



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材



数字图像处理学

(第3版)

Digital Image Processing

Third Edition

© 阮秋琦 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

含光盘1张



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

数字图像处理学

(第3版)

阮秋琦 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书为“‘十二五’普通高等学校本科国家级规划教材”，是在前两版的基础上进一步修订而成的。该版本除全面、系统地介绍了数字图像处理学的基本理论及基本技术外，增加了一些新的内容，并结合作者多年从事数字图像处理的教学、科研的心得体会和科研成果，列举了大量的实例，这些实例一并汇集在光盘内，而不再在书中印刷，以便读者参考。

全书分10章，内容包括：绪论，图像、图像系统与视觉系统，图像处理中的正交变换，图像增强，图像编码，图像复原，图像重建，图像分析，数学形态学原理，模式识别的理论和方法。在每一章的结尾都附有必要的思考题，供教学或自学练习，以便加深对本书所述内容的理解。

本书可作为高等学校电子信息科学与工程类本科生的教材和研究生的教学参考书，也可供从事信号与信息处理、通信、自动控制、遥感、生物工程、医学成像、物理、化学、计算机科学乃至经济、商务及社会科学的科研人员参考学习。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理学 / 阮秋琦编著. —3版. —北京：电子工业出版社，2013.1

电子信息科学与工程类专业精品教材

ISBN 978-7-121-17759-0

I. ①数… II. ①阮… 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(2012)第 170028 号

策划编辑：陈晓莉

责任编辑：陈晓莉

印 刷：涿州市京南印刷厂

装 订：涿州市京南印刷厂

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

开 本：787×1 092 1/16 印张：28.75 字数：838 千字

版 次：2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元（含光盘 1 张）

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 zltts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010)88258888。

前 言

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幅数字照片。此后,由于遥感等领域的应用,使图像处理技术逐步受到关注并得到相应的发展。1964 年美国的“喷气推进实验室”处理了由太空船“徘徊者七号”发回的月球照片,这标志着第三代计算机问世后数字图像处理开始得到普遍应用。由于 CT 的发明、应用及获得备受科技界瞩目的诺贝尔奖,使得图像处理技术大放异彩。其后,数字图像处理技术发展迅速,目前已成为工程学、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中各学科之间学习和研究的对象。随着信息高速公路、数字地球、智能感知、物联网等概念的提出,以及 Internet 的广泛应用,信息传输中的图像及视频业务也会急剧增长。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使其成为人类获取信息的重要来源及利用信息的重要手段。今天,随着科技事业的进步以及人类需求的多样化发展,使得多学科的交叉、融合成为现代科学发展的突出特色和必然途径,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所利用是科学发展的必然。图像处理科学又是一门与国计民生紧密相连的一门应用科学,它已给人类带来了巨大的经济和社会效益,不久的将来它不仅会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强有力的工具。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实践上都存在着巨大的潜力。

本书为“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”。自第一版出版以来,深受广大读者的青睐,连续印刷,发行量近 6 万册。2006 年列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,在吸取广大读者及教师多年使用的建议后修订出版第 2 版。因此,本课程于 2007 年被教育部评为“国家精品课程”,并于 2011 年被教育部评为“普通高等教育精品教材”。

第 3 版仍为 10 章,是在前两版的基础上修订而成。全书保持前两版的写作风格和基本内容,结合作者近年来教学实践及科研的心得体会,并参考大量相关文献,概括地描述了图像处理理论和技术所涉及的各个分支。内容包括:绪论,图像、图像系统与视觉系统,图像处理中的正交变换,图像增强,图像编码,图像复原,图像重建,图像分析,数学形态学原理,模式识别的理论和方法。在每一章的结尾都附有必要的思考题,供教学或自学练习,以便加深对本书所述内容的理解。

众所周知,图像处理理论和技术所包含的内容是如此之广阔,以至于各章都涉及更加专深的理论及内容,因此,每一个章节自成一书亦不为过。本书只能提纲挈领地介绍图像处理的基本理论和方法,其目的是使读者对图像处理有一个全面的了解,以便为进一步深入研究打下一个扎实的基础。

随书配套光盘,提供大量教学的素材和实验,供选用本书教学的教师参考。内容包括:

(1) 根据多年的实践经验编制的一套实验演示软件。该软件既可以作教学或自学演示,加深读者的感性认识,同时可以在教学过程中用作实验软件或直接做图像处理之用。

(2) 系统实验演示软件的源代码。该软件采用 C 语言编制,提供程序源代码,供学习者编程

参考。

(3) 精心编制的与教学内容相匹配的实验案例、研究型综合实验课题及实验指导。

(4) 常用标准图像的素材,以及 MATLAB 新函数等。

此外,为了方便不同层次的教学,第 3 版还特意开发了三套 PowerPoint 教学课件(包括 32 学时、64 学时和研究生教学,可根据教学时数及内容裁剪),供选用该书作为教材的教师选用。

本书在编写中得到学校行政部门的大力支持,同时在编程实验及课件制作中也得到本所博士生、硕士生陆俊、王萌、仵冀颖、曹溪渺、支瑞聪、王雪峤、金一、孙雯玉等同学的帮助。此外,书中还引用了一些论文和资料,对此,本人深表感谢。本书第 3 版之所以能高效率、高质量地及时出版是与电子工业出版社的支持分不开的,在此,也表示由衷地感谢。由于本人水平所限,书中一定会有许多不足之处,敬请读者批评指正。

作者

于北京交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5 视觉系统	60
1.1 序言	1	2.5.1 视觉系统的基本构造	60
1.2 图像处理技术的分类	3	2.5.2 光觉和色觉	61
1.3 数字图像处理的特点	3	2.6 光度学及色度学原理	63
1.4 数字图像处理的主要方法及主要内容	4	2.6.1 颜色的表示方法及观察条件	63
1.4.1 数字图像处理方法	4	2.6.2 三基色混色及色度表示原理	63
1.4.2 数字图像处理的主要内容	4	2.6.3 CIE 的 R、G、B 颜色表示系统	64
1.5 数字图像处理的硬件设备	10	2.7 亮度和颜色感觉的视觉特征	66
1.6 数字图像处理的应用	11	2.7.1 刺激强度与感觉的关系	66
1.7 数字图像处理领域的发展动向	14	2.7.2 亮度适应和颜色适应	66
思考题	16	2.7.3 亮度对比和颜色对比	66
• 第 2 章 图像、图像系统与视觉系统	17	2.7.4 颜色感觉与刺激面积的关系	67
2.1 图像	17	2.7.5 主观颜色	67
2.1.1 有关光学的预备知识	17	2.7.6 记忆色	67
2.1.2 图像的概念	18	2.7.7 进入色、后退色、膨胀色、收缩色	68
2.1.3 图像信息的分类	20	2.7.8 颜色和爱好	68
2.1.4 图像的统计特性	21	2.8 视觉的空间性质	68
2.1.5 图像信息的信息量	25	2.8.1 视力	68
2.1.6 常用图像格式简介	26	2.8.2 视觉的空间频率特性	69
2.2 图像处理系统中常用的输入设备	28	2.8.3 颜色辨别门限的空间频率特性	70
2.2.1 图像处理系统中常用的输入设备	28	2.8.4 视觉的空间频率特性和图像的清晰度	70
2.2.2 飞点扫描设备	35	2.9 视觉的时间特性	70
2.2.3 鼓形扫描器	36	2.10 运动的感觉	72
2.2.4 微密度计	37	2.11 形状感觉与错视	73
2.2.5 其他图像输入设备	37	思考题	74
2.3 图像处理系统中的输出设备	38	第 3 章 图像处理中的正交变换	75
2.3.1 监视器	38	3.1 傅里叶变换	75
2.3.2 激光扫描器	40	3.1.1 傅里叶变换的定义及基本概念	75
2.3.3 液晶显示器	41	3.1.2 傅里叶变换的性质	77
2.3.4 等离子体 PDP 显示技术	47	3.1.3 离散傅里叶变换	79
2.3.5 数码纸显示技术	50	3.1.4 快速傅里叶变换	83
2.3.6 其他图像显示装置	56		
2.4 数字图像处理的主机系统	57		

