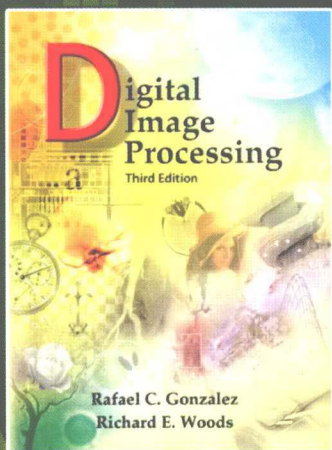


国外电子与通信教材系列

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>

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](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto: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

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

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,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、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,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 清华大学深圳研究生院副院长
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

# 译者序

数字图像处理起源于 20 世纪 20 年代, 当时通过海底电缆从英国的伦敦到美国的纽约采用数字压缩技术传输了第一张数字照片。此后, 由于遥感等领域的应用, 图像处理技术逐步受到关注并得到相应的发展。由于技术手段的限制, 图像处理科学与技术的发展相当缓慢, 直到第三代计算机问世后, 数字图像处理才开始迅速发展并得到普遍应用。CT 的发明、应用及获得倍受科技界瞩目的诺贝尔奖, 使得图像处理技术大放异彩。目前数字图像处理科学已成为工程学、计算机科学、信息科学、统计学、物理、化学、生物学、医学甚至社会科学等领域学习和研究的对象。随着信息高速公路、数字地球概念的提出及互联网的广泛应用, 图像处理技术的需求与日俱增。其中, 图像信息以其信息量大、传输速度快、作用距离远等一系列优点, 已成为人类获取信息的重要来源及利用信息的重要手段; 因此, 图像处理科学与技术逐步向其他学科领域渗透并为其他学科利用是理所当然的。图像处理科学又是一门与国计民生紧密相关的一门应用科学, 它已给人类带来了巨大的经济效益和社会效益, 不久的将来它不仅在理论上会有更深入的发展, 在应用上亦是科学研究、社会生产乃至人类生活中不可缺少的有力工具。它的发展及应用与我国的现代化建设联系之密切、影响之深远是不可估量的。在信息社会中, 图像处理科学无论是在理论上还是在实践中, 都有着巨大的潜力。

本书第一版于 1977 年问世, 它是作者在为大学高年级学生和研究生编写的讲义的基础上整理而成的, 全书只有七章。该书深入浅出, 图文并茂, 概念清楚, 通俗易懂, 是很受欢迎的教科书。特别是对非英语国家的学生和科技工作者, 阅读原文也会觉得赏心悦目, 朗朗上口, 给读者留下了深刻的印象。我想这是该书被广泛用做教材的根本所在。本书是该书的第三版, 这一版除保留了该书的传统风格外, 在内容上进行了大幅度的修订与重组, 作者根据反馈意见从 13 个方面对本书进行了修订, 新增了 400 余幅图像、200 多幅图表及 80 多道习题, 同时融入了近年来本科学领域的重要进展, 使得本书更加充实与全面。

本书共分 12 章, 分别为绪论、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、小波与多分辨率处理、图像压缩、形态学图像处理、图像分割、表示与描述、目标识别。

为了统一全书的语言风格, 参加翻译的人员较少。全书第 1 章至第 7 章及前言、目录、致谢、关于作者等由阮秋琦翻译, 其余内容均由阮宇智同志翻译; 全书由阮秋琦统一整理与审校。由于时间仓促, 难以达到“信、达、雅”的高标准, 退而求其次, 尽量做到译文准确, 风格统一。

本书在翻译中得了许多同学的帮助, 对此, 译者深表感谢。由于译者水平所限, 书中一定会有许多错误和不当之处, 恳切地希望读者提出宝贵的建议和批评。

译者

2011 年 2 月于北京交通大学

# 前 言

当某些书籍阅读起来毫不费力时，作者必定在撰写时倾注了大量心血。

——恩里克·嘉蒂耳·彭塞拉

这一版本的《数字图像处理》是本书的一次重要修订。正如由 Gonzalez 和 Wintz 编写的 1977 年版和 1988 年版及由 Gonzalez 和 Woods 编写的 1992 年版和 2002 年版那样，这一第五代版本同样是为学生和教师考虑而准备的。本书的主要目的仍是介绍数字图像处理的基本概念和方法，并为读者在该领域进一步学习和研究奠定基础。为达到这一目的，我们仍将重点放在基础知识和普通应用上，而不局限于特殊问题的解决。本书数学的复杂性保持在大学本科高年级和研究生一年级学生能很好地理解的水平上，他们已具备数学分析、向量、矩阵、概率、统计、线性系统和计算机编程方面的基本知识。本书的 Web 网站提供了一个指南，以支持需要背景材料回顾的读者。

