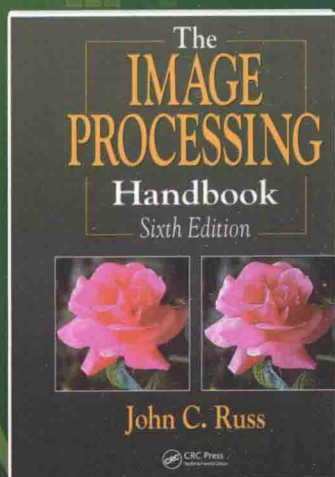


国外电子与通信教材系列

 CRC Press
Taylor & Francis Group

数字图像处理 (第六版)

The Image Processing Handbook
Sixth Edition



[美] John C. Russ 著

余翔宇 等译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

数字图像处理

(第六版)

The Image Processing Handbook
Sixth Edition

[美] John C. Russ 著

余翔宇 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

这是一本关于图像处理基本原理及其具体应用的图书,是作者多年来教学、科研与应用的总结。全书共15章,内容贯穿从图像获取到应用的整个过程,具体包括图像获取、人类视觉、打印和存储、成像缺陷修正、空间域图像增强、频率域图像处理、分割和阈值处理、二值图像处理、全局图像测量、特定特征的测量、形状表征、特征识别与分类、层析成像、三维可视化、表面成像。本书的特色是,着重于各种图像处理方法的介绍与比较,并使用实例进行演示与说明。

本书的读者对象是信号与信息处理、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。

The Image Processing Handbook, Sixth Edition, John C. Russ

ISBN: 978-0-1323-4563-7

Copyright © 2011 by Taylor and Francis Group, LLC.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. Publishing House of Electronics Industry is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书原版由Taylor & Francis出版集团旗下, CRC出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。本书中文简体字翻译版由电子工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。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Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2011-5702

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理:第6版/(美)鲁斯(Russ J. C.)著;余翔宇等译. —北京:电子工业出版社,2014.8

书名原文: The Image Processing Handbook, Sixth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-21439-4

I. ①图… II. ①鲁… ②余… III. ①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(2014)第156369号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平 特约编辑:王 崧

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:36.25 字数:1073千字

版 次:2014年8月第1版(原著第6版)

印 次:2014年8月第1次印刷

定 价:118.00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。

译者序

图像处理是对图像信息进行加工以满足人的视觉心理或应用需求的行为。图像作为人类感知世界的视觉基础，是人类获取、表达和传递信息的重要手段。

John C. Russ 教授所著的本书在美国已出版了六版，受到了读者的一致肯定。尽管国内已引进了 Castleman、Gonzalez、Pratt 等学者的图像处理书籍，但本书几乎不用数学公式而尽量用文字和图例来解释图像处理的表达手法，使得其具有非常独特的特点。应电子工业出版社的邀请，本人有幸将该书翻译成中文，供广大国内读者参考。

本书的翻译延续了本人其他译著的风格。对于翻译过程中遇到的疑似错误，均以电子邮件的形式与原作者进行了沟通，并得到了作者的及时反馈。由于书中公式少，文字多，涉及的知识跨越多个学科，翻译难度极大；为力求准确，对于不常见的词汇，均采用了以英文单词在中国期刊网搜索关键词的方式进行初译，再以中文译名在谷歌等搜索引擎中搜索的方式进行确定。其他一些词汇则通过查阅广州图书馆及华南理工大学图书馆馆藏的相关书籍进行确定。对于实在无法查到对应中文表达的，则按照本人的理解给出翻译。即便如此，相信翻译的错漏仍在所难免，希望广大读者能够及时指出，以便在之后的重印中纠正。

本书第 3 章~第 5 章及第 9 章~第 14 章由本人独立翻译，其他章节由他人协助本人完成初译，再由本人整理完成，其中谢元杰和余伯庸参与第 1 章、第 6 章及第 8 章的初译和后期的校对整理，参与第 1 章初译的还有刘宁昊，参与第 2 章初译的有岑宣良、蓝俊健、黄伟鹏、张志欣及郑显华，参与第 6 章初译的还有张珂，参与第 7 章初译的有岑宣良、苏茜菲、孙祎楠和陈旭升，参与第 8 章初译的还有郭宇隆和朱祖聪，赵恒煜协助进行了第 15 章的初译。华南理工大学电子与信息学院杨春玲教授、胡永健教授、王伟凝副教授、周智恒副教授及刘琲贝老师，厦门大学的曾德炉副教授审阅了本书的译稿。梁宇文同学试读了本书的部分章节并提出了宝贵的意见。在此一并表示感谢。

译者

致 谢

本书中包含的所有图像处理及结果图形的创建，均是在苹果计算机及索尼 VAIO 计算机上使用 Adobe Photoshop CS4 和 Fovea Pro 插件进行的。许多图像直接取自显微镜和直接向计算机提供数字输出的其他设备。其他图像则是用各种数码相机（如索尼、尼康、佳能等）获得的，有些图像是使用平板和幻灯片扫描仪（尼康和爱普生）获取的，大部分图像由我的同事和其他研究人员提供。无论这些图像的源头是否能确定，都在此表示感谢。

本书是以数字形式（存储在一张可擦写 DVD 上）提交给出版商的，并没有中间的打印稿及图像的底片或正片等。这意味着作者必须对排字错误或图形问题负全部责任。我已尽最大努力以像素级细节来显示放大的重要图像。这一过程也迫使我去了解一些出版技术。无论如何，从磁盘文件直接成书在确保了图像质量的同时，也缩短了图书制作的时间并降低了成本。衷心感谢 CRC 出版公司的编辑对我的培训并容纳书中数量众多的插图^①（超过 2000 幅图形和 25 万个单词）。

