程。通常,该信息类似于人类用于解译一幅图像内容的视觉特性。例如,机器感知中使用的信息类型的例子有统计矩、傅里叶变换系数和多维距离度量。在机器感知中,使用图像处理技术的典型问题是自动字符识别、产品装配线和检测的工业机器视觉、军事识别、指纹的自动处理、X 射线和血样分类、用于天气预报和环境评估的航空图像与卫星图像的机器处理。计算机价格性能比的不断下降、万维网和互联网规模的不断扩张及网络通信带宽的提高,为数字图像处理技术的持续发展提供了前所未有的机会。下一节中将说明某些这样的应用领域。

1.3 使用数字图像处理领域的实例

今天,几乎不存在与数字图像处理无关的技术领域。这里讨论的范围只能覆盖其应用领域的一小部分。然而,由于篇幅的限制,本节的内容无疑将围绕数字图像处理的广度和重要性展开。本节将介绍一些应用领域,其中每个领域都要使用后续各章中讲解的常用数字图像处理技术。本节中所示的许多图像会在本书后面给出的多个例子中引用。所显示的所有图像都是数字图像。

数字图像处理的应用领域多种多样,所以本书在组织形式上力图覆盖该技术领域的广度。阐述数字图像处理应用范围的一种最简方法是根据信息来源分类(如可见光或 X 射线等)。在今天的应用中,最主要的图像能源是电磁能谱,其他主要图像能源包括声波、超声波和电子(以用于电子显微镜中的电子束形式)。用于建模和可视化的合成图像由计算机产生。本节简要讨论如何生成各种类别的图像及这些图像适用的领域。把图像变换为数字图像的方法则在下一章中讨论。

以电磁波谱辐射为基础的图像是我们最熟悉的,特别是 X 射线和可见光谱波段的图像。电磁波可定义为以各种波长传播的正弦波,或视为无质量的粒子流,每个粒子以波的形式传播并以光的速度运动。每个无质量的粒子包含一定的能量(或一束能量),每束能量称为一个光子。如果光谱波段根据光子能量进行分组,则可得到图 1.5 所示的光谱,范围从伽马射线(最高能量)到无线电波(最低能量)。如图所示,加底纹的条带表明了这样一个事实,即电磁波谱的各个波段之间并没有明确的界线,而是由一个波段平滑地过渡到另一个波段。

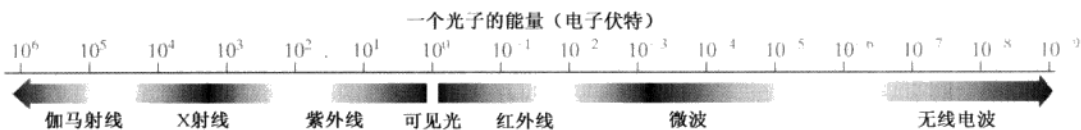


图 1.5 根据光子能量排列的电磁波谱

1.3.1 伽马射线成像

伽马射线成像的主要用途包括核医学和天文观测。在核医学中，这种方法是将放射性同位素注射到人体内，当这种物质衰变时就会放射出伽马射线，然后用伽马射线检测仪收集到的放射线来产生图像。图 1.6(a) 显示了一幅使用伽马射线成像得到的人体骨骼扫描图像。这类图像用于骨骼病变的定位，譬如感染或肿瘤。图 1.6(b) 显示了另一种主要形态的核成像，称为正电子放射断层 (PET)，其原理与 1.2 节中提及的 X 射线断层相同。然而，与使用外部 X 射线源不同，它给病人注入放射性同位素，同位素衰变时放射出正电子。当正电子遇上一个电子时，两者湮没并放射出两束伽马射线。检测到这些射线后，就可利用断层技术的基本原理创建断层图像。图 1.6(b) 所示的图像是构成病人三维再现图像序列中的一幅图像。这幅图像表明脑部和肺部各有一个肿瘤，即很容易看到的小的白色团块。

大约在 15 000 年前，天鹅星座中的星球发生大爆炸，产生了一团过热的稳定气云 (即天鹅星座环)，该气云以彩色阵列形式发光。图 1.6(c) 显示了在伽马射线波段成像的天鹅星座环。与图 1.6(a) 和图 1.6(b) 不同，该图像是利用被成像物体的自然辐射得到的。最后，图 1.6(d) 显示了一幅来自核反应堆真空管的伽马辐射图像，在图像的左下方可以看到较强的辐射区。

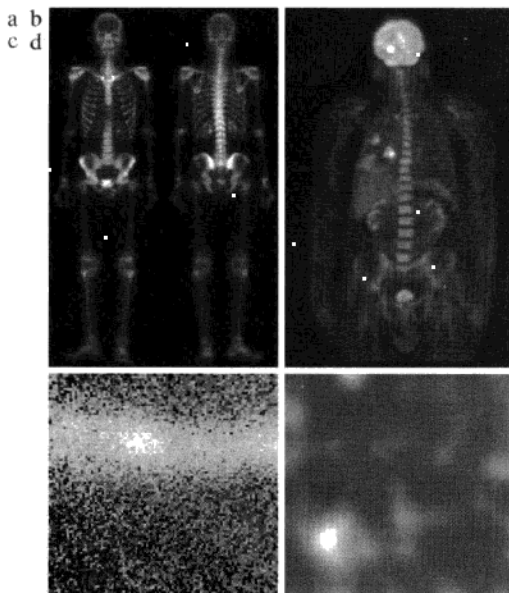


图 1.6 伽马射线成像实例：(a) 骨骼扫描图像；(b) PET 图像；(c) 天鹅星座环图像；(d) 来自反应堆真空管的伽马辐射 (亮点) [图 (a) 由 G. E. Medical Systems 公司提供，图 (b) 由 CTI PET Systems 公司的 Michael E. Casey 博士提供，图 (c) 由 NASA 提供，图 (d) 由密歇根大学的 Zhong He 和 David K. Wehe 教授提供]

1.3.2 X 射线成像

X 射线是最早用于成像的电磁辐射源之一。最熟悉的 X 射线应用是医学诊断，但是 X 射线还被广泛用于工业和其他领域，如天文学。用于医学和工业成像的 X 射线是由 X 射线管产生的，X 射线

管是带有阴极和阳极的真空管。阴极加热释放自由电子，这些电子以很高的速度向阳极流动，当电子撞击一个原子核时，能量被释放并形成 X 射线辐射。X 射线的能量由另一边的阳极电压控制，而 X 射线的数量由施加于阴极灯丝的电流控制。图 1.7(a) 显示了一幅大家熟悉的位于 X 射线源和对 X 射线能量敏感的胶片之间的病人胸部图像。X 射线的强度受射线穿过病人时的吸收量调制，最终能量落在胶片上并使胶片感光，这与光使得胶片感光的原理是一样的。在数字射线照相术中，数字图像可用两种方法得到：(1) 使用数字化的 X 射线胶片；(2) X 射线穿过病人身体后直接落到某个装置上(譬如荧光屏)，该装置把 X 射线转换为光信号。然后，转换而来的光信号由高灵敏度的数字系统捕获。第 2 章和第 4 章将详细地讨论数字化问题。

