

国外电子与通信教材系列

现代数字图像处理

Le traitement des images



[法] Henri Maître 等著

孙洪译



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

现代数字图像处理

Le traitement des images

[法] Henri Maître 等著

孙 洪 译

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

内 容 简 介

本书系统地论述了现代数字图像处理的基本原理和技术。一方面,讨论了现代数字图像处理的高级数学理论、现代数字信号处理理论和抽象几何学理论,包括二维信号抽样理论、统计信号处理方法、小波变换理论、分形方法、偏微分方程、数学形态学、马尔可夫场理论等;另一方面,将这些先进的分析、处理工具应用到了图像恢复、边缘检测、区域分割、纹理分类和特征描述等方面。

本书既是一部前沿学科的专著,同时也是近些年法国相关领域研究生使用的教材。本书可以作为高等学校信号与图像处理、计算机科学、遥感图像处理等领域的研究生教材和参考书,也可以作为在这些领域从事相关工作的高级科学技术人员的参考书。

© LAVOISIER, 2003

11, rue Lavoisier - F-75008 Paris

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by any electronic or mechanical means (including photocopying, recording, or information storage and retrieval) without permission in writing from the publisher.

Chinese Simplified language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2006

本书中文简体版专有版权由 LAVOISIER 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-2158

图书在版编目 (CIP) 数据

现代数字图像处理 / (法) 麦特尔 (Maître H.) 等著; 孙洪译. -北京: 电子工业出版社, 2006.7
(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Le traitement des images

ISBN 7-121-02664-3

I. 现... II. ①麦... ②孙... III. 数字图像处理-教材 IV. TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 076728 号

责任编辑: 谭海平

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 980 1/16 印张: 17.5 字数: 420 千字

印 次: 2006 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 33.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

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和自由组合使用。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,我们通过与作者联络、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

本书是欧洲 Hermes 科学出版社 2003 年出版的《信号与图像处理》系列丛书之一。该著作由法国国立高等电信学院(ENST)Henri Maître 教授主编,并由从事该领域研究和教学的大学教授和国家科研中心的专家共同撰写。该著作既是一部前沿学科的专著,同时也是近几年来 ENST 给欧洲多国研究生班使用的教材。

本书的主编 Maître 教授是图像处理领域的国际知名专家,他一直致力于图像处理的理论与应用研究,编著了《图形处理》、《图像处理》、《合成孔径雷达图像处理》等专著,担任了 *IEEE Trans. Image Processing* 等几家重要刊物的副主编。他长期领导的 ENST 图像解译实验室的人员有半数以上来自世界各国的学者以及一些国际著名专家,他们活跃在科学研究的前沿。他培养的博士生当中,有不少已经成为卓有建树的知名专家。

随着多维信号处理、抽象几何以及模式识别等理论的迅速发展,同时也随着图像信息应用需要的迅速增长,数字图像处理的技术及其应用是当今发展得最快的领域之一。本书系统地论述了现代数字图像处理的基本原理和技术。一方面讨论了现代数字图像处理中的现代数学理论、现代数字信号处理方法和现代抽象几何学概念,包括二维信号抽样理论、统计信号处理方法、小波变换理论、分形方法、偏微分方程、数学形态学、马尔可夫场理论等;另一方面,将这些先进的分析、处理工具用到了图像恢复、边缘检测、区域分割、纹理分类和特征描述之中。

该书由授课教师多年使用的讲稿精心整理而成。书中各章节的作者都是法国很有成就的教授和科学家,其中有图像处理领域的专家,有数学形态学的专家,也有获得国际学术奖的年轻有为的教师。该书中有许多精辟的论述和结论,是作者们长期科学研究的结晶。例如,将马尔可夫随机场看做是“自回归-动平均”模型的特例,又如,各种图像处理算法的适用范围及其局限等。无疑,这些论点显示出作者站在图像处理领域的高处和前沿。本书给我们展现了图像处理领域的新技术,也包括法国科学家长期研究的成果,同时,展示了作者们的严谨学风和创造精神。遗憾的是,从书中我们看不到他们在教学过程中运用的那些丰富的演示材料和实验平台,他们的教学充分展现了该课程的理论、技术和应用紧密结合的特点。