本书在数字图像处理领域处于引领地位 30 多年的主要原因是我们对读者的不断变化的教育需求给予了极大的关注。当前版本是在我们不断进行广泛调查的基础上编写的。这些调查涉及 32 个国家的 134 所院校和研究机构的教师、学生和自学者。根据调查的结果，本书做了如下修订：

- 书中更早、更全面地介绍了图像处理中所用的数学工具。
- 扩充说明了直方图处理技术。
- 逐步叙述了复杂的算法。
- 扩充说明了空间相关和卷积。
- 介绍了模糊集合理论及其在图像处理中的应用。
- 修订了频率域处理的内容，从基本原理开始，说明了如何从数据取样得出离散傅里叶变换。
- 覆盖了关于计算机断层（CT）的内容。
- 在关于小波的一章中，清楚地叙述了基本概念。
- 修订了关于数据压缩的章节，包含了更多的视频压缩技术、更新的标准和水印。
- 扩充了形态学的章节，包含了形态学重建，并对灰度形态学进行了修订。
- 扩充了图像分割的内容，包含了更先进的，如坎尼算法的边缘检测技术，并更全面地探讨了图像的阈值处理。
- 更新了关于图像表示与描述的章节。
- 精简了关于结构目标识别的内容。

当前版本中的新材料和重组的材料试图在论述的严密性、描述的清晰性和市场调查的结论之间提供一个可接受的平衡点，同时尽量将篇幅控制在了合理的范围。本书这一版的主要改动如下。

第 1 章：图片做了更新，并且根据后续章节的改变重写了正文部分。

第 2 章：本章大约有 50% 的内容做了修订，包含了新图像和更清晰的解释。主要的修订包括：新增了关于图像内插的一节，以及综述本书所用主要数学工具的一节。替代现有的枯燥的数学概念，我们借助这一机会将分散在全书中的大量图像处理应用整合到了第 2 章中。例如，我们把图像平均和图像相减



移到了这一章中，以说明其数学操作。这遵循了我们在本书第二版中就开头的做法，即在讨论中尽可能把许多应用前移，这不仅作为实例来讨论，而且也是对学生的一个引导。在学完新组织的第 2 章之后，读者对数字图像是如何加工和处理的将有一个基本的理解。这是编著本书其余章节的坚实平台。

第 3 章：本章的主要修订包括空间相关、卷积以及利用空间模板进行图像滤波的应用的详细讨论。我们还在市场调查中发现了一个一致性的议题，即要求用大量实例说明直方图均衡化和规定化，因此，我们增加了一些说明这些处理工具的机理的例子。模糊集及其在图像处理中的应用也是在调查中常常要求的内容，在这一章我们也纳入了模糊集理论基础和它在灰度变换与空间滤波两种图像处理中的主要应用的新章节。

第 4 章：在过去的 4 年中，我们听到最多的评论和建议的话题是对第 1 版和第 2 版的第 4 章做出的改变。在当时做出这些改变时，我们的目的是为了简化傅里叶变换和频率域的表述。显然，我们走得太远，本书的许多用户抱怨新内容太肤浅。在当前版本中，我们纠正了这一问题。现在的内容从一个连续变量的傅里叶变换开始，并且用取样和卷积基本概念开始进一步推导离散傅里叶变换。这一内容的副产品是取样定理及其含义的直觉引入。然后，一维的内容被推广到二维，这里，我们给出了一些例子说明数字图像取样的效果，包括混淆和莫尔(波纹)模式。然后，说明了二维离散傅里叶变换，并且推导和总结了一些重要性质。这些概念作为频率域滤波的基础而加以利用。最后，我们讨论了问题实现，如变换分解和快速傅里叶变换算法的推导。学完本章后，读者将掌握从一维函数的取样到离散傅里叶变换基础的清晰推导及其在数字图像处理中的某些重要应用。