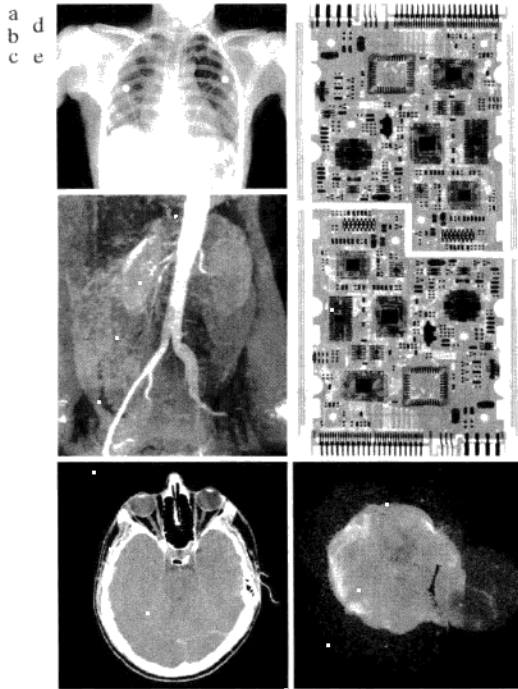


图 1.7 X 射线成像实例：(a) 胸部 X 射线图像；(b) 主动脉造影图像；(c) 头部 CT 图像；(d) 电路板图像；(e) 天鹅星座环图像 [图(a)和图(c)由 Vanderbilt 大学医学中心辐射学与放射学系的 David R. Pickens 博士提供，图(b)由密歇根大学医学院解剖学分部的 Thomas R. Gest 博士提供，图(d)由 Lixi 公司的 Joseph E. Pascente 先生提供，图(e)由 NASA 提供]

血管照相术是对比度增强辐射成像领域中的另一个主要应用。该过程用于得到血管的图像(称为血管造影照片)。一根导管(柔软且中空的小管)插入动脉或静脉，导管穿过血管并被引导到要研究的区域。当导管到达所研究的部位时，将 X 射线造影剂注入导管。这会增强血管的对比度，并可以让放射线学者观察到任何病变或阻塞。图 1.7(b) 显示了一个主动脉血管造影照片的例子。在图像的左下方，可以看到插入到血管中的导管。注意，在图像中，可看到造影剂流向肾脏时大血管的强烈对比效果。正如第 2 章将要讨论的那样，血管照相术是数字图像处理的主要应用领域，在该领域，图像相减用于进一步增强被研究的血管。

X 射线在医学成像中的另一个重要应用是计算机轴向断层(CAT)。由于该技术的分辨率和三维能力，CAT 扫描早在 20 世纪 70 年代第一次付诸使用时就引起了医疗手段的革命。正如 1.2 节提到的那样，每幅 CAT 图像都是垂直穿过病人的一个“切片”，当病人纵向移动时可产生大量的“切片”，这

些图像组合在一起就构成了人体内部的三维描绘图像，其纵向分辨率与切片数量成正比。图 1.7(c) 显示了一幅典型的头部 CAT 切片图像。

与刚刚讨论的有些类似的技术也可用于工业处理，但通常使用的是更高能量的 X 射线。图 1.7(d) 显示了一块电路板的 X 射线图像。这样的图像是 X 射线在上百种典型工业应用中的代表性图像，用于检测电路板中的制造缺陷，如元件缺失或断线等。当元件可被 X 射线穿透时，CAT 扫描很有用，譬如塑料元件，甚至更大的物体，如固体推进剂火箭发动机。图 1.7(e) 显示了天文学中 X 射线成像的一个例子。这幅图像是图 1.6(c) 中的天鹅星座环，但此时是 X 射线波段成像。

1.3.3 紫外波段成像

紫外“光”的应用多种多样，包括平板印刷术、工业检测、显微镜方法、激光、生物成像和天文观测等。我们仅用显微镜方法和天文观测作为例子来说明这一波段的成像。

紫外光用于荧光显微镜方法中，这是显微镜方法中发展最快的领域之一。荧光是在 19 世纪中叶发现的一种现象。当时，当紫外光直接照射到矿物质上时，首次发现萤石发出了荧光。紫外光本身并不可见，但当紫外辐射光子与荧光材料内原子中的电子碰撞时，它把电子提高到较高的能级，随后受激电子释放到较低的能级并以可见光范围内的低能光子形式发光。荧光显微镜方法的基本任务是用激发光照射一个样品，然后从较强的激发光中分离出较弱的荧光，这样，仅有辐射光到达人眼或其他检测器，以允许检测足够的对比度而得到照射在暗背景上的荧光区。非荧光材料的背景越暗，设备越有效。

荧光显微镜方法在研究可产生荧光的材料时确实是一种很优秀的方法，无论是以它们的自然形式(原发荧光)，还是经化学处理后具有荧光能力(次生荧光)。图 1.8(a) 和图 1.8(b) 显示了使用荧光显微镜方法所得到的典型结果。图 1.8(a) 显示了普通玉米的荧光显微镜图像，图 1.8(b) 显示了被一种谷类疾病“黑穗病”感染了了的玉米图像，黑穗病是草、洋葱、高粱等被 700 多种寄生真菌感染后出现的病害。玉米黑穗病是一种严重的病害，因为玉米是世界上最主要的食品来源之一。图 1.8(c) 显示了在紫外波段的高能区域成像的天鹅星座环。

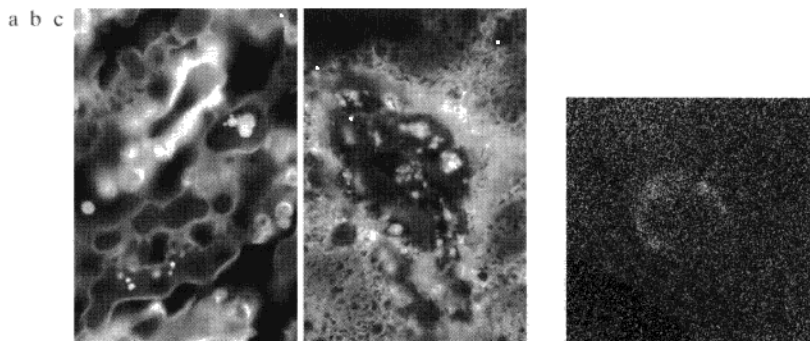


图 1.8 紫外光成像实例：(a) 普通玉米图像；(b) 患黑穗病的玉米图像；(c) 天鹅星座环图像
[图(a)和图(b)由佛罗里达州立大学的 Michael W. Davidson 博士提供，图(c)由 NASA 提供]

1.3.4 可见光及红外波段成像

由于电磁波谱可见光波段在所有波段中是我们最熟悉的，因此，这一波段的成像应用领域远远超过其他波段的成像应用领域就不足为奇了。红外波段常用于与可见光相结合成像，为便于说明，本节把可见光和红外光合并在一起讨论。下面的讨论将涉及光显微镜方法、天文学、遥感、工业和法律实施等方面的应用。

图 1.9 显示了一些可见光显微技术得到的图像。这些例子涵盖了从制药和微检测到材料特征的范围。甚至仅在显微镜方法中,其应用领域如此之多,以至于不能在这里详细列出。当然,把这些图像用于从增强到测量这些范围概念化可能并不困难。