特别感谢北卡罗来纳州 Reindeer Graphics 公司的 Chris Russ 先生，他对许多算法进行了编程并给出了宝贵的建议；还要特别感谢 Helen Adams 女士，她校对了本书中的许多内容，忍受了大量关于有效表达信息方式的讨论，并为此书的撰写计划得以实现提供了许多支持。

John C. Russ

于美国北卡罗来纳州罗利市

① 为节省读者购书成本，本书采用黑白印刷方式。原书中所有彩图，请至华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）注册后，免费下载。——编者注

序 言

各种应用中因以下两个稍微不同的目的使用了图像处理：

(1)改进呈现给人类观看者的图像的外观，包括图像的印刷与传输。

(2)提供图像，以测量其揭示的特征与结构。

适用于每种任务的技术并非总是相同的，但二者有很大的交叠性。本书将讨论对两种任务都适用的方法。

为使工作尽可能最佳，知道所处理的图像将用于何处是很重要的。对于视觉增强而言，这意味着要在一定程度上熟悉人类视觉过程，并了解观察者对图像中的哪些线索有反应。关于人类视觉的一章涉及了这些问题。由于许多图像是在复制或传输的情况下进行处理的，因此了解图像的印刷或显示过程也会有帮助。随着数码相机用户数量的剧增，图像的印刷技术发展得非常快，本书提供了最新的相关信息。

图像测量通常是获取科学数据的主要方法，而这通常又需要定义明确的特征或结构，它们可以是边缘、亮度、色彩、纹理或它们的组合。在确定适当的处理步骤时，对整个场景或对每个特征进行何种测量非常重要。书中的几章详细探讨图像的测量。尽管人类视觉并不是定量的，且很容易被误导，但尺寸、位置和亮度的测量涉及人类能大量理解的主题。形状是更难以理解的一个概念，因此这一版中增加了单独的一章来总结用数字描述形状的各种方式。测量的数据可用于目标的分类或识别。书中给出了几种不同的测量方式，并给出了示例。

类似于食品加工与文字处理，图像处理并不会减少所呈现的数据量，而只是对其进行重新排列，意识到这一点会很有帮助。在这种意义上，有些排列可能会更吸引人，有些排列则可能会表达出更多的含义，但这两个标准可能既不相同，也不会要求相同的方法。

本书介绍了许多图像处理工具，以便基于计算机系统的用户既能理解套装软件中提供的这些方法，又能为特殊应用的需要编写程序。通过各种显微图像、肉眼可见图像、遥感及天文图像中选取有代表性的图片，比较了用于相似目的的不同算法。要强调的是，图像的尺度对所用来处理或分析的技术影响甚微。具有纳米级分辨率的显微镜与产生光年级图像的望远镜，会生成需要许多相同算法的图像。

贯穿全书的重点仍然是解释和演示方法，而不提供大量的数学公式，以便读者能清晰地理解书中的内容。随着计算机速度与运算能力的提高，搜索有效性的技巧与近似方法的重要性有所降低，因此基于全精度方法的精确实现的例子通常能在桌面系统上实现。所涉及的主题通常与典型工作流程中方法应用的相同顺序呈现。

多年来，在向学生讲授这些内容时，我将掌握这些技术比拟为一名熟练的木匠。不同的木工工具（锯、刨、钻头）的数量相对较少，且尽管存在一些变体，如螺丝起子有平口形的也有十字形的等，但知道如何使用每种类型的工具则与完全理解它们紧密相关。使用一组这样的工具，熟练的木匠可建造出一栋房子、一艘船或一件家具。图像处理工具同样如此，它也分为几种类型，如直方图修改、邻域运算、傅里叶空间处理等，可用来实现许多目的。在五金店中购买工具时，并不提供使用这些工具的技巧。理解怎么使用它们需要实践，从而培养自己预先想象如何使用这些工具的能力。对于图像处理工具而言，同样如此。

在为本书修订这一版时，我也试图对读者与审阅者的评论和要求做出回应。在第二版中添加了关于图像测量及数据解释的章节，在第三版中添加了关于表面图像的一节。第四版在三维结构和特征分类的不同逻辑方法几节中增加了测量的体视学解释。第五版扩充了关于去卷积、扩展动态范围图像和多通道成像以及主成分分析的几节。在第六版中，添加了关于形状含义的一章和多维成像的补充内容。在描述日新月异的图像获取与打印硬件的章节，添加了最新的硬件和软件技术内容。

与前几版一样，我一直拒绝采纳在本书中“添加更多的数学知识”这类建议。对于图像处理、压缩、数学形态学等，已有许多优秀的教材，这些教材提供了严密且丰富的推导，其中的许多也被本书所引用。但本书的要点仍是采用例子的方式来进行教学。很少有人通过公式学习图像处理的原理。就像我们用图像来交流思想与“科学研究”一样，我们中的多数人使用图像来了解许多事情，包括成像本身。通过看到并比较不同运算对图像处理的结果，我们才能发现如何及为何使用这些运算。只有这样，我们才能更好地理解其数学原理。

对于每个涉及成像的人，尤其是从事科学和取证领域的人而言，一个非常关心的实际问题是正确和适当的处理由什么组成，以及不道德的甚至欺骗性的操作由什么组成。简短的答案是，更改一幅图像进而创建就观察者而言的错觉的任何手段都是错误的。该答案所对应的问题并未考虑不同观察者可能希望从图像中看到不同内容这一事实，因此，对某人而言的错觉，对另一个人可能并非如此。