第 5 章：本章的主要修订是增加了关于从投影重建图像的一节，重点在于计算机断层(CT)。CT 的内容用投影重建图像的基本原理和实践中所用的成像模型的例子开始。然后，我们推导了雷登变换和傅里叶切片定理，并以它们为基础清楚地说明了滤波反投影的概念。讨论了平行光束和扇形光束重建，并用一些例子进行了说明。这些内容是很久以前的，但对于本书却代表着一个重要的补充。

第 6 章：本章的修订只限于符号表示的澄清和更正，没有增加新的概念。

第 7 章：我们收到了关于从前一章过渡到小波对于初学者证明有困难这样的评论。重写了一些基础的章节，以尽量使其更清楚。

第 8 章：为了使内容跟上发展形势，完全重写了这一章。新的编码技术内容扩展到了视频，在标准方面本节做了修订，图像水印处理的介绍都是主要的变化。这种新的编排可使得初学的学生更容易掌握本章的内容。

第 9 章：这一章的主要变化是包含形态学重建的新一节和灰度级形态学一节的完全修订。对于二值和灰度级图像的形态学重建的内涵，使它有可能开发出较之以前更复杂和更有用的形态学算法。

第 10 章：对这一章我们也做了较大的修订。其组织与以前一样，但新的内容包括更强调基本原理以及更多的先进的分割技术的讨论。详细讨论并说明了边缘模型，譬如梯度性质。为了说明先进边缘检测技术，包含了 Marr-Hildreth 边缘检测器和坎尼边缘检测器。重写的阈值处理的一节也包括 Otsu 方法，这是一种最佳的阈值处理技术，该方法在过去几年中的流行性大幅增加。我们在基于贝叶斯分类规则支持最佳阈值处理中介绍过这一方法；不仅仅因为它容易理解和实现，而且还因为它在实践中有更重要的应用。贝叶斯方法被移到了第 12 章，这一章详细地讨论了贝叶斯决策规则。我们还就如何利用边缘信息改进阈值处理和新的自适应阈值处理的例子做了附加讨论。除了有助于清晰化之外，关于形态学分水岭和针对分割的运动的利用与上一版本一样。

第 11 章：这一章的主要变化是边界跟踪算法，详细推导了用最小周长多边形拟合一条数字边界的算法，增加了用于纹理描述的共生矩阵的一节。与 11.4 节的所有例子一样，在 11.2 节和 11.3 节中的许多例子是新的。

第 12 章：这一章的变化包括相关匹配的新的一节和用贝叶斯分类器识别多光谱图像中感兴趣区的新例子。在结构分类方面的章节只限于串匹配的讨论。

以上提到的所有修订导致了 400 多幅新图像、200 多幅新图表和 80 多道新习题。在适当的位置，复杂的处理过程是以一步一步的算法形式形成的。同时，更新了所有章节末尾的参考文献。

本书 Web 网站在第二版发行期间就已经完成了，取得了很大的成功，每月的访问者都在 20 000 以上。相应于当前发行的版本，我们重新设计和升级了该网站。关于该网站的详细功能和内容，请读者参阅后面的“本书网站”和“致谢”部分。

数字图像处理的这一版本反映了 2002 年以来我们的读者已经变化了的教育需求。正像本书通常计划的那样，原稿完成后数字图像领域仍在继续发展。自 1977 年第一次问世以来，该书在世界范围内被广泛接受的原因之一是本书一直强调基本概念，包括试图提供尽快引出知识主体的稳定方法。我们试图遵循相同的原则编著本书的这一版本。

Rafael C. Gonzalez

Richard E. Woods

## 致 谢

我们感谢高校、工业界和政府中为本书这一版本作出贡献的诸多同仁。他们以各种不同的方式所作出的贡献是如此重要，以至于我们除了按顺序列出这些同仁外，实在找不出其他的感谢方式。特别地，我们希望把我们的感谢给予我们的同事 Mongi A. Abidi, Steven L. Eddins, Yongmin Kim, Bryan Morse, Andrew Oldroyd, Ali M. Reza, Edgardo Felipe Riveron, Jose Ruiz Shulcloper 和 Cameron H. G. Wright，感谢他们关于如何改进表达方式和本书覆盖的范围方面的许多建议。