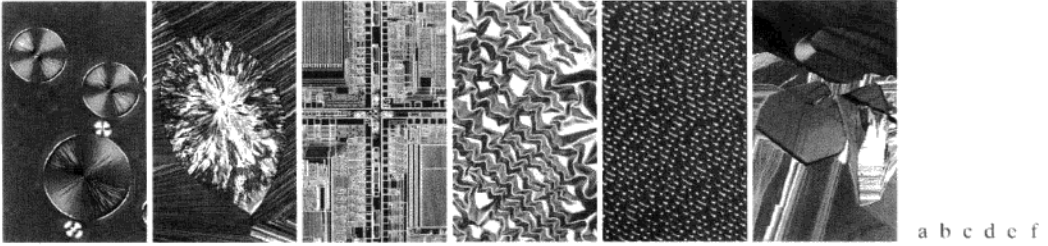


图 1.9 光显微镜图像实例:(a)已放大 250 倍的紫杉酚(抗癌剂);(b)已放大 40 倍的胆固醇;(c)已放大 60 倍的微处理器;(d)已放大 600 倍的镍氧化物胶片;(e)已放大 1750 倍的音频 CD 表面;(f)已放大 450 倍的有机超导体(这些图像由佛罗里达州立大学的 Michael W. Davidson 博士提供)

可见光处理的另一个主要应用领域是遥感,遥感通常包括可见光和红外波谱范围的一些波段。表 1.1 显示了 NASA 的 LANDSAT 卫星中的所谓主要波段。LANDSAT 卫星的主要功能是从空间获得并传送地球的图像,其目的是监测该行星的环境条件。波段用波长来表示, $1 \mu\text{m}$ 等于 10^{-6}m (我们讨论的是电磁波谱的波长范围,第 2 章将详细讨论)。注意表 1.1 中每个波段的特征与用途。

为了阐述这类多光谱成像的基本性能,考虑图 1.10,它为表 1.1 中的每个频谱波段显示了一幅图像。成像区域是美国华盛顿特区,包括建筑物、道路、植被和穿过城市的主要河流(波拖马可河)等特征。人口中心地区的图像常被用来评估人口增长和变迁方式、污染及其他有害环境的因素。可见光和红外光特征之间的区别在这些图像中是十分明显的。例如,在波段 4 和波段 5 中,从其周围环境可以看出如何较好地界定河流。

表 1.1 NASA 的 LANDSAT 卫星的主要波段

波段号	名称	波长(μm)	特征和用途
1	可见蓝光	0.45-0.52	对水体有最大的穿透性
2	可见绿光	0.52-0.60	适用于度量植物活力
3	可见红光	0.63-0.69	植被辨别
4	近红外光	0.76-0.90	生物团和海岸线测绘
5	中红外光	1.55-1.75	土壤和植被含水量
6	热红外光	10.4-12.5	土壤温度,热量测绘
7	中红外光	2.08-2.35	矿物测绘

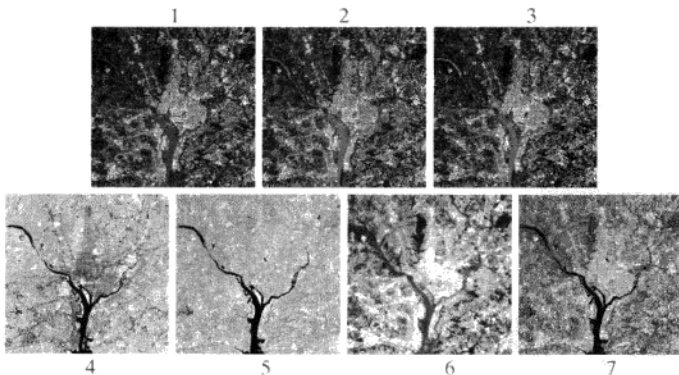


图 1.10 美国华盛顿特区的 LANDSAT 卫星图像。图中的数字与表 1.1 中的波段号对应(图像由 NASA 提供)

天气观测与预报也是卫星多光谱成像的主要应用领域。例如,图1.11是由美国国家海洋和大气管理(NOAA)卫星在可见光及红外波段使用传感器拍摄的飓风图像,该图像中的飓风眼清晰可见。

图 1.12 和图 1.13 显示了红外成像的一个应用。这些图像是“全世界夜间灯光”数据集的一部分,它可以提供全球人类居住区的汇总情况。图像是由安装在 NOAA DMSP(防卫气象卫星计划)卫星上的红外成像系统生成的。红外成像系统工作于 $10.0\sim 13.4\ \mu\text{m}$ 波段,具有独特的功能,可观察地球表面微弱的接近可见光的近红外发射光,包括城市、小镇、村庄、气体火焰及火光。即使在图像处理方面没有正式地训练过,编写一个计算机程序,用这些图像来估计世界不同地区使用电能的百分比也并不困难。

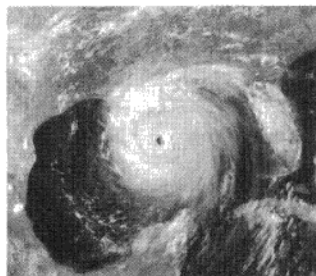


图 1.11 2005 年 8 月 29 日拍摄的“卡特里娜”飓风的卫星图像(图像由 NOAA 提供)

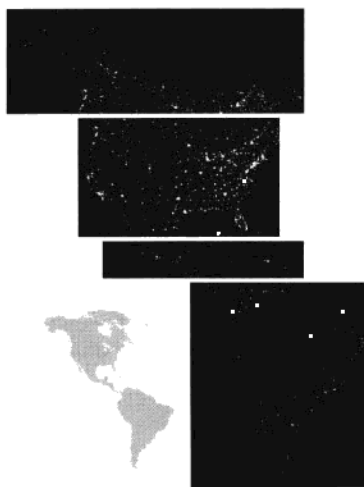


图 1.12 美洲的红外卫星图像。小灰色图仅供参考(图像由 NOAA 提供)



图 1.13 世界居住区的红外卫星图像。小灰色图仅供参考(图像由 NOAA 提供)

可见光谱中的一个主要成像领域是生产产品的自动视觉检测。图1.14显示了一些例子。图1.14(a)是 CD-ROM 驱动器的一个控制板。对这类产品的一种典型图像处理任务是检测丢失的部件(图像右上角 $1/4$ 处的黑色方块是一个丢失部件的例子)。图 1.14(b)是药丸胶囊的图像,这里的目标是用机器寻找缺失的药丸。图 1.14(c)显示了一种应用,在该应用中,图像处理技术用来寻找未装满到要求液位的瓶子。图 1.14(d)显示了一个清澈的塑料部件,部件内带有不可接受数量的气泡。这些异常检测是工业检测的主旨,这类检测也涉及其他产品,如木材和布匹。图 1.14(e)显示了一批谷物,通过颜色和存在的异常(如变黑的小片)等进行检测。最后,图 1.14(f)显示了一幅含有掺杂物的目镜图像(位于人眼处的镜头),使用了一种“结构光”照明技术加以突出,以便更容易检测平面镜头中心处出现的镜头畸变。在类似钟表表盘的 1 点和 5 点处的刻痕是由钳子造成的损坏,而其他的多数小斑点则是残片。这类检测的目标是在包装之前自动找出损坏的或未正确加工的装配。

作为可见光谱中图像处理的最后说明,考虑图 1.15。图 1.15(a)显示了一幅拇指指纹图像。指纹图像通常由计算机处理,该处理不是增强指纹图像就是寻找特征,以便自动搜索数据库,寻找潜在的匹配。图 1.15(b)显示了一幅纸币图像。数字图像处理在该领域的应用包括自动计数、法律实施、为