首要原则总是，要存储原始图像及关于其获取的相关数据的永久副本。次要原则是，要小心地记录处理图像的每个步骤，并在发布处理后的图像时报告这些步骤。多数科技出版物及审阅所提交论文的编辑，近年来更意识到进行图像处理的容易性与文档不足的危险性。例如，读者可参阅 M. Rossner 和 K. M. Yamada 的文章（2004；J. Cell Biology）来了解该期刊对于图像伦理的政策及不正确处理的例子。

根据美国最高法院的 Daubert 案件 [Daubert 状告 Merrell Dow 制药有限公司（92-102），509 U.S. 579, 1993]，出于取证目的，处理人员有责任完整地记录图像处理的每个步骤，以确保这些方法能被法庭接受，这通常意味着这些方法不仅广泛被专业人员接受，而且已被严格测试并输出了想要的结果。在取证环境中，通常需要向非技术性陪审团逐步解释过程。这通常要求证明从图像得到的细节确实在原始状态下是真实存在的，它们只是通过处理在视觉上更加显而易见。

一些过程，例如对特征重新排列或将它们组合到单幅图像中，或调整几幅图像的对比度以使它们看起来更相像，很明显是误导或完全错误的。有些过程，例如使用复制—粘贴来复制图像的一部分，或选择性地擦除图像的某些部分，是完全不正当的。即使选择性地裁剪一幅图像（或选择要记录的范围）也会让人们产生错觉。

基本准则是，对一幅图像添加任何内容都是不可接受的，但若是使得剩余的细节更易于得到，或形象地用于展示与沟通，或是便于测量，抑制或删除某些信息，则可能是可以接受的。当然，所用的过程必须记录下来并报告。这里显示的任何过程可能在特殊情形下是适当的，但它们也可能被误用，在没有对其理解与仔细记录的任何情形下，都不应使用。科学方法的核心是重现性。如果在所应用的处理步骤中提供了足够的信息，且保留了原始的图像数据，那么结果的有效性就可被独立验证。

重要但经常被忽视的一个要点是，需要避免在用户没有意识到的情况下使用程序更改图像。例如，使用 Photoshop 仔细地校正一幅图像的颜色，然后将它放入 PowerPoint 中演示，即使是在同一台计算机屏幕上也会导致不同（在转换过程中使用的复制—粘贴操作同样会丢弃像素并降低分辨率）。此外，在另一台计算机显示器上或使用投影仪时，图像看上去也会有所不同。将一幅图像粘贴到 Word 中会降低图像的分辨率及彩色或灰度动态范围。这可能不会影响打印出的文档，因为打印文档的色域比计算机屏幕的色域要小，但接下来不能再从打印文档中恢复出该图像的原始形式。使用有损压缩方法（如 JPEG）保存一幅图像时，可能会丢弃重要的信息，且这些信息将不可恢复。

我鼓励读者在使用本书的同时，使用真实的图像源和基于计算机的系统来用不同的方法随意进行

实验，以确定最适合自己特定需求的方法。在读者预先不了解相关内容之前，选取图像处理工具来考察图像，与那种使用工具来使得图像更易于被另一位观看者看出与你已发现的相同内容相比而言，是一件更困难的任务。这需要很快的计算速度和界面的交互特性，尤其要求读者成为一名非常善于分析的图像观察者。如果能学会看出计算机所看到的内容并预估各种算法的结果，那么读者将成为一名出色的观察者，并可能获得适合于进一步处理与分析的最好图像。

为使得这种亲身实践的学习更加方便，我与我的儿子Chris Russ合作撰写了本书的配套图书 *Introduction to Image Processing and Analysis*，该书介绍了如何编写程序来实现这些算法并创建与 Adobe Photoshop 兼容的实现这些方法的插件。该书的可下载习题解答适用于使用 Macintosh 或 Windows 操作系统的计算机。网站 <http://www.DrJohnRuss.com> 上还有下载插件和试用程序包的其他链接。

作者简介

在作为科学家和教育家的 50 年生涯中，John C. Russ 一直使用图像处理和分析来作为理解和描述材料结构和功能的主要工具。来自各种设备（包括光学和电子显微镜、X 射线和中子断层扫描等）的图像要求计算机处理和测量，以提取重要的数据。Russ 的许多研究工作涉及金属和陶瓷的微观结构与表面形貌。他的研究与教学获得了来自政府机关和业界的基金资助。尽管现已退休，但 Russ 博士目前正协助北卡罗来纳州立大学建立新的实验室和项目，这将是全美第一家提供取证学与工程高级学位的地方。

对算法与设备的熟悉使得 Russ 博士的技能扩展到了更为宽泛的图像领域——从天文学到生物医学研究，再到食品科学与取证。另外，对于北卡罗来纳州立大学工程学院的学生而言，Russ 一直是其研究生学术委员会成员，此外还在材质、浆纸产品、兽医、微生物学、食品科学、考古学等方面与教员们进行协作。向几千名学生讲授原理与方法并向业界客户提供咨询，进一步拓宽了 Russ 博士的经验及图像处理与分析的应用范围。

退休后，Russ 博士曾担任 Rank Taylor Hobson 这家精密仪器制造商的研究总监。他仍在撰写图书并为许多公司提供咨询（以及刑事与民事案件的专家鉴定），在全球范围内开办图像处理与分析讲习班，并审阅出版物和基金申请书。他活跃于美国显微镜学会、微束分析学会、国际光学工程学会（SPIE）、国际体视学学会，是定量形态学学会的主席团成员、皇家显微学会会士，并受这些或其他组织的邀请进行特邀讲座与培训。2006 年 11 月 16 日，纽约显微学会因 John Russ 在显微领域作为计算机辅助显微与图像分析的开发者，而授予他 Ernst Abbe 纪念奖。