3.1.5 用计算机实现快速傅里叶变换	88	4.2.1 邻域平均法	166
3.1.6 二维离散傅里叶变换	89	4.2.2 低通滤波法	167
3.2 离散余弦变换	91	4.2.3 多图像平均法	170
3.2.1 离散余弦变换的定义	91	4.3 图像尖锐化处理	171
3.2.2 离散余弦变换的正交性	92	4.3.1 微分尖锐化处理	171
3.2.3 离散余弦变换的计算	93	4.3.2 零交叉边缘检测	173
3.3 沃尔什变换	94	4.3.3 Canny 算子	175
3.3.1 正交函数的概念	95	4.3.4 Prewitt 算子	180
3.3.2 拉德梅克函数	96	4.3.5 经典的 Kirsch 算子	181
3.3.3 沃尔什函数	97	4.3.6 高通滤波法	182
3.3.4 沃尔什函数的性质	103	4.4 利用同态系统进行增强处理	185
3.3.5 沃尔什变换	104	4.5 彩色图像处理	187
3.3.6 离散沃尔什哈达玛变换	105	4.5.1 关于颜色的基本理论	188
3.3.7 离散沃尔什变换的性质	106	4.5.2 颜色模型	190
3.3.8 快速沃尔什变换	111	4.5.3 伪彩色图像处理	197
3.3.9 多维变换	113	4.5.4 关于彩色显示	200
• 3.4 哈尔函数及哈尔变换	116	4.5.5 实时伪彩色增强系统	201
3.4.1 哈尔函数的定义	116	思考题	203
3.4.2 哈尔函数的性质	117	第5章 图像编码	205
3.4.3 哈尔变换及快速算法	118	5.1 图像编码分类	205
• 3.5 斜矩阵与斜变换	120	5.2 图像编码中的保真度准则	207
3.5.1 斜矩阵的构成	120	5.2.1 客观保真度准则	207
3.5.2 斜变换	123	5.2.2 主观保真度准则	207
• 3.6 小波变换	124	5.3 PCM 编码	208
3.6.1 概述	124	5.3.1 PCM 编码的基本原理	208
3.6.2 时-频分析	125	5.3.2 PCM 编码的量化噪声	208
3.6.3 连续小波变换	129	5.3.3 编码器、译码器	209
3.6.4 离散小波变换	136	5.3.4 非线性 PCM 编码	211
3.6.5 小波包	144	5.3.5 亚奈奎斯特取样 PCM 编码	213
3.6.6 二维小波	146	5.4 统计编码	215
3.6.7 Mallat 算法	149	5.4.1 编码效率与冗余度	215
思考题	152	5.4.2 三种常用的统计编码法	217
第4章 图像增强	154	5.4.3 算术编码	224
4.1 用直方图修改技术进行图像增强	154	5.5 预测编码	227
4.1.1 直方图	154	5.5.1 预测编码的基本原理	227
4.1.2 直方图修改技术的基础	155	5.5.2 $\Delta M(DM)$ 编码	230
4.1.3 直方图均衡化处理	156	5.5.3 DPCM 编码	236
4.1.4 直方图规定化处理	159	5.6 变换编码	240
4.1.5 图像对比度处理	163	5.6.1 几种特殊的映射变换编码法	240
4.2 图像平滑化处理	166	5.6.2 正交变换编码	245
		5.7 图像编码的国际标准	256