追踪和鉴别钱币读取序列号等。图 1.15(c)和图 1.15(d)所示的两幅汽车图像是自动读取车牌的例子。明亮的矩形指示成像系统检测车牌的区域。黑色的矩形显示了系统自动读取车牌内容后的结果。车牌和其他字符识别广泛用于交通监测和监视中。

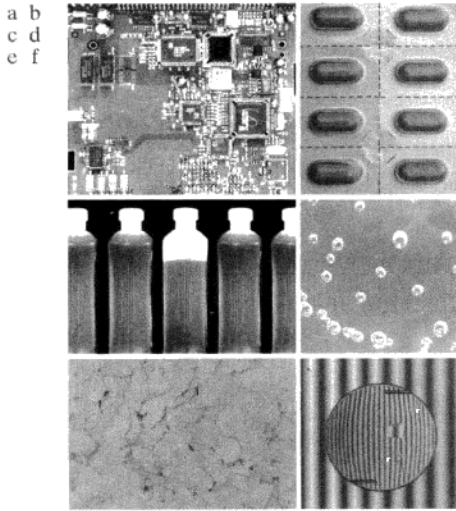


图 1.14 使用数字图像处理技术检查产品的一些例子：
(a)一块电路板控制器图像；(b)封装的药丸
图像；(c)瓶子图像；(d)清澈的塑料产品中的
气泡图像；(e)谷物图像；(f)目镜杂物图像
[图(f)由 Perceptics 公司的 Pete Sites 先生提供]

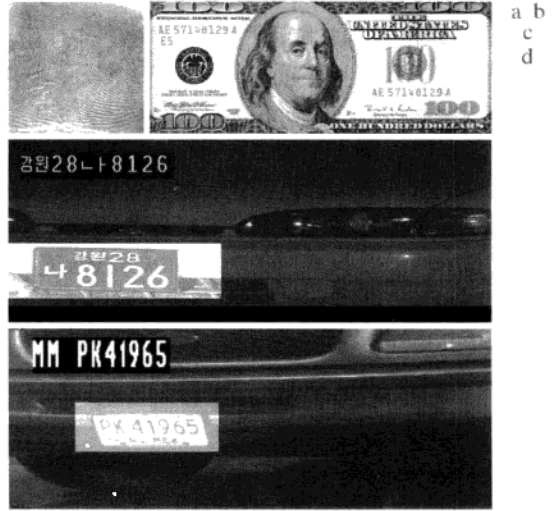


图 1.15 可见光谱成像的其他几个例子：(a)拇指指纹图
像；(b)纸币图像；(c)~(d)自动读取车牌图像
[图(a)由美国国家标准与技术研究所提供，图(c)
和图(d)由 Perceptics 公司的 Juan Herrera 博士提供]

1.3.5 微波波段成像

微波波段成像的典型应用是雷达。成像雷达的独特之处是在任何范围和任何时间内，不考虑气候、周围光照条件的收集数据的能力。某些雷达波可以穿透云层，在一定条件下还可以穿透植被、冰层和极干燥的沙漠。在许多情况下，雷达是探测地球表面不可接近地区的唯一方法。成像雷达的工作原理就像一台闪光照相机，它自己提供照明(微波脉冲)去照亮地面上的一个区域，并得到一幅快照图像。与照相机镜头不同，雷达使用天线和数字计算机记录图像。在雷达图像中，能看到的只是反射到雷达天线的微波能量。

图 1.16 显示了一幅西藏东南方高低不平山区的星载雷达图像，拉萨市约在东边 90 km 处，右下角是广阔的拉萨河谷，这是西藏农民和牧民包括曼巴居住的地方。这一地区的山峰海拔高度约为 5800 m，其谷底位于海拔 4300 m 处。注意，图像的清晰度和细节未被云层及其他大气条件阻挡，通常这些因素在可见光波段会影响图像。

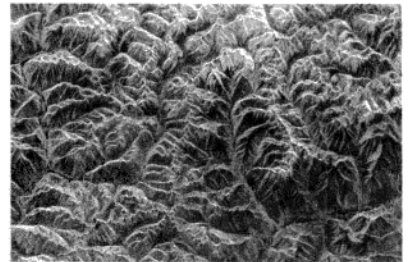


图 1.16 西藏东南部山区的星载雷达
图像(图像由 NASA 提供)

1.3.6 无线电波段成像

正像波谱另一端(伽马射线)的成像情况那样，无线电波段成像主要应用于医学和天文学。在医学中，无线电波用于核磁共振成像(MRI)。该技术是把病人放在强磁场中，并让无线电波短脉冲通过

病人的身体，每个脉冲将导致由病人的组织发射的无线电响应脉冲，这些信号发生的位置和强度由计算机确定，从而产生病人的一幅二维剖面图像。MRI 可以在任何平面产生图像。图1.17显示了人的膝盖和脊椎的图像。

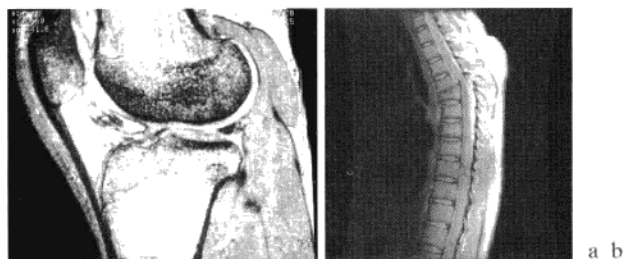


图 1.17 人的 MRI 图像：(a)膝盖图像；(b)脊椎图像 [图(a)由密歇根大学医学院解剖学分部的 Thomas R. Gest 博士提供，图(b)由 Vanderbilt 大学医学中心辐射学与放射学系的 David R. Pickens 博士提供]

图1.18最右边的图像显示了无线电波段的蟹状脉冲星(Crab Pulsar)图像，为了进行有意义的比较，还显示了使用前面讨论的一些波段拍摄的相同区域的图像。注意，每一幅图像都给出了完全不同的脉冲星“视图”。

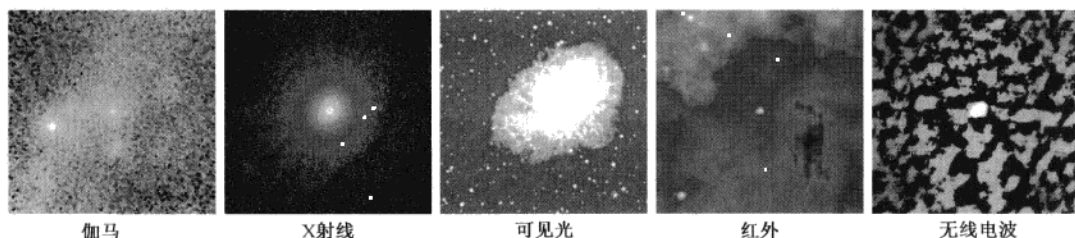


图 1.18 覆盖电磁波谱的(位于图像中心的)蟹状脉冲星图像(图像由 NASA 提供)

1.3.7 使用其他成像方式的例子

虽然电磁波谱成像一直占主导地位，但大量的其他成像方式也很重要。特别地，本节讨论声波成像、电子显微镜方法和(由计算机产生的)合成成像。

利用“声音”成像在地质勘探、工业和医学中得到了应用。地质应用采用的是声谱中的低端声波(几百赫兹)，其他应用领域的成像使用超声波(百万赫兹)。图像处理在地质中的最重要商业应用是矿产和石油勘探。为了透过地表获取图像，主要方法之一是利用一辆大型卡车和一个大的钢制平板，平板由卡车压在地面上，同时卡车以 100 Hz 的频率振动。返回声波的强度和速度由地表下面的成分决定。这些声波经过计算机分析后，可由分析结果生成图像。