目 录

第1章 获取图像.....1

- 1.1 人类依赖图像来获取信息.....1
- 1.2 摄像机.....3
- 1.3 CCD 相机.....4
- 1.4 相机缺陷与限制.....8
- 1.5 彩色相机.....9
- 1.6 相机分辨率.....11
- 1.7 对焦.....12
- 1.8 电子和带宽限制.....12
- 1.9 像素.....14
- 1.10 灰度分辨率.....16
- 1.11 噪声.....17
- 1.12 高深度图像.....18
- 1.13 彩色成像.....21
- 1.14 数码相机的局限性.....26
- 1.15 色彩空间.....26
- 1.16 色彩校正.....33
- 1.17 彩色显示器.....35
- 1.18 图像类型.....36
- 1.19 距离成像.....37
- 1.20 多幅图像.....42
- 1.21 体视法.....45
- 1.22 成像需求.....50

第2章 人类视觉.....55

- 2.1 我们看到了什么, 为什么会看到.....55
- 2.2 识别.....57
- 2.3 技术参数.....60
- 2.4 敏感度.....63
- 2.5 眼睛告诉大脑的内容.....66
- 2.6 空间比较.....68
- 2.7 局部到全局层次结构.....70
- 2.8 时间问题.....74
- 2.9 第三维.....77
- 2.10 工作原理与工作内容.....79
- 2.11 看到不存在的东西, 反之亦然.....80
- 2.12 图像压缩.....82

- 2.13 光的世界.....83
- 2.14 尺寸很重要.....85
- 2.15 形状.....86
- 2.16 上下文.....88
- 2.17 必须做好布局.....89
- 2.18 眼见为实.....91
- 2.19 结论.....92

第3章 打印和存储.....93

- 3.1 打印.....93
- 3.2 纸张上的点.....96
- 3.3 彩色印刷.....98
- 3.4 印刷硬件.....102
- 3.5 胶片记录器.....105
- 3.6 其他演示工具.....106
- 3.7 文件存储.....106
- 3.8 存储介质.....107
- 3.9 磁性记录.....108
- 3.10 图像数据库.....110
- 3.11 浏览和缩略图.....114
- 3.12 无损编码.....116
- 3.13 简化的调色板.....120
- 3.14 JPEG 压缩.....121
- 3.15 小波压缩.....123
- 3.16 分形压缩.....126
- 3.17 数字电影.....127

第4章 修正成像缺陷.....129

- 4.1 对比度扩展.....129
- 4.2 带噪图像.....132
- 4.3 邻域平均法.....135
- 4.4 邻域排序.....140
- 4.5 其他邻域降噪方法.....147
- 4.6 缺陷消除、最大熵和最大似然.....151
- 4.7 非均匀光照.....153
- 4.8 拟合背景函数.....155
- 4.9 排序调匀.....159
- 4.10 彩色图像.....161

4.11 非平面视图	162	7.4 二维阈值	260
4.12 计算机图形学	163	7.5 多频段阈值处理	262
4.13 几何失真	164	7.6 来自纹理的阈值处理	264
4.14 对齐	166	7.7 多个阈值处理标准	266
4.15 内插	168	7.8 纹理方向	267
4.16 变形	171	7.9 区域边界	270
第5章 空间域图像增强	173	7.10 条件直方图	274
5.1 对比度控制	174	7.11 边界线	276
5.2 直方图均衡	176	7.12 轮廓	278
5.3 局部均衡	180	7.13 图像表示	280
5.4 拉普拉斯算子	182	7.14 其他分割方法	282
5.5 导数	189	7.15 一般分类问题	284
5.6 使用梯度找到边缘	192	第8章 二值图像处理	286
5.7 其他边缘检测器	196	8.1 布尔运算	286
5.8 纹理	201	8.2 组合布尔运算	289
5.9 分形分析	204	8.3 掩模	291
5.10 实现说明	204	8.4 从像素到特征	293
5.11 图像数学基础	205	8.5 特征的布尔逻辑运算	297
5.12 减去图像	206	8.6 按位置选取特征	300
5.13 相乘和相除	208	8.7 双阈值处理	304
5.14 主成分分析	210	8.8 腐蚀和膨胀	305
5.15 其他图像组合	213	8.9 开运算和闭运算	306
第6章 频率空间中的图像处理	217	8.10 各向同性	309
6.1 关于频率空间	217	8.11 使用腐蚀和膨胀进行测量	311
6.2 傅里叶变换	218	8.12 扩展到灰度图像	313
6.3 简单函数的傅里叶变换	220	8.13 形态学邻域参数	314
6.4 频率和方向	223	8.14 应用示例	316
6.5 首选方向	225	8.15 欧氏距离图	318
6.6 纹理和分形	228	8.16 分水岭分割	320
6.7 隔离周期性噪声	230	8.17 最终的腐蚀点	324
6.8 选择性掩模和滤波器	233	8.18 骨架	326
6.9 周期性信息的选择	235	8.19 边界线条和加粗	329
6.10 卷积	238	8.20 组合骨架和 EDM	332
6.11 去卷积	240	第9章 全局图像测量	334
6.12 噪声和维纳去卷积	243	9.1 全局测量和体视学	334
6.13 模板匹配和相关	248	9.2 表面积	338
6.14 自相关	252	9.3 ASTM 颗粒尺寸	341
第7章 分割和阈值处理	254	9.4 多种类型的表面	342
7.1 阈值处理	254	9.5 长度	343
7.2 自动设定阈值	256	9.6 厚度	345
7.3 多波段图像	258	9.7 采样策略	346