在撰写这一版本期间，许多个人和组织给我们提供了有价值的帮助。我们再一次按顺序列出如下。特别感谢 Mathworks 公司的 Courtney Esposito 和 Naomi Fernandes 为我们提供了 MATLAB 软件与支持，这对于创建或阐述包括在本书这一版本中的许多实例和实验结果非常重要。这一版本中所用的新图像的很大部分（和某些情况下它们的历史与说明）都是通过个人的努力得到的，对这些贡献谨表诚挚的谢意，特别是我们要感谢 Serge Beucher, Melissa D. Binde, James Blankenship, Uwe Boos, Ernesto Bribiesca, Michael E. Casey, Michael W. Davidson, Susan L. Forsburg, Thomas R. Gest, Lalit Gupta, Daniel A. Hammer, Zhong He, Roger Heady, Juan A. Herrera, John M. Hudak, Michael Hurwitz, Chris J. Johannsen, Rhonda Knighton, Don P. Mitchell, Ashley Mohamed, A. Morris, Curtis C. Ober, Joseph E. Pascente, David R. Pickens, Michael Robinson, Barrett A. Schaefer, Michael Shaffer, Pete Sites, Sally Stowe, Craig Watson, David K. Wehe 和 Robert A. West。还要感谢本书许多图题中引用的个人和企业，感谢他们允许我们使用这些图片。

要特别感谢 Prentice Hall 公司的 Vince O'Brien, Rose Kernan, Scott Disanno, Michael McDonald, Joe Ruddick, Heather Scott 和 Alice Dworkin，感谢他们在本书制作中的创造性、帮助和耐心。

Rafael C. Gonzalez

Richard E. Woods

# 关于作者

## Rafael C. Gonzalez (拉斐尔·C·冈萨雷斯)

1965年毕业于美国迈阿密大学，获得电气工程学士学位；1967年和1970年在美国佛罗里达大学盖恩斯维尔分校分别获得电气工程硕士学位和博士学位。1970年，他加盟田纳西大学诺克斯维尔(Knoxville)分校(UTK)电机和计算机工程系。1973年晋升为副教授，1978年晋升为教授，1984年成为“杰出贡献教授”荣誉的获得者。他从1994年到1997年任系主任，现为UTK名誉教授。

冈萨雷斯是田纳西大学“图像与模式分析实验室”和“机器人与计算机视觉实验室”的创始人。他还于1982年创立了Perceptics公司，并任该公司总裁直至1992年，这期间的后三年全职受聘于其在1989年收购的Westinghouse公司。

在他的引领下，感知(Perceptics)公司在图像处理、计算机视觉和光盘存储技术领域取得了很大的成功。在开始的10年中，公司推出了一系列创新产品，包括：世界上第一个商业上可应用的计算机视觉系统，该系统可自动阅读行驶车辆的车牌；在遍布美国全国六个不同制造地点由美国海军使用的一系列大规模图像处理和归档系统，该系统用以检测三叉II潜艇项目中导弹的火箭发动机；为先进的Macintosh计算机设计的引领市场的图像板系列；一个万亿( $10^{12}$ )字节的光盘生产线。

他还是模式识别、图像处理和机器学习领域企业和政府的常任顾问。他在这些领域获得的荣誉包括：1977年获UTK工学院职员成就奖；1978年获UTK校长研究学者奖；1980年获Magnavox工程教授奖；1980年获M. E. Brooks杰出教授奖；1981年，他成为田纳西大学的IBM教授并于1984年被授予杰出成就教授；1985年，他被迈阿密大学授予杰出男毕业生奖；1986年，他被授予Phi Kappa Phi学者奖；1992年，获田纳西大学Nathan W. Dougherty工程优秀奖。

工业成就的荣誉包括：1987年因田纳西的商业开发获IEEE杰出工程师奖；1988年因商业图像处理的优秀表现获Albert Rose Nat奖；1989年因其在技术转化方面的优秀表现获Otto Wheeley奖；1989年获Coopers和Lybrand发起人年度奖；1992年获IEEE第3区杰出工程师奖；1993年因其技术开发获自动成像协会国家奖。