为了从海洋获取图像，能源通常由两个位于船后部的空气枪组成。返回的声波由置于船后部电缆中的水听器检测，电缆不是放置在海底，就是用浮子悬吊着(垂直电缆)。两把空气枪交替加压至 2000 psi (磅/平方英寸)左右，然后使之爆发。船的匀速运动提供了横向运动，这种横向运动与返回的声波一起产生一幅海洋底部地下的合成三维图像。

图1.19显示了一个周知的三维模型的剖面图像，与此图像对照，测试地震成像算法的性能。箭头指向碳氢化合物(油或气)的油气阱。这一目标比周围地层明亮，因为目标区域内的密度变化较大。地震解释人员寻找这些亮点来发现油气。上面的地层也是亮的，但其亮度变化不像对面地层的亮度那样强。许多地震重建算法由于以上缺点使得对该目标成像比较困难。

虽然超声波成像常用于制造业,但这一技术最为熟知的应用是在医学领域,特别是妇产科。在妇产科,医生对未出生的胎儿成像,以确定其发育的健康状况。这一检测的副产品是确定胎儿的性别。超声波图像是利用下面的基本步骤生成的:

1. 超声波系统(一台计算机、由超声波源和接收器组成的超声波探头及一台显示器)向人体发射高频(1~5 MHz)声波脉冲。
2. 声波传入体内并碰撞组织间的边界(举例来说,就是流体和软组织之间的边界,及软组织和骨骼之间的边界)。一部分声波反射回探头;一部分声波则继续传播,直到它们到达另一个边界并被反射。
3. 反射波被探头拾取并传给计算机。
4. 计算机根据声波在组织中的传播速度(1540 m/s)和每个回波的返回时间,计算从探头到组织或器官边界的距离。
5. 系统在屏幕上显示回波的距离和亮度,形成一幅二维图像。

在典型的超声波成像中,每秒钟有上百万个脉冲与回波发出和接收。探头可沿身体表面以不同角度运动,以便得到各种观察图像。图1.20显示了几个例子。

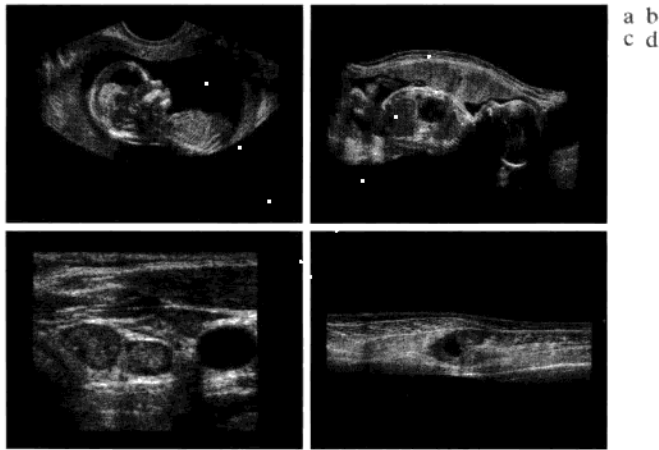


图 1.20 超声波成像示例:(a)胎儿图像;(b)胎儿的另一幅观察图像;(c)甲状腺图像;(d)有损伤的肌肉层图像(原图像由 Siemens Medical Systems 公司的 Ultrasound Group 提供)

我们继续使用电子显微镜方法的某些例子来讨论成像方式。电子显微镜的功能与光学显微镜一样,只不过是使用一个聚焦的电子波束代替光束形成图像标本。电子显微镜的操作包括下面几个基本步骤:由电子源产生一个电子流,用正电势朝着标本加速。该电子束用金属小孔和电磁透镜限制并聚焦为一个细的单色波束。然后使用一个磁透镜将单色电子束聚焦到样本上。在样本内部产生交互照射并影响电子束。这些交互作用和影响被检测并转换为一幅图像,这种方式与光被物体反射或吸收的方式一样。所有电子显微镜均执行这些基本步骤。

透射电子显微镜(TEM)的工作原理很像一台幻灯片投影仪。投影仪发射出一束透过幻灯片的

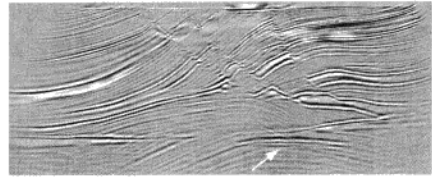


图 1.19 地震模型的剖面图像。箭头指向碳氢化合物(油或气)的油气阱(图像由美国 Sandia 国家实验室的 Curtis Ober 博士提供)

光；当光通过幻灯片时，它由幻灯片的内容调节。这一发射出的光束然后被投射到观察屏上，形成幻灯片的放大图像。除了发射的是一个电子束通过样本(相当于幻灯片)之外，TEM 以相同的方式工作。穿过样本的部分电子束被投射到荧光屏上，而电子与荧光物质的相互作用就产生了光，从而得到可观察的图像。另一方面，扫描电子显微镜(SEM)实际上扫描电子束并记录每一位置上电子束与样本的相互作用。这会在荧光屏上产生一个点。一幅完整的图像由通过样本的电子束光栅扫描形成，这非常像电视摄像机。电子与荧光屏相互作用并产生光。SEM 适合于“大块”样品，而 TEM 要求非常薄的样品。

电子显微镜有非常高的放大能力。光学显微镜的放大倍数限制在 1000 左右，电子显微镜的放大倍数可达到 10 000 或更大。图1.21 显示了两幅由于过热而造成损坏的样本图像。

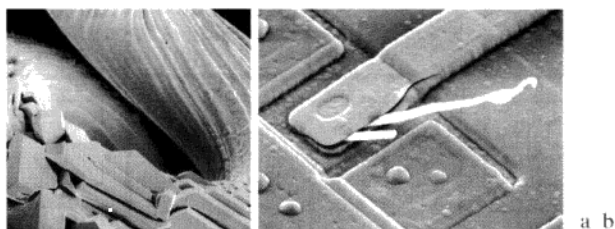


图 1.21 (a) 因过热而损坏的钨丝放大 250 倍的 SEM 图像(注意左下方的碎片)；(b) 已损坏集成电路的 2500 倍 SEM 图像。白色纤维是由热破坏造成氧化的结果 [图(a)由俄勒冈大学地质科学系的 Michael Shaffer 先生提供，图(b)由加拿大 McMaster 大学的 J. M. Hudak 博士提供]

下面我们通过简略浏览一些图像来结束对成像模式的讨论，这些图像不是来自物理对象，而是用计算机产生的。分形是由计算机生成图像的显著例子(Lu[1997])。基本上，分形只不过是一种基本模式根据某些数学规则的迭代复制。例如，“贴瓷砖”是产生分形图像的最简方法之一。一个方块可细分为 4 个小方块，每个小方块又可进一步细分为 4 个更小的方块，等等。为了填充每个小方块，根据规则的复杂性，一些漂亮的瓷砖图像可用这一方法产生。当然，几何形状可以是任意的。例如，分形图像可以从一个中心点向外辐射生长。图 1.22 (a) 显示了使用这种方法生成的分形图像。图 1.22 (b) 显示了另一幅分形图像(“月球表面”)，它为前述章节所用过的空间图像提供了一个有趣的模拟。