该书在 ENST 作为研究生教材已经使用了好几年,该课程是 ENST 图像解译实验室的精品课程,面向欧洲很多国家的研究生。授课用语往往是英语,因此最近,该书的英文版也将发行。

该书的主编非常喜爱中国文化,非常重视与中国学术界的交流。早在 20 世纪 80 年代初他就访问了我国的一些高等院校和科研院所,与我国资深专家吴佑寿院士、万发贯教授等有着长期广泛的学术交流,那时他编著的第一版《图像处理》专著就在我国流传,他还招收了不少中国学生和访问学者。以后他又多次来中国参加学术会议和各种学术活动。特别是 2003 年,应邀参加了中国首届合成孔径雷达会议,并发表了学术演讲。那时就有很多中国的同行学者期待着这本书的中文译本。

译者于 1997 年至 1998 年在 ENST 图像解译实验室做访问学者。之后,应 Maître 教授的邀请,又于 1999 年、2000 年和 2001 年到 ENST 做 SAR 图像处理方面的合作研究。我感到 Maître 教授领导的图像解译实验室,在学术氛围和研究水平方面都处在世界的前列,他们严谨的科学态度和奋进、合作的作风给我以深深的留念。

在本书的翻译工作中,主编 Maître 教授为译者做了耐心的解释。武汉大学 2003 级法语研究生班的杨柳、应小华、殷芹、彭莹莹、陈新丽、张莹和凌馨同学参加了文字的录入工作。武汉大学电子信息学院长期从事图像处理研究生课程教学的何楚老师对书中专有名词的翻译给予了有益的讨论。在此,对所有为本书出版提供了帮助的人们表示诚挚的感谢。

译者

2006 年于武汉大学电子信息学院

目 录

第 1 章 图像的统计特性	1
1.1 概论	1
1.2 幅度	2
1.3 振幅的跳变	4
1.4 自相关函数	6
1.5 熵	10
1.6 图像模型	13
1.7 尺度不变模型	15
1.8 参考文献	15
第 2 章 图像的采样及其分形表示	17
2.1 一维带限信号	17
2.2 实际信号	20
2.3 N 维扩张	22
2.4 分形模型	24
2.5 参考文献	31
第 3 章 图像的离散表示形式	32
3.1 绪论	32
3.2 铺砌和栅格	32
3.3 离散拓扑学	36
3.4 几何描述	44
3.5 随机结构的例子	54
3.6 距离函数	56
3.7 参考文献	58
第 4 章 图像恢复	60
4.1 逆滤波	60
4.2 奇异退化和坏条件系统	64
4.3 二维信号的恢复	68
4.4 迭代恢复	69
4.5 退化的估算	72
4.6 边界效应的削弱	73

4.7	参考文献	73
第5章	数学形态学	75
5.1	绪论与基础知识	75
5.2	四种运算	77
5.3	拓扑框架	86
5.4	代数框架	89
5.5	概率论框架	91
5.6	腐蚀和膨胀的应用	92
5.7	开和闭的应用	94
5.8	开关变换和导出算子	97
5.9	大地测量学	101
5.10	流域分界线	102
5.11	结论	106
5.12	参考文献	106
第6章	马尔可夫场	108
6.1	马尔可夫场的定义及其模拟	108
6.2	应用:恢复与分割	119
6.3	马尔可夫框架下的估计算法	122
6.4	参数估计	129
6.5	边缘处理	132
6.6	原型图	134
6.7	参考文献	135
第7章	小波与图像处理	138
7.1	图像线性分析的原理	138
7.2	框架	143
7.3	自适应跟踪	151
7.4	参考文献	154
第8章	偏微分方程和图像处理	156
8.1	热传导方程及其限制	156
8.2	非线性扩散方程	162
8.3	偏微分方程与多尺度分析	168
8.4	参考文献	173
第9章	预处理	174
9.1	光学处理和彩色处理	174
9.2	噪声抑制	176