冈萨雷斯在模式识别、图像处理和机器人领域发表或合作发表了100多篇论文，出版了两本专著及4本教材。他的书在遍布世界的1000多所大学和研究机构使用。他被列入有声望的全美名人传记、工程名人传记、世界名人传记(Who's Who in America、Who's Who in Engineering、Who's Who in the World)和10个其他国家和国际传记中。他是两个美国专利的合作持有者，同时一直是IEEE Transactions on Systems、Man and Cybernetics和International Journal of Computer and Information Sciences的副主编。他是许多专业学会和名誉学会的会员，如Tau Beta Pi, Phi Kappa Phi, Eta Kappa Nu和Sigma Xi。他还是IEEE Fellow。

## Richard E. Woods (理查德·E·伍兹)

理查德·E·伍兹于田纳西大学诺克斯维尔分校(UTK)电气工程系获得学士、硕士和博士学位。其专业经验包括从企业家到传统的大学教师、咨询、企业管理和工业工作。最近，他创立了MedData Interactive公司，这是一家专门开发医用手持式计算机系统的高技术公司。他还是Perceptics公司的创始人和副总裁，他负责该公司的许多定量图像分析和自动决策产品的开发工作。

在加入 Perceptics 和 MedData 公司之前，伍兹博士是田纳西大学电气工程和计算机科学的助理教授，再之前是 Union Carbide 公司的计算机应用工程师。作为顾问，他为许多空间和军事机构开发了大量的特殊目的的数字处理器，这些机构包括 NASA、Ballistic 弹道导弹指挥系统 (Missile Systems Command) 和 Oak Ridge 国家实验室 (National Laboratory)。

伍兹博士发表了大量有关数字信号处理方面的文章，并且是几个专业学会的成员，包括 Tau Beta Pi、Phi Kappa Phi 和 IEEE。1986 年，获得田纳西大学杰出工程毕业生称号。

谨以此书献给 Smmantha, Janice, David 和 Jonathan。

# 本书网站

[www.prenhall.com/gonzalezwoods](http://www.prenhall.com/gonzalezwoods)

或镜像网站

[www.imageprocessingplace.com](http://www.imageprocessingplace.com)

《数字图像处理》是完全自成体系的书籍。然而，参考网站对许多重要领域提供了有力的支持。对于学生或自学读者，网站包括：

- 概率、统计、向量和矩阵的回顾。
- 所选习题的完整解答。
- 计算机项目。
- 包含本书中所讨论的大部分主题的辅导内容。
- 包含本书中所有图像的一个数据库。

对于教师，网站包括：

- 本书中所有习题的全部解答及课堂和实验教学指导的教师手册。该手册对于采用本书作为教材的教师是免费使用的。
- 课堂教学 PPT。
- 从以前版本中删除的内容，可以方便地以 PDF 格式下载。
- 其他教育资源链接。

对于专业人员，本书网站包括一些特殊的主题，如：

- 商业网站链接。
- 选取的新参考文献。
- 商业图像数据库链接。

在图书出版后，对于为确保图书内容的更新而添加新的课题、数字图像和其他相关内容，Web 网站是一个理想的工具。虽然在出版本书时已做了仔细的考虑，但本网站对于发布任何印刷错误仍是一个方便的场所。作为本书的参照，Web 网站在书中设计了如下图符：



# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1	2.6 向量与矩阵操作 .....	53
引言 .....	1	2.7 图像变换 .....	54
1.1 什么是数字图像处理 .....	1	2.8 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	<b>第3章 灰度变换与空间滤波</b> .....	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
<b>第2章 数字图像基础</b> .....	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 低通滤波器的其他例子 .....	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
<b>第4章 频率域滤波</b> .....	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	<b>第5章 图像复原与重建</b> .....	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 约束最小二乘方滤波 .....	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
<b>第6章 彩色图像处理</b>		<b>249</b>
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
<b>第7章 小波和多分辨率处理</b>		<b>289</b>
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

<b>第8章 图像压缩</b>		<b>334</b>
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

<b>第9章 形态学图像处理</b>		<b>402</b>
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