5.7.1 H. 261 编码标准	257	7.7.4 图像重建的应用	317
5.7.2 H. 261 解码原理	263	思考题	326
5.7.3 H. 261 的图像复用编码	263	第8章 图像分析	327
5.7.4 传输缓冲器与传输编码	265	8.1 分割	327
思考题	266	8.1.1 灰度阈值法分割	327
第6章 图像复原	267	8.1.2 样板匹配	330
6.1 退化模型	267	8.1.3 区域生长	333
6.1.1 系统 H 的基本定义	267	8.1.4 区域聚合	334
6.1.2 连续函数退化模型	268	8.2 描绘	335
6.1.3 离散的退化模型	269	8.2.1 区域描绘	335
• 6.2 复原的代数方法	272	8.2.2 关系描绘	340
6.2.1 非约束复原方法	272	8.2.3 相似性描绘	348
6.2.2 约束复原法	272	8.2.4 霍夫变换	350
6.3 逆滤波	273	8.3 纹理分析	352
6.3.1 逆滤波的基本原理	273	8.3.1 纹理特征	352
6.3.2 去除由均匀直线运动引起的 模糊	274	8.3.2 用空间自相关函数做纹理 测度	353
• 6.4 最小二乘方滤波	278	8.3.3 傅里叶功率谱法	353
6.4.1 最小二乘方滤波的原理	278	8.3.4 联合概率矩阵法	354
6.4.2 用于图像复原的几种最小 二乘方滤波器	281	8.3.5 灰度差分统计法	355
• 6.5 约束去卷积	281	8.3.6 行程长度统计法	356
6.6 中值滤波	286	8.3.7 其他几种方法	356
6.6.1 中值滤波的基本原理	286	8.3.8 纹理的句法结构分析法	357
6.6.2 加权的中值滤波	288	8.4 形状分析的细线化	357
6.7 几种其他空间复原技术	290	8.5 图像配准	359
6.7.1 几何畸变校正	290	思考题	364
6.7.2 盲目图像复原	291	• 第9章 数学形态学原理	365
6.7.3 递归图像复原技术	292	9.1 数学形态学的发展	365
思考题	297	9.2 数学形态学的基本概念和 运算	366
第7章 图像重建	298	9.2.1 数学形态学定量分析原则	366
7.1 概述	298	9.2.2 数学形态学的基本定义及 基本算法	367
7.2 傅里叶变换重建	299	9.3 一些基本形态学算法	373
7.3 卷积法重建	301	9.3.1 边缘提取算法	374
7.4 代数重建方法	302	9.3.2 区域填充算法	374
7.5 重建的优化问题	305	9.3.3 连接部分提取算法	374
7.6 图像重建中的滤波器设计	307	9.3.4 凸壳算法	376
7.7 重建图像的显示	309	9.3.5 细化	377
7.7.1 重建图像的显示	309	9.3.6 粗化运算	377
7.7.2 单色显示	310	9.3.7 骨骼化算法	378
7.7.3 重建对象的显示	312		

9.3.8 裁剪	378	10.3.1 形式语言概述	408
9.4 灰度图像的形态学处理	382	10.3.2 句法结构方法	415
9.4.1 膨胀	382	10.3.3 误差校正句法分析	416
9.4.2 腐蚀	383	10.3.4 文法推断	424
9.4.3 开运算和闭运算	383	• 10.4 模糊集识别法简介	428
9.4.4 灰度形态学的应用	384	10.4.1 模糊集合及其运算	428
思考题	386	10.4.2 模糊关系及性质	431
第 10 章 模式识别的理论和方法	387	10.4.3 模糊模式识别的方法	434
10.1 概述	387	10.5 模式识别的几种应用	438
10.2 统计模式识别法	389	10.5.1 生物特征识别	438
10.2.1 决策理论方法	389	10.5.2 模式识别在医学上的应用 ...	446
10.2.2 统计分类法	396	10.5.3 模式识别在自动检测中的	
10.2.3 特征的抽取与选择	398	应用	446
10.2.4 统计学习理论与支持向量机 ...	400	思考题	448
• 10.3 句法结构模式识别	408	参考文献	449

第1章 绪 论

1.1 序言

人类传递信息的主要媒介是语音和图像。据统计,在人类接收的信息中,听觉信息占 20%,视觉信息占 60%,其他如味觉、触觉、嗅觉加起来不过占 20%。所以,作为传递信息的重要媒体和手段——图像信息是十分重要的,俗话说“百闻不如一见”、“一目了然”都反映了图像在传递信息中的独到之处。

照相术的发明和研究可认为是图像处理的起源,世界上公认的第一幅照片(见图 1-1)由法国人尼埃普斯于 1827 年拍摄,1839 年法国科学与艺术学院宣布达盖尔获得摄影术专利。