9.8 确定数量	348	13.5 最大熵	451
9.9 曲率、连通性和 Disector	350	13.6 重建图像中的缺陷	452
9.10 各向异性和梯度	352	13.7 射束硬化	455
9.11 颗粒尺寸	355	13.8 成像几何	459
9.12 经典体视学(展开)	356	13.9 三维断层成像	462
第 10 章 特定特征的测量	359	13.10 高分辨率断层成像	466
10.1 亮度测量	359	第 14 章 三维视图	470
10.2 确定位置	365	14.1 三维数据源	470
10.3 方向	367	14.2 连续切片	471
10.4 相邻关系	369	14.3 光学切片	474
10.5 对齐	372	14.4 连续移除	475
10.6 计数	378	14.5 立体测量	477
10.7 特殊的计数过程	381	14.6 三维数据集	479
10.8 特征尺寸	384	14.7 对数据集切片	481
10.9 圆和椭圆	386	14.8 任意剖面	484
10.10 卡尺维度	387	14.9 色彩的运用	486
10.11 周长	389	14.10 立体显示	487
第 11 章 形状表征	392	14.11 立体观看	489
11.1 描述形状	392	14.12 专用显示硬件	491
11.2 无量纲比	393	14.13 射线追踪	493
11.3 分形维数	397	14.14 反射	496
11.4 谐波分析	401	14.15 表面	499
11.5 拓扑学	408	14.16 多连通表面	502
11.6 三维	410	14.17 三维空间中的图像处理	506
第 12 章 特征识别与分类	413	14.18 三维图像测量	508
12.1 模板匹配和互相关	413	第 15 章 表面成像	511
12.2 参数描述	415	15.1 生成表面	511
12.3 决策点	420	15.2 物理接触表面成像	512
12.4 多维分类	421	15.3 非接触测量	515
12.5 学习系统	427	15.4 表面的显微镜检查	518
12.6 kNN 和聚类分析	431	15.5 表面成分成像	520
12.7 专家系统	433	15.6 距离图像处理	521
12.8 神经网络	435	15.7 成分图处理	523
12.9 语法模型	436	15.8 数据呈现与可视化	524
第 13 章 层析成像	438	15.9 渲染和可视化	528
13.1 多维情形	438	15.10 表面数据分析	531
13.2 体积成像与截面	442	15.11 剖面测量	532
13.3 重建的基础	445	15.12 伯明翰测量套件	535
13.4 代数重建方法	449	15.13 地形分析和分形维数	539
		参考文献	544

第1章 获取图像

1.1 人类依赖图像来获取信息

人类主要是视觉生物。并非所有动物都像人类那样依赖于眼睛来获取周围的绝大多数信息（人类视觉的特性将在第2章中探讨）。日常生活中的这一偏好还扩展到了我们如何去追求更多的技术目标。科学仪器通常会生成图像，而不是生成传递给操作者的声音或气味。在飞向其他行星的空间任务和同样艰难的深海勘探中，相机总是作为其主要部件，这些任务的成功与否，通常由返回图像的质量来判定。这表明，人类以一定的方式拓展了其视觉范围。显微镜和望远镜这样的光学设备可让我们看到比通常小很多或大很多的事物。传感器能检测出电磁波谱可见部分（400~700nm 的较窄波长范围）之外的红外线、紫外线、X射线和无线电波，不久的将来甚至会检测出重力波。图 1.1 给出了一个例子，这是一幅以图像形式表示的射电望远镜数据的图像，其中的颜色表示射电信号中的多普勒频移。这样的设备和表现方式用于进一步扩展成像性能。

非电磁辐射信号也可用来产生图像。使用原子探针“感知”标本表面的新型显微镜可将其数据表示为图像（见图 1.2）。以这种方式收集的数据可表示表面高度与表面形貌，但也可使用探针上的侧向曳力这样的其他信号。低频声波产生声呐图像，而在十亿赫兹频率处，声学显微镜会产生分辨率与光学显微镜类似的图像，但图像的对比度是由声波而非光的衰减与反射的局部变化引起的。图 1.3 显示了一幅存在近表面缺陷的声学显微图像，图 1.4 显示了子宫中婴儿的一幅声波图。

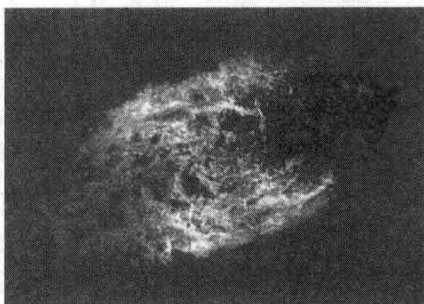


图 1.1 射电天文学产生的梅西叶星系图像。

这些图像通常以伪彩色显示，以便强调信号强度或多普勒频移的细微变化

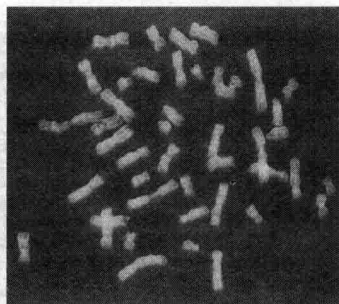


图 1.2 人类染色体的原子力显微镜图像

像全息图或电子衍射图样这样的一些图像，所记录的亮度与位置相关，观看者对这类图像并不熟悉。图 1.5 显示了来自透射式电子显微镜的一幅电子衍射图样的图像，图像中揭示了样本的原子结构（仅适用于进行测量且知道如何解释该数据的人员）。其他类型的数据，包括带有专用符号的气象图、商业利润和开销图，其轴线表示时间、家庭收入、胆固醇级别甚至更多模糊参数的图表，均已成为日常生活中的一部分，如图 1.6 所示。计算机接口及显示技术的最新进展使图形大量使用，从而进一步利用了人类视觉通路的大带宽。Tufte（1990，1997，2001）特别说明了使用合适图形来传递复杂信息的重要性。