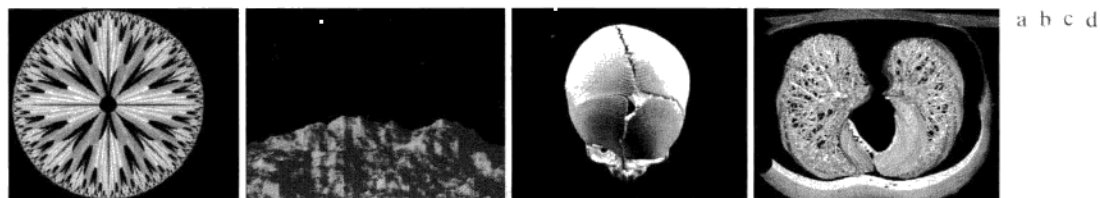


图 1.22 (a)~(b) 分形图像；(c)~(d) 由所示物体的三维计算机模型生成的图像 [图(a)和图(b)由 Swarthmore 学院的 Melissa D. Binde 先生提供，图(c)和图(d)由 NASA 提供]

分形图像朝着具有艺术性的，并根据某一规则的子图像元素生长的数学公式表示的方向发展。它们有时会用做随机纹理。借助于计算机生成更结构化的图像依赖于三维建模。三维建模是图像处理 and 计算机图形学的交叉领域，也是许多三维可视化系统(如光模拟器)的基础。图 1.22 (c) 和图 1.22 (d) 显示了计算机生成的图像例子。因为原始物体是以三维方式创建的，所以可以在任何角度由三维物体的平面投影来生成图像。这种类型的图像可用于医学培训及其他主要应用，如刑事法庭和需要产生特殊效果的场合。

1.4 数字图像处理的基本步骤

把后续各章涉及的内容划分为 1.1 节定义的两个主要类别是有帮助的：一类是其输入和输出都是图像；另一类是其输入可能是图像但输出是从这些图像中提取的属性。这种组织结构总结于图 1.23 中。该图并不意味着每种处理都用于图像。相反，目的是给出所有方法的一个概念，这些方法可以针对不同的目的、不同的目标运用于图像。这一节的讨论也可以看成是本书其余部分内容的综述。

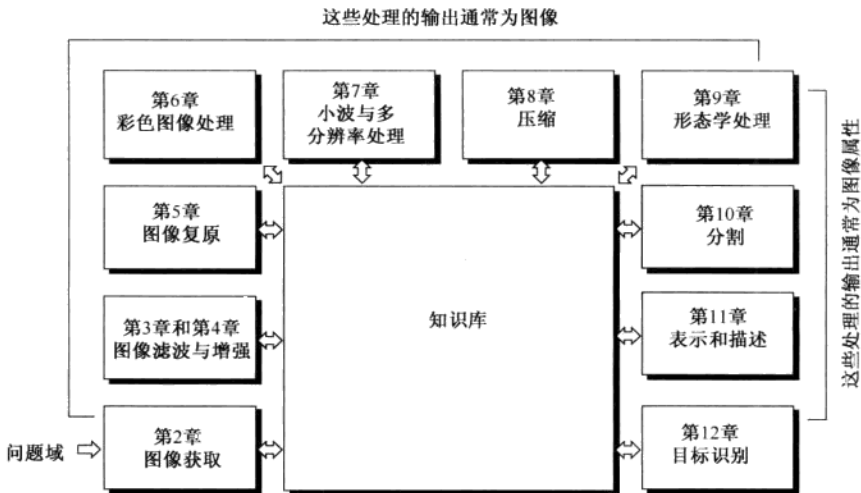


图 1.23 数字图像处理的基本步骤，方框中指出的章号是方框中讨论内容的位置

图像获取是图 1.23 中的第一步处理。1.3 节的讨论给出了关于数字图像起源的一些提示。这个主题在第 2 章中将更具体地进行研究，这一章还要介绍一些贯穿全书的基本数字图像的概念。注意，图像获取与给出一幅数字形式的图像一样简单。通常，图像获取阶段包括图像预处理，譬如图像缩放。

图像增强是对一幅图像进行某种操作，使其结果在特定应用中比原始图像更适合进行处理。特定一词在这里很重要，因为一开始增强技术就建立在面向问题的基础之上。例如，对于增强 X 射线图像十分有用的方法，对于增强电磁波谱中红外波段获取的卫星图像可能就不是最好的方法。

没有图像增强的通用“理论”。当为视觉解释而处理一幅图像时，观察者就是特殊方法工作好坏的最终裁判者。增强技术是如此多种多样，以至于有众多不同的图像处理方法，因此在没有广泛背景介绍的情况下，在一章中组织出适合于增强技术有意义的主体是很困难的。基于这个原因，也基于图像处理领域的初学者通常看到图像增强应用在视觉上是很吸引人的、有趣的且理解起来相对简单的，所以在第 2 章、第 3 章和第 4 章中，当我们介绍新概念时，都会以图像增强作为例子。后两章中的内容涉及许多用于增强图像的传统方法。因此，使用来自图像增强的例子介绍早些章节阐述的新图像处理方法，不仅节省了本书处理图像增强的额外章节，而且更重要的是，对于向新学习者介绍本书早期处理技术细节也是有效的方法。然而，正像您将看到的本书其余内容的进展那样，这些章节阐述的内容可应用于比图像增强宽泛得多的问题。

图像复原也是改进图像外观的一个处理领域。然而，与图像增强不同，图像增强是主观的，而图像复原是客观的；在某种意义上说，复原技术倾向于以图像退化的数学或概率模型为基础。另一方面，增强以什么是好的增强效果这种人的主观偏爱为基础。

彩色图像处理已经成为一个重要领域，因为互联网上数字图像的使用在在不断增长。第 6 章涵

盖了许多彩色模型和数字域的彩色处理的基本概念。在后续各章中,彩色也是提取图像中感兴趣特征的基础。

小波是以不同分辨率来描述图像的基础。特别是,本书中为图像数据压缩和金字塔表示使用了小波,在这里,图像被成功地细分为较小的区域。

正如其名称指出的那样,压缩指的是减少图像存储量或降低传输图像带宽的处理。虽然存储技术在过去的10年里已有明显改进,但对于传输能力我们还不能这样说。尤其在互联网的应用上更是如此,互联网是以大量图片内容为特征的。多数计算机用户都很熟悉(也许并未注意)图像压缩所用的图像文件扩展名,如JPG文件扩展名用于JPEG(联合图片专家组)图像压缩标准。

形态学处理涉及提取图像分量的工具,这些分量在表示和描述形状方面很有用。正如1.1节所指出的那样,这一章的内容将从输出图像处理到输出图像属性处理的转换开始。

分割过程将一幅图像划分为它的组成部分或目标。通常,自动分割是数字图像处理中最困难的任务之一。成功地把目标逐一识别出来是一个艰难的分割过程。另一方面,很弱的且不稳定的分割算法几乎总是会导致最终失败。通常,分割越准确,识别越成功。