图像处理技术的最早应用当属遥感与医学领域。世界上出现第一幅照片(1839 年)及意大利人乘飞机拍摄了第一张照片(1909 年),通常被认为是遥感技术的起源,也是图像处理技术的兴起。在医学领域中利用图像进行直观诊断可追溯至 1895 年 X 射线的发现。德国维尔茨堡大学校长兼物理研究所所长伦琴教授(1845—1923 年,见图 1-2),在他从事阴极射线的研究时,发现了 X 射线。1895 年 11 月 8 日傍晚,他在研究阴极射线时,为了防止外界光线对放电管的影响,也为了不使管内的可见光漏出管外,他把房间全部弄黑,还用黑色硬纸给放电管做了个封套。为了检查封套是否漏光,他给放电管接上电源,当他看到封套没有漏光时,感到十分满意。可是,当他切断电源后,却意外地发现一米以外的一个小工作台上有一闪光,闪光是从一块荧光屏上发出的。他非常惊奇,因为阴极射线只能在空气中行进几厘米,这是别人和他自己的实验早已证实的结论。于是他全神贯注地重复刚才的实验,把荧光屏一步步地移远,直到 2 米以外仍可见到屏上有荧光。至此,伦琴确信这不是阴极射线了。治学态度非常严谨认真的伦琴经过反复实验,确信这是一种尚未为人所知的新射线,便取名为 X 射线。他发现的 X 射线可穿透上千页书、2~3 厘米厚的木板、几厘米厚的硬橡皮、15 毫米厚的铝板等。可是 1.5 毫米的铅板几乎就完全把 X 射线挡住了。



图 1-1 世界上第一幅照片

他还偶然发现 X 射线可以穿透肌肉照出手骨轮廓,于是有一次他夫人(见图 1-4)到实验室来看他时,他请她把手放在用黑纸包严的照相底片上,然后用 X 射线对准照射 15 分钟,显影后,底片上清晰地呈现出他夫人的手骨图像,手指上的结婚戒指也很清楚,如图 1-3 所示。这就是第一张具有历史意义的图像。这类成像技术后来在医学领域发挥了巨大作用,同时也促进了图像技术的发展。

数字图像处理技术起源于 20 世纪 20 年代,当时通过海底电缆从英国伦敦到美国纽约传输了一幅照片,它采用了数字压缩技术。就当时的通信技术水平来看,如果不压缩,传一幅图像要一星期时间,压缩后只用了 3 小时。1964 年美国的“喷气推进实验室”处理了由太空船“徘徊者七号”发回的月球照片,这标志着第三代计算机问世后数字图像处理概念开始得到应用。其后,数字图像处理技术发展迅速,目前已成为工程学、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中各学科之间学习和研究的对象。如今数字图像处理技术已给人类带来了巨大的经济和社会效益。未来,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强有力的工具。



图 1-2 德国科学家伦琴



图 1-3 世界第一张 X 光图像



图 1-4 伦琴教授的夫人

当前图像处理面临的主要任务是研究新的处理方法,构造新的处理系统,开拓更广泛的应用领域,构建图像处理自己的理论体系。

图像处理科学对人类具有重要意义,它表现在如下三个方面。

(1) 图像是人们从客观世界获取信息的重要来源

人类通过感觉器官从客观世界获取信息,即通过耳、目、口、鼻、手以听、看、味、嗅和触摸的方式获取信息。在这些信息中,视觉信息占 60%~70%。视觉信息的特点是信息量大,传播速度快,作用距离远,有心理和生理作用,加上大脑的思维和联想,具有很强的判断能力。其次是人的视觉十分完善,人的眼睛灵敏度高,鉴别能力强,不仅可以辨别景物,还能辨别人的情绪。由此可见,图像信息对人类来说是十分重要的。

(2) 图像信息处理是人类视觉延伸的重要手段

众所周知,人的眼睛只能看到可见光部分,但就目前科技水平看,能够成像的并不仅仅是可见光。一般来说可见光的波长为 $0.38\sim 0.8\mu\text{m}$,而迄今为止人类发现可成像的射线已有多种,如: γ 射线波长为 $0.003\sim 0.03\text{nm}$;X射线波长为 $0.03\sim 3\text{nm}$;紫外线波长为 $3\sim 300\text{nm}$;红外线波长为 $0.8\sim 300\mu\text{m}$;微波波长为 $0.3\sim 100\text{cm}$ 。这些射线均可以成像。利用图像处理技术把这些不可见射线所成图像加以处理并转换成可见图像,实际上大大延伸了人类视觉器官的功能,扩大了人类认识客观世界的能力。

(3) 图像处理技术对国计民生有重要意义

图像处理技术发展到今天,许多技术已日趋成熟