9.3	自适应滤波	182
9.4	图像重采样	184
9.5	参考文献	187
第 10 章	图像的边缘检测	190
10.1	连续的边缘模型	190
10.2	经典方法	192
10.3	解析方法	197
10.4	活动边缘(蛇行模型)	201
10.5	边缘的延伸与闭合	206
10.6	参考文献	210
第 11 章	区域分割	212
11.1	基于直方图的方法	212
11.2	区域变换法	216
11.3	邻接图	221
11.4	最小描述长度(MDL)方法	221
11.5	Mumford-Shah 方法	222
11.6	参考文献	226
第 12 章	纹理	229
12.1	什么是纹理	229
12.2	纹理的模型	231
12.3	纹理分析及其识别	232
12.4	马尔可夫场方法	240
12.5	结构方法	242
12.6	异质纹理	243
12.7	参考文献	243
第 13 章	轮廓描述符和形状描述符	246
13.1	特征函数	246
13.2	形状描述符	248
13.3	Guzman 多边形	249
13.4	Freeman 链	251
13.5	傅里叶描述符	255
13.6	多项式逼近	257
13.7	Hough 变换	263
13.8	结论	268
13.9	参考文献	269

第 1 章 图像的统计特性^①

1.1 概论

1.1.1 为什么要研究图像的统计特性

图像统计特性的分析是图像后处理(如滤波、恢复、编码及模式识别等)所必需的。所有用来消除噪声以及增强被削弱信号的基本技术都建立在信号和噪声的一些假设之上,即建立在信号和噪声的模型基础上。信号处理方法中的统计技术丰富了信号的假设,如高斯分布的信号,或者在一个区间均匀分布的信号,又例如白噪声,即相关性非常小。在这些模型的基础上,我们可以严格推导出一些最佳滤波及其平均性能和性能下限的评估。编码器或检测器的计算都基于一些假设,它们的有效性或者质量实际上取决于这些假设与被处理的真实信号所呈现的特性是否相符。

因此,人们很早就开始了图像的统计特性测量,并试图由此推出一些模型来解译图像。这些统计模型在我们的日常生活中很少直接反映出来,因为统计模型并不像“结构性描述”或“句法描述”那样运用于日常生活中,而后者赋予每幅图像以自然语言描述或几何形状描述,比如这样描述一幅图像:“一个露出神秘笑容的女人双手交叉放在胸前,身后以远山作为背景”。

但是,为使用电脑自动处理图像,这种统计特性的图像表征非常有用,因为它直接影响着实施在像素上的算法是否有效。通用的编码,如 JPEG 和 MPEG,都建立在这种特性的基础上,这足以表明这方面的研究在技术上的作用。

我们的课文安排如下。首先,我们将回顾图像一维扫描得到的最简单的统计测度;然后,由此推导出一个广泛适用的模型,并指出它的局限性;接着,我们将介绍该模型未涉及到的一些二维特性;最后,我们将提出一些对基本模型的改善方案。

1.1.2 我们研究什么样的图像

在实验性的研究中,我们必须区分两种完全不同类型的图像:

- 不相干图像,如视频图像以及绝大部分卫星照片和医学照片,它们是通过自然光源或者通过非相干辐射源得到的。
- 相干图像,如全息图片、雷达或超声波图片以及地震图片等。

^① 本章由 Henri MATRE 撰写。

对第一种图像,一个单元像素是各个相关物体发射的辐射能量之和,从而产生其图像。

对第二种图像,由一些相关物体辐射的复振幅总和组成同一个像素而形成其图像。这些辐射将根据其同相或异相产生一个明亮的或灰暗的像素,这种变化较少依赖于组成像素的物质,而更多地取决于传播的条件,其相位尤其取决于观测几何。由于表面的状态通常相对于入射波长的尺寸是比较粗糙的,所以这些图像通常会有一种非常严重的噪声,雷达领域称之为“闪烁”,天文学上称之为“斑点”,光学上称之为“颗粒”,英语称为“speckle”。相干图像的统计特征与非相干图像的统计特征总是非常不同的。