表示与描述几乎总是在分割阶段的输出之后,通常这一输出是未加工的像素数据,这些数据不是构成一个区域的边界(即分隔一个图像区域与另一个图像区域的像素集合),就是构成该区域本身的所有点。无论哪种情况,把数据转换成适合计算机处理的形式都是必要的。首先,必须确定数据是应表示为一条边界还是应表示为整个区域。如果关注的是外部形状特征,譬如角点和拐点,则表示为边界是合适的。如果我们关注的是内部特性,例如纹理或骨架形状,则区域表示是合适的。在某些应用中,这些表示彼此是互补的。选择一种表示仅是解决把原始数据转换为适合计算机进行后续处理的形式的一部分。为了描述数据以使感兴趣的特征更明显,必须确定一种方法。描述又称为特征选择,涉及提取特征,它可得到某些感兴趣的定量信息,或是区分一组目标与其他目标的基础。

识别是基于目标的描述给该目标赋予标志(譬如“车辆”)的过程。如1.1节详细介绍的那样,我们通过阐述识别个别目标的方法来结束数字图像处理的讨论。

到目前为止,我们还没有谈到关于先验知识及图1.23中知识库与各个处理模块之间的关系的内容。有关问题域的知识已经以知识库的形式编码并存入图像处理系统中。这一知识可能像一幅图像详细描述区域那样简单,在这里定位已知的感兴趣的信息,可将限制性的搜索引导到要寻找的信息处。知识库也可能相当复杂,如材料检测问题中所有主要缺陷的相关列表,或者包含变化检测应用中一个区域的高分辨率卫星图像的图像数据库。除了引导每个处理模块的操作外,知识库还要控制模块之间的交互。这一特性由图1.23中处理模块和知识库之间的双头箭头表示,而单头箭头则用于连接处理模块。

虽然没有专门地讨论图像显示,但要记住图像显示是很重要的,观察图像处理的结果可在图1.23中的任何阶段的输出处执行。还应注意,不是所有的图像处理应用都需要图1.23给出的复杂交互。事实上,在某些情况下甚至并不需要所有这些模块。例如,用于人眼视觉解释的图像增强就很少要求使用图1.23中的任何其他步骤。然而,通常随着图像处理任务复杂性的增加,需要做更多处理才能解决问题。

1.5 图像处理系统的组成

20世纪80年代中叶,世界各地售出的各种型号的图像处理系统,基本上都是由许多主机及与这些主机配套的外设组成的。20世纪80年代末90年代初,市场已转为将图像处理硬件设计为与工业标准总线兼容,并能配合工程工作站机箱和个人计算机的单板形式。除了降低成本外,这一市场转型还如催化剂一样催生了大量的新公司,这些公司的任务是开发用于图像处理的软件。

虽然针对如处理卫星图像的大规模图像应用的大型图像处理系统一直在出售,但趋势是朝着小型化和通用化的小型机并带有专用图像处理硬件的混合型系统方向发展。图1.24显示了用于数字图像处理的一个典型通用系统的组成。下面几段讨论每个组件的功能,从图像感知开始。

关于感知,需要两个部件来获取数字图像。第一个部件是物理设备,该设备对我们希望成像的目标辐射的能量很敏感。第二个部件称为数字化器,数字化器是一种把物理感知装置的输出转换为数字形式的设备。例如,在数字视频摄像机中,传感器产生一个与光强成正比的输出,数字化器把该输出转换为数字数据。这些主题包含在第2章中。

专用图像处理硬件通常由刚刚谈到的数字化器与执行其他原始操作的硬件[如算术逻辑单元(ALU)]组成,算术逻辑单元对整个图像并行执行算术与逻辑运算。如何使用ALU的一个例子是与数字化一样快的图像取平均操作,这一操作的目的是降低噪声。这种类型的硬件有时称为前端子系统,其显著特点是速度快。换句话说,该单元执行要求快速数据吞吐的功能(譬如以30帧/秒的速率来数字化和平均视频图像),典型的主机不能胜任该工作。

图像处理系统中的计算机是通用计算机,其范围从PC到超级计算机。有时在专门应用中也采用特殊设计的计算机,以达到所要求的性能水平。但是,这里感兴趣的还是通用图像处理系统。在这些系统中,几乎任何配置较好的PC对于离线图像处理任务都是适合的。

图像处理软件由执行特定任务的专用模块组成。一个设计优良的软件包还包括为用户写代码的能力,例如,最小化就可以使用专用模块。更完善的软件包允许那些模块的集成,并至少用一种计算机语言编写通用软件命令集。

大容量存储能力在图像处理应用中是必需的。一幅图像的尺寸是 1024×1024 像素,每像素的灰度是8比特,如果图像不压缩,则需要1MB的存储空间。在处理几千幅甚至几百万幅图像时,在图像处理系统中提供足够的存储空间将是一个极大的挑战。图像处理应用的数字存储分为三个主要的类别:(1)处理期间的短期存储;(2)关系到快速调用的在线存储;(3)档案存储,其特点是不频繁访问。存储是以字节(8比特)、千字节(1000字节)、兆字节(100万字节)、吉字节(10亿字节)或太字节(TB)来计量的。

提供短期存储的一种方法是使用计算机内存。另一种方法是采用专用的存储板,这种存储板称为帧缓存,它们可以存储一帧或多帧图像并可快速访问,通常以视频速率(30帧/秒)访问。后一种方法实质上允许瞬时缩放、滚动(垂直移动)和摇动(水平移动)图像。帧缓冲器通常放在专用图像处理硬件单元中,如图1.24所示。在线存储通常采用磁盘或光介质存储。在线存储的关键特性参数是对存储数据的访问频率。最后,档案存储是以大容量存储要求为特征的,但无须频繁访问。放在类似于投币电唱机的盒子内的磁带和光盘是通常使用的档案存储介质。

今天使用的图像显示器主要是彩色电视监视器(更好一些的是平面屏幕)。监视器由图像和图形显示卡的输出驱动,它们是计算机系统的一个集成部分。对于图像显示应用不可能没有这样的要求,即作为计算机系统的一部分,其显示卡应满足商用性要求,在有些情况下还要求立体显示。立体显示是采用戴在用户头上的目镜上嵌有的两个小的显示屏的头盔来实现的。

用于记录图像的硬拷贝设备包括激光打印机、胶片相机、热敏装置、喷墨装置和数字单元,如CD-ROM等。胶片的分辨率最高,但纸作为书写材料是首选的介质。为了表现图像,图像可显示在透明胶片上,或者使用图像投影设备显示在数字介质中。后者作为图像表现的标准正在被逐步接受。

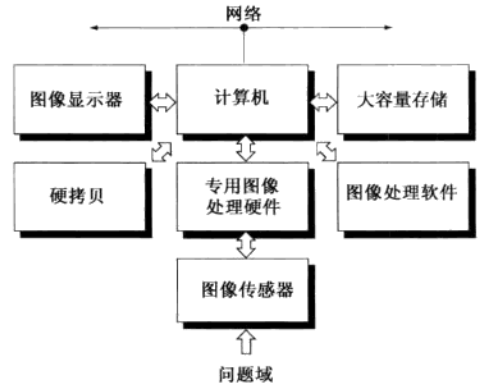


图 1.24 通用图像处理系统的组成

网络在今天所用的计算机系统中几乎都是默认的功能。因为大数据量在图像处理应用中是固有的,在图像传输中主要考虑的问题是带宽。在专用网络中,这不是一个典型问题,但通过互联网的远程通信就不总是有效的了。幸运的是,随着光纤与其他宽带技术的发展,这一状况正在迅速得到改善。