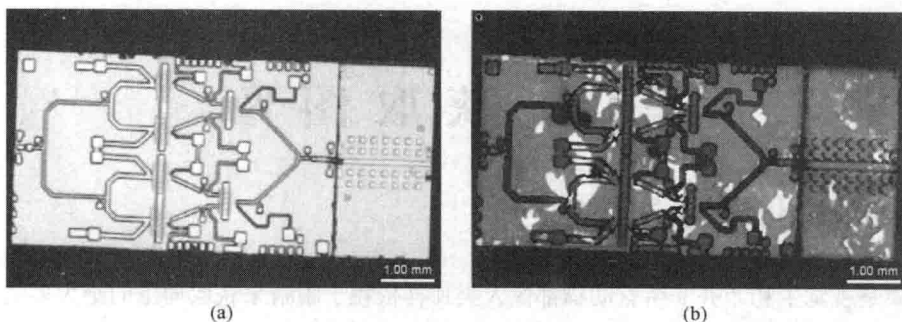


图 1.3 砷化镓 (GaAs) 模具下方焊缝中空隙的声学显微镜图像: (a)模具表面; (b)声学图像, 表明空隙表面具有强信号反射 (白色区域)



图 1.4 声波图成像的表面重建, 所示为子宫内一个 26 周大的胎儿

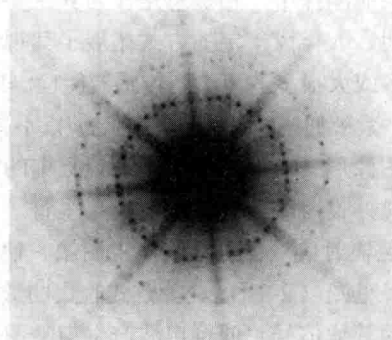


图 1.5 氧化物微晶的会聚束电子衍射 (CBED) 图样, 对其索引和测量, 可得到高精度的原子单元尺寸

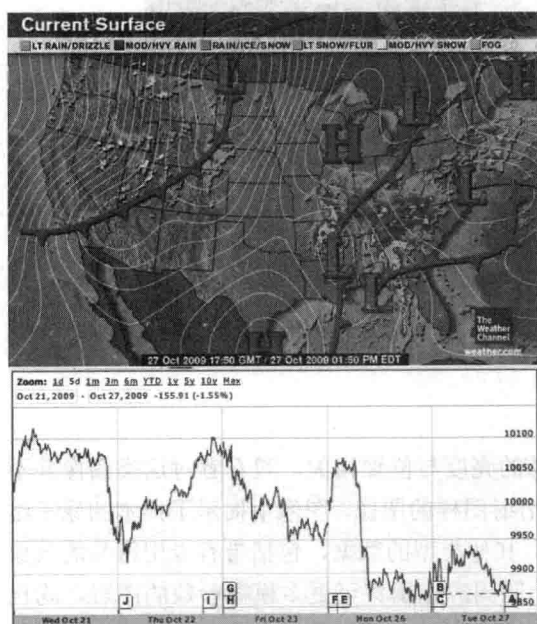


图 1.6 传递新闻信息的典型图形, 包括如股市报告的一维图形和如天气图的二维图形

与用于科学、技术或取证目的的基于计算机的成像设备相比, 人类的视觉、从图像中提取的信息的类型以及这样做的原理存在明显的差别。人类在判断图像内的物体和特征的颜色或亮度方面的能力非常差, 除非将这些图像排在一起来进行比较。人类视觉本质上是相比较的, 而非量化的, 它对几个物体的相对大小、角度或位置做出响应, 但不能提供具体的数值度量, 除非将其中一个参考物体作为量尺。Overington (1976; 1992) 并不赞同这种广泛接受并已成文的结论, 但并未提供令人信服的反驳证据。第 2 章中介绍了人类视觉特性影响其观察内容时的一些结果。

本书并不研究人类视觉通路, 但第 2 章中的概述可帮助读者理解人类如何去看事物, 从而使得我们成为更好的观察者。在某些情形下, 基于计算机的图像处理和分析使用基于人类视觉方法的算法, 但也采用看上去与人类视觉无直接对应关系的其他一些方法。特别地, 一些图像处理方法基于图像形成和检测过程的物理性质 (Sharma, 2005)。

书中给出的许多例子和分析涉及源自各种显微镜的图像。通常最直接提供图像三类成像是显微镜、航空（及卫星）成像和工业质量控制。因为在这些情形下，可最大限度地了解和控制成像几何及场景的光照。在更普遍的“真实世界”下，图像内容的分析和解译会变得更为困难。物体离照相机的距离不同，会使得确定其大小变得困难；不同的光照则会改变物体的颜色，甚至会部分地遮掩其他物体。犯罪现场和事故照片需要在苛刻的条件下拍摄，即不是从最优的视点拍摄，而且还伴随着光照的变化，因此对其分析很具有挑战性。

图像处理和测量的基本技术对图像而言是基本相同的，而不管其源自何处及大小如何。源自显微镜甚至天文望远镜的图像，由光子或声波、磁共振或扫描仪生成的图像，有着许多的共性，而处理它们的缺陷的技术、增强和提取细节的技术，以及使用相同算法与技术进行测量等，将在接下来的章节中说明。如后面几章中提及的那样，对于不同几何形状的观察，测量的解译确实要求一些专业知识，但其基本上与放大率无关。

1.2 摄像机

本书第一版于 1990 年出版，当时最常用且可以负担得起的获取图像并进行计算机处理的方法是使用摄像机。将摄像机安装在显微镜或翻拍台上、卫星或空间探测器中，或使用适当的光学设备来观察一个实验，摄像机会将模拟信号发送到一台单独的“帧抓取器”或计算机中的模数转换器（ADC）接口板，然后由该接口板将数值存储在内存中（Inoué, 1986; Inoué & Spring, 1997）。