本章将着重阐述最普遍的非相干图像的特性。但是,由于非相干图像的特性已经被较好地掌握,所以我们只做简单叙述。我们讨论的对象也包括一般图像(即常见的图像,见图 1.1)的性质。不过这些术语本身不能准确表达我们的研究对象,因为实际上,并不存在规范化的图像。但是这里很自然地不包括那些过于简单的图像,比如油漆工在白底上做的黑方块、棋盘或栅栏,以及一些特殊用途的“病态”图像(如建筑中使用的小圆点装饰或马赛克等)。在必要时我们将会准确指出在图像处理中的图像是正常还是非正常。基本的正常图像包括视频场景、卫星图像、医学图像、机器视觉图像及显微图像。



图 1.1 “任意”三幅图像

1.2 幅度

1.2.1 性质

我们用一个连续函数 $f(x, y)$ 或一个离散函数 $f(i, j)$ 来表示图像,两个空间变量分别为 x 和 y 或者 i 和 j 。为了表达清晰,我们还常常限制在一维,通过逐行扫描得到一维函数 $f_j(i)$,记为 $f(i)$,因为这样表示没有歧义。我们有时将变量 i 和 j 限制在 N 和 M ,从而成为有限维的图像,但是 N 和 M 要取得很大。在我们涉及的图像特性中,最简单的是有关图像振幅的特性。绝大部分情况下,图像用 8 个比特表示,有的质量高的图像用 10 个或 12 个比

特表示,极高质量的图像用16个比特表示。涉及的第一个描述是振幅的直方图,它可以表示在各个振幅水平上出现的频率。

由于图像是由大量的样本(从十万到几百万之间)组成的,所以我们通常应用中心极限定理,从而假设图像的振幅是高斯分布的。但这并不是普遍正确的。图1.2显示了图1.1中三幅图像的典型直方图。它们是任意的,呈现出任何其他的形状也是完全可能的。所以说,一幅图像的直方图既不是真正高斯的,也不是真正均匀的。

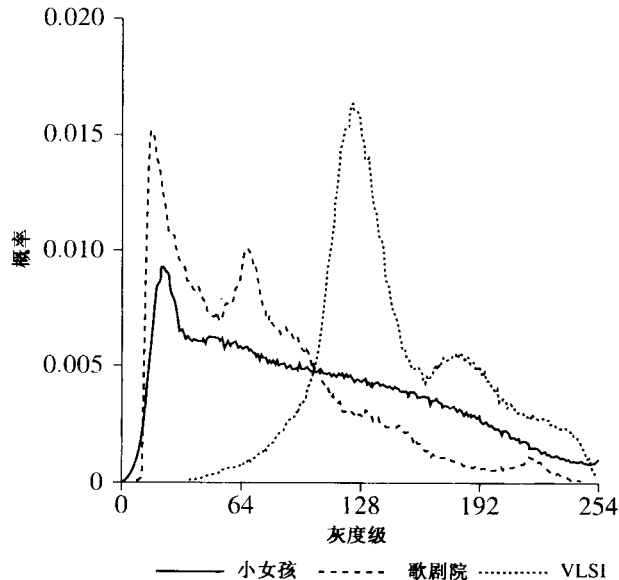


图 1.2 图 1.1 中三幅图像对应的直方图

1.2.2 直方图模型的灵敏度

我们可以更细致地研究图像的表象与其直方图的关系。实际上,Estournet^[EST 69]对此已经进行了一些有意义的工作,他在若干种不同的材料上制作了同一张照片,这些材料有不同品牌、不同颜色的浓淡层次以及不同硬度的相纸,对它们的分析描述在图1.3中,它清晰地显示出直方图有明显的差异,这些差异远比不同材料对图像本身的影响要大。Estournet由此推断出图像的直方图不但对图像本身没有重要意义(因为鉴于一些直方图的量非常小,许多图像的直方图看起来都很相近),而且直方图可以人为地改变而并不怎么会影响图像的外观,甚至根本不会改变图像的内容。

我们还可以由此推到更远。一幅图像的直方图有没有可能是任意的呢?为了回答这个问题,我们使用这样一幅图,它通过一个代码变换来改变图像的灰度,它保证变换后图像的直方图为预先指定的。然后我们加以约束以保证图像的外观保持不变,即不丢失灰度级之