小结

本章呈现的材料的主要目的是对数字图像处理的起源、重要意义、该技术当前及未来的应用领域提供概括性的介绍。由于篇幅所限,本章中涉及主题的覆盖面必然不太全面,但是在数字图像处理的知识宽度和应用范围方面应该已经给读者留下了一个清晰的印象。在后面的章节中,将进行图像处理的理论和应用方面的阐述,并提供大量的实例,以进一步理解这些技术的应用。学完本书的最后一章后,读者应能了解数字图像处理领域的大多数当前研究进展情况。

参考文献

后续各章末尾的参考资料致力于那些章节讨论的特定话题,并在本书末尾对参考书提供了线索。然而,为了在这一章集中汇总一下关于图像处理和主题的材料,我们采用不同的方式列出主要杂志。这里还提供了—个书目列表,以便读者可以快速了解本领域的历史和当前的发展动态。这一章引用的参考材料主要是图像处理方面的一般性的、易于理解的已出版文献。

关于图像处理及相关题目的主要参考杂志包括: *IEEE Transactions on Image Processing*; *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*; *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* (1991年前); *Computer Vision and Image Understanding*; *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*; *Artificial Intelligence*; *Pattern Recognition*; *Pattern Recognition Letters*; *Journal of the Optical Society of America* (1984年前); *Journal of the Optical Society of America-A: Optics, Image Science and Vision*; *Optical Engineering*; *Applied Optics Information Processing*; *IEEE Transaction on Medical Imaging*; *Journal of Electronic Imaging*; *IEEE Transactions on Information Theory*; *IEEE Transactions on Communications*; *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*; *Proceedings of the IEEE*; 以及1980年前的 *IEEE Transactions on Computer* 专刊。国际光学工程协会(SPIE)的出版物也很重要。

下面按出版年份反序列出了包含有数字图像处理补充材料的书籍(偏重于近年来出版的书籍)。这些书籍给出了该领域过去30多年来的发展概述,同时选择了各种形式的论著。它们的覆盖范围从基础理论的教科书,到提供技术综述的手册,以及包含该领域当前研究的代表性材料的编辑书籍。

Prince, J. L. and Links, J. M. [2006]. *Medical Imaging, Signals, and Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Bezdek, J. C. et al. [2005]. *Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing*, Springer, New York.

Davies, E. R. [2005]. *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.

Rangayyan, R. M. [2005]. *Biomedical Image Analysis*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Umbaugh, S. E. [2005]. *Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Gonzalez, R. C., Woods, R. E., and Eddins, S. L. [2004]. *Digital Image Processing Using MATLAB*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Snyder, W. E. and Qi, Hairong [2004]. *Machine Vision*, Cambridge University Press, New York.

Klette, R. and Rosenfeld, A. [2004]. *Digital Geometry—Geometric Methods for Digital Picture Analysis*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.

- Won, C. S. and Gray, R. M. [2004]. *Stochastic Image Processing*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Soille, P. [2003]. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York.
- Dougherty, E. R. and Lotufo, R. A. [2003]. *Hands-on Morphological Image Processing*, SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. [2002]. *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Forsyth, D. F. and Ponce, J. [2002]. *Computer Vision—A Modern Approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Duda, R. O., Hart, P. E., and Stork, D. G. [2001]. *Pattern Classification*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Pratt, W. K. [2001]. *Digital Image Processing*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Ritter, G. X. and Wilson, J. N. [2001]. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Shapiro, L. G. and Stockman, G. C. [2001]. *Computer Vision*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Dougherty, E. R. (ed.) [2000]. *Random Processes for Image and Signal Processing*, IEEE Press, New York.
- Etienne, E. K. and Nachtgaeel, M. (eds.) [2000]. *Fuzzy Techniques in Image Processing*, Springer-Verlag, New York.
- Goutsias, J., Vincent, L., and Bloomberg, D. S. (eds.) [2000]. *Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing*, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA.
- Mallot, A. H. [2000]. *Computational Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Marchand-Maillet, S. and Sharaiha, Y. M. [2000]. *Binary Digital Image Processing: A Discrete Approach*, Academic Press, New York.
- Mitra, S. K. and Sicuranza, G. L. (eds.) [2000]. *Nonlinear Image Processing*, Academic Press, New York.
- Edelman, S. [1999]. *Representation and Recognition in Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W. [1999]. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley & Sons, New York.
- Mather, P. M. [1999]. *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction*, John Wiley & Sons, New York.
- Petrou, M. and Bosdogianni, P. [1999]. *Image Processing: The Fundamentals*, John Wiley & Sons, UK.
- Russ, J. C. [1999]. *The Image Processing Handbook*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL.
- Smirnov, A. [1999]. *Processing of Multidimensional Signals*, Springer-Verlag, New York.
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R. [1999]. *Image Processing, Analysis, and Computer Vision*, PWS Publishing, New York.
- Haskell, B. G. and Netravali, A. N. [1997]. *Digital Pictures: Representation, Compression, and Standards*, Perseus Publishing, New York.
- Jahne, B. [1997]. *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*, Springer-Verlag, New York.
- Castleman, K. R. [1996]. *Digital Image Processing*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Geladi, P. and Grahn, H. [1996]. *Multivariate Image Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- Bracewell, R. N. [1995]. *Two-Dimensional Imaging*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

- Sid-Ahmed, M. A. [1995]. *Image Processing: Theory, Algorithms, and Architectures*, McGraw-Hill, New York.
- Jain, R., Rangachar, K., and Schunk, B. [1995]. *Computer Vision*, McGraw-Hill, New York.
- Mitiche, A. [1994]. *Computational Analysis of Visual Motion*, Perseus Publishing, New York.
- Baxes, G. A. [1994]. *Digital Image Processing: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. [1992]. *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Haralick, R. M. and Shapiro, L. G. [1992]. *Computer and Robot Vision*, vols. 1 & 2, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Pratt, W. K. [1991] *Digital Image Processing*, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York.
- Lim, J. S. [1990]. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Jain, A. K. [1989]. *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Schalkoff, R. J. [1989]. *Digital Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, New York.
- Giardina, C. R. and Dougherty, E. R. [1988]. *Morphological Methods in Image and Signal Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Levine, M. D. [1985]. *Vision in Man and Machine*, McGraw-Hill, New York.
- Serra, J. [1982]. *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New York.
- Ballard, D. H. and Brown, C. M. [1982]. *Computer Vision*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Fu, K. S. [1982]. *Syntactic Pattern Recognition and Applications*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Nevatia, R. [1982]. *Machine Perception*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Pavlidis, T. [1982]. *Algorithms for Graphics and Image Processing*, Computer Science Press, Rockville, MD.
- Rosenfeld, A. and Kak, A. C. [1982]. *Digital Picture Processing*, 2nd ed., vols. 1 & 2, Academic Press, New York.
- Hall, E. L. [1979]. *Computer Image Processing and Recognition*, Academic Press, New York.
- Gonzalez, R. C. and Thomason, M. G. [1978]. *Syntactic Pattern Recognition: An Introduction*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Andrews, H. C. and Hunt, B. R. [1977]. *Digital Image Restoration*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Pavlidis, T. [1977]. *Structural Pattern Recognition*, Springer-Verlag, New York.
- Tou, J. T. and Gonzalez, R. C. [1974]. *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Andrews, H. C. [1970]. *Computer Techniques in Image Processing*, Academic Press, New York.