原始视频相机的基本形式是摄像机，如图 1.7 所示。其工作原理是，使用聚焦电子束对真空玻璃管内侧的荧光粉涂层进行扫描。光通过前玻璃表面（和一较薄的金属阳极层）进入相机，并在荧光体上产生自由电子。这些操作改变了涂层的局部电导率，因此当电子束扫描时，流向阳极的电流大小会随局部的光强而变化。如图 1.8 所示，这种模拟（连续变化的）电信号被放大，并符合电压和时序标准（欧洲和美国的标准与时序稍有不同，但基本原理相同）。

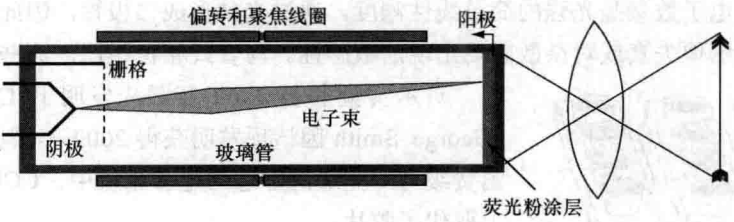


图 1.7 摄像管的功能框图。撞击荧光粉涂层的光改变涂层的局部电阻，进而改变电子束扫描的电流

电压数字化是通过对其采样并生成一个可比较的电压实现的。儿童游戏“猜数字”表明，仅通过 8 次猜测就可以得出 256（最常用的 ADC 类型）个电压值中的某个电压值。第一次猜 128 或该电压范围的一半。如果这个数太大，那么第二次猜测减去 64。后续每一次逼近加上或减去的值等于前一次的一半。在第 8 步做出最终（也是最小）的调整。得到的结果是一个可方便地存储于大多数现代计算机 8 位存储器中的数字。

管式相机既有优点也有缺点。使用电磁场或静电场扫描束会产生一种失真的扫描（枕形或桶形失真，或更复杂的情形），且会受到来自连线或设备的杂散磁场的退化。图 1.9 给出了枕形失真、虚光和失焦的例子。保持图像角落的聚焦要采取特殊的电路，而且角落会因镜头光圈和通光玻璃厚度的下降而变暗（虚光）。密封的真空系统会随时间而变差，且用于吸收气体分子的“吸气剂”在相机垂直方向

使用时，会剥落并掉到荧光体上。相机的响应（电压与亮度的关系）近似于胶片与人眼的对数响应，但它会随亮与暗的场景而变化。从较亮场景和亮点恢复较慢，且在亮光产生的在涂层中横向传播的点处，会出现看上去大于其实际特性的扩散性模糊现象，并在扫描方向出现“彗尾”。

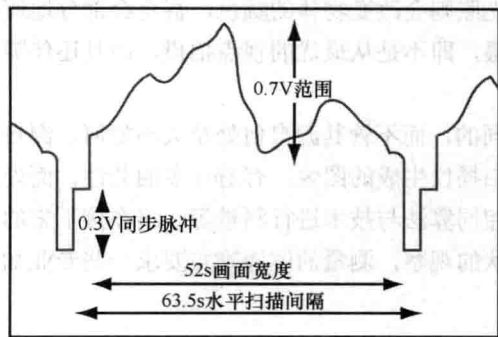


图 1.8 标准的 RS-170 视频信号显示了沿扫描线的亮度变化（范围介于 0V = 黑色与 0.7V = 白色之间）

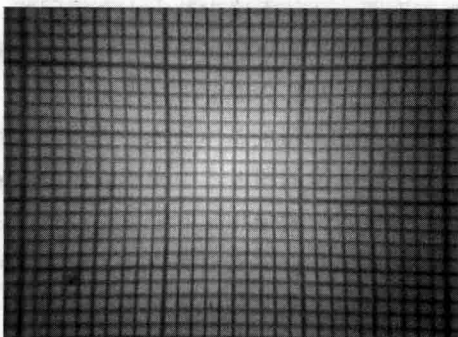


图 1.9 显示枕形失真的图像示例，在边缘和角落出现散焦和虚光

但管式相机也有不少优点。其空间分辨率非常高，仅受荧光体颗粒大小和聚焦束点大小的限制。此外，荧光粉有一种类似于人眼的谱响应，即可看到从红（波长约为 $0.7\mu\text{m}$ ）到蓝（波长约为 $0.4\mu\text{m}$ ）的颜色。用带有中间阴极层或亮度的特殊涂层对基本相机进行改装，可以在非常暗淡的光线下获取图像（如夜景、荧光显微镜）。

1.3 CCD 相机

管式相机现已基本上被固态芯片相机取代，固态芯片相机最原始且最简单的形式是 CCD（电荷耦合器件）。相机芯片包含一个二极管阵列，其作用是作为光桶。进入半导体的光会将电子从价带抬升到导带，使得电子数量是光强的简单线性测度。通过光刻形成二极管，因此它们有着完美的规则图案，所以没有图像失真或对杂散磁场出现的敏感性。与管式相机相比，这些设备便宜且坚固耐用。贝尔实验室于 1969 年最先发明了 CCD 并申请了专利（George Smith 因该项发明获得 2009 年诺贝尔物理学奖），在消费级与专业级的静态与电影相机中，CCD 现已在相当程度上取代了胶片。