间的次序关系;也就是说,若 n_1 和 n_2 是两个灰度级,且有 $n_1 < n_2$,则可将它们转化成 m_1 和 m_2 ,且有 $m_1 \leq m_2$ 。可以很容易地设计这样的程序。将它应用于图像上可得到如图 1.4 所示的结果,其直方图分别为一个均匀分布、两条高斯曲线之和以及一条正弦曲线。我们能够清楚地看到生成的这些图像的差别,但它们完全能够被准确地辨认出来,而且它们的解译并未受到影响。这个例子证实了直方图的作用实际上是非常表面的,它的形状与图像的重要因素的联系并不是很大。

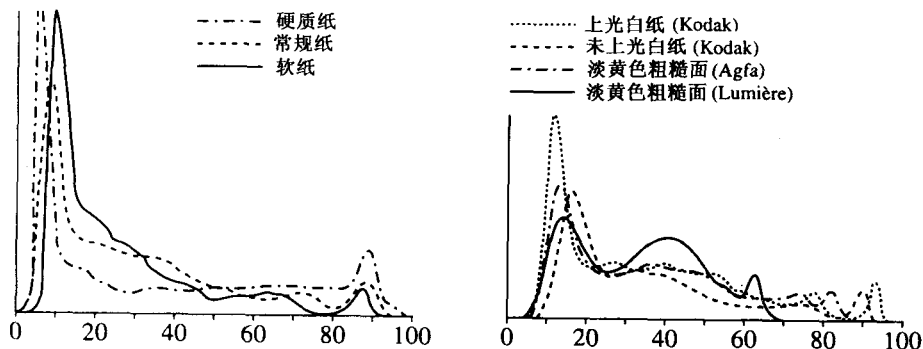


图 1.3 同一幅图像显示在不同性质的纸上时所对应的直方图:左图对应不同硬度的纸;右图对应不同外观的纸(引自[EST 69])

但是,是否能说这个结论永远都正确呢?当然不是。因为有些非常特别的图像会呈现出非常独特的直方图。比如一张棋盘的直方图就有两个峰,而白底上的黑色文字则有两个明显分离的模式。又如我们选取一片规则的波浪场或一面涂了灰泥的墙,它们同样可能会得到高斯直方图。

若图像是由相干辐射获得的,则其处理在理论上是根据均匀粗糙的表面(称为“完全发展的相干斑”的假定^[600 76])的反射幅度的概率分布来进行计算的。

我们可以证明复振幅的模为瑞利分布:

$$p(f) = \frac{f}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{f^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.1)$$

我们可以验证图 1.5 所示的图像的直方图恰好符合该模式。

1.3 振幅的跳变

我们将振幅的跳变定义为沿着一条直线上的两个毗邻像素的灰度值之差: $s_j(i) = s(i) = f_j(i+1) - f_j(i)$ 。变量 $s(i)$ 通常在 -255 到 $+255$ 间变化。我们通过试验来研究 s 的概率。图 1.6 显示了其概率。我们注意到它有如下规律:

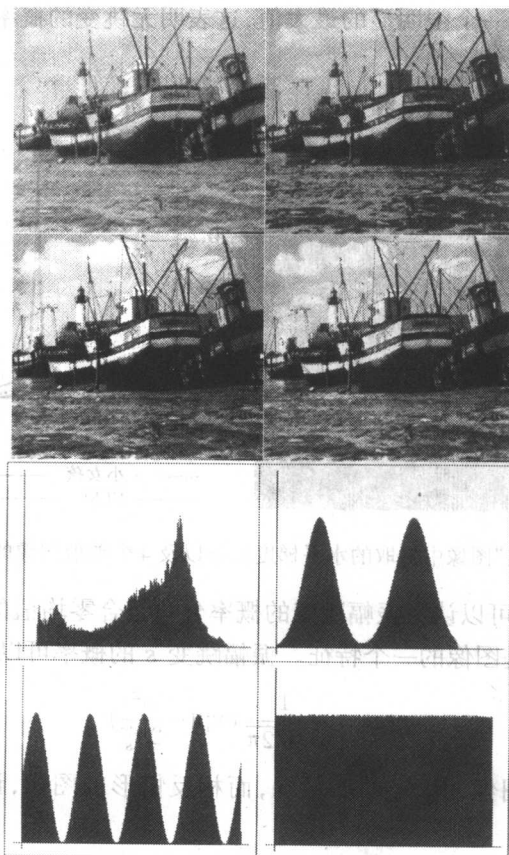


图 1.4 直方图的修改。左上图:原始图像;右上图:两条高斯曲线之和;左下图:正弦曲线;右下图:均匀分布

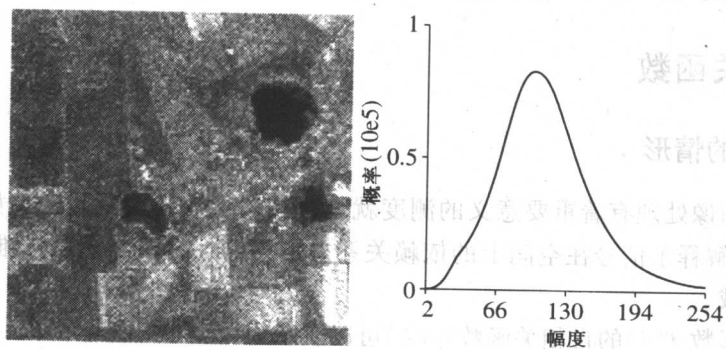


图 1.5 一幅放大的侧视雷达(ERS-1 雷达)图像,是 Ukraine 农田区的场景。图像显示出很严重的相干噪声,而右图显示出整幅图像的直方图非常接近瑞利分布

- 当 $s = 0$ 时, 它们有一个很明显的最大值, 这表明无跳变的概率最大。
- 它们都是对称的。
- 它们都有一个明显快速的单调下降。

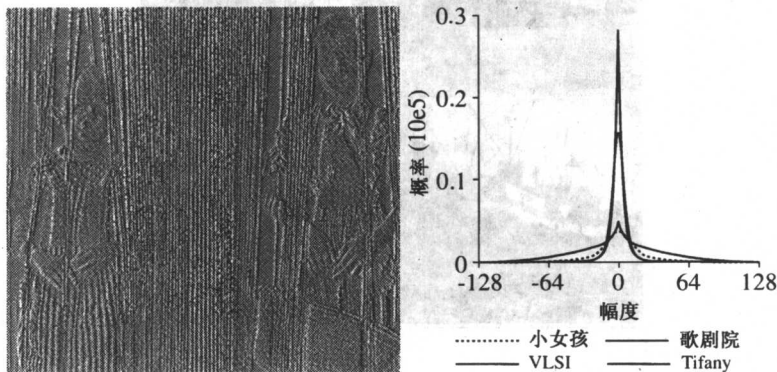


图 1.6 从“小女孩”图像中提取的水平梯度图像以及 4 个差值图像的 4 个跳变直方图

通过观察这些曲线, 可以认为振幅跳变的概率分布符合零均值的高斯模型, 其中唯一的参数, 即均方根偏差 σ_s , 是图像的一个特征。振幅跳变 s 的概率可以写为

$$p(s) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (1.2)$$

有些过渡较缓和的图像, 其 σ_s 的值很弱, 而相反情形的图像, 该值就很强。典型的 σ_s 值在 3 到 15 之间变化。

显然, 我们很容易找到一些相反的例子, 它们的直方图没有上述性质。一幅由白到黑渐弱的图像呈现出一个不对称的直方图, 其数值在左半空间均匀地分布。一个棋盘仅仅变换出三个值, 0, +255 和 -255。当然, 这些例子并不属于我们假定的正常图像的范围。

1.4 自相关函数

1.4.1 一维的情形

另一个对图像处理有着重要意义的测度就是自相关函数。这是因为有如下两个原因: 首先, 它完全地解释了信号在空间上的依赖关系; 另一方面, 它很容易通过维纳-辛钦定理^①变换到傅里叶域。

一个离散函数 $f(i)$ 的自相关函数 $\gamma_f(k)$ 可以表示为

^① 维纳-辛钦定理指出, 自相关的傅里叶变换(FT)为功率密度谱^[BLA 81, REF 02]。