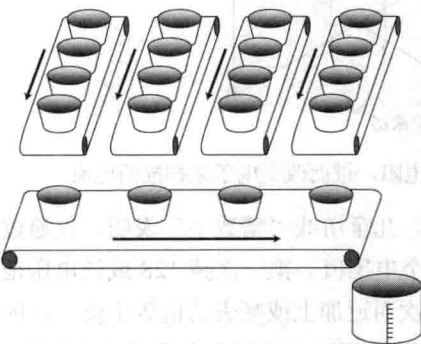


图 1.10 CCD 操作的基本原理可用一组水桶和传送带为例来说明

移动电子最简单的方法如图 1.11 所示。该设备表面上的每组三个电极组成一个像素。通过在其中的两个电极上施加电压，就在作用类似于一个桶的半导体中建立了电场。电子被两侧的高电场困入中心区

域。注意，这并不会减少对输入光子敏感的区域，因为高电场区域中产生的电子会很快跃迁至困住它们的低电场桶中。如图所示，通过在六个步骤或阶段中改变应用到这些区域的电压，电子移动一个像素。首先，一个场区域被降低，电子扩散至更大的体积中。其次，另一端的电场被提升，电子已被移动了 1/3 的像素高度。重复这一过程类似于传送带，并且这就是其称为“电荷耦合器件”的原因。

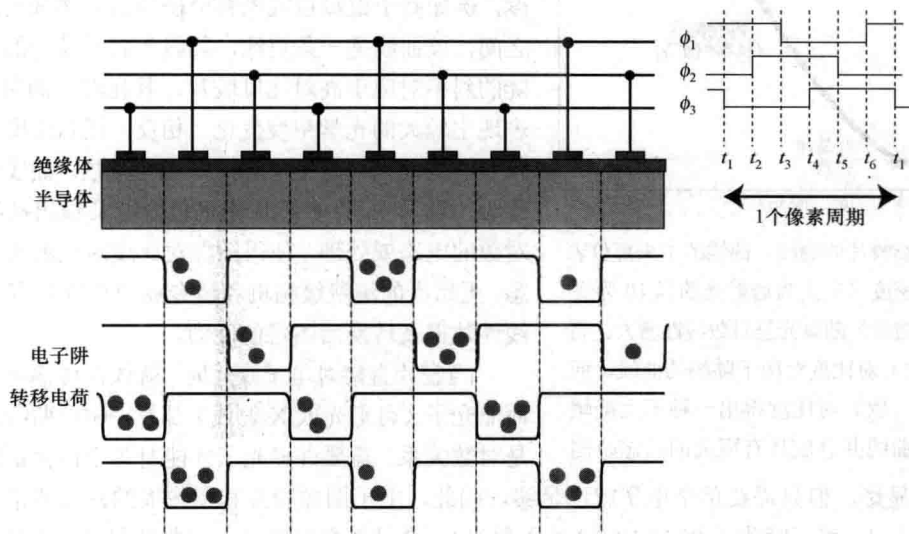


图 1.11 CCD 中三电极组将电子从一个像素移动到另一个像素时的电压变化

芯片相机的一个重要问题是它的谱响应。即使芯片反过来且变细使得光从电极的对面进入，也只有很少的蓝光能穿过半导体进而产生电子。另一方面，红外线很容易穿透，且这些相机对红光和红外（IR）线的敏感性远远超过了人类的视觉，因而通常要求安装遮光滤光片来消除它们（因为红外线不会像可见光那样聚集到同一平面，因此会产生模糊或灰雾图像）。图 1.12 显示了这种谱响应，使用非硅材料，这种谱响应可被进一步“裁剪”和扩宽。使用抗反射涂层时，芯片可实现的较高总效率，主要受“填充因数”（包括保持电气隔离的窄沟之间有源器件的芯片面积比）的限制。此外，芯片相机有一个与入射光强呈线性比例关系的输出，这对于某些测量目的来说非常方便，但这完全不同于人类视觉、摄像机和摄影胶片，它们的输出则与入射光强呈近似对数关系。

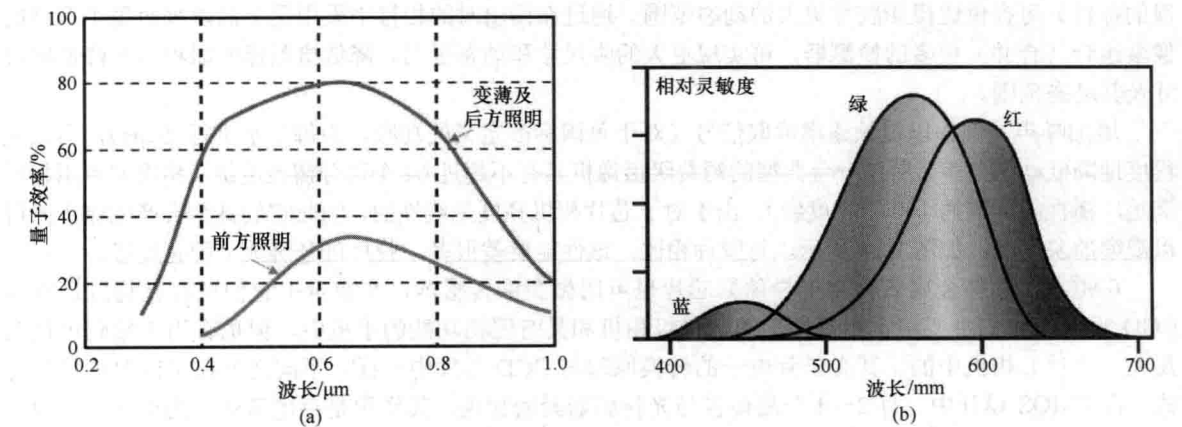


图 1.12 谱响应：(a)硅衬底芯片；(b)人眼中的色彩传感器，它通常识认为红色、绿色和蓝色的敏感性，但涵盖了长、中和短的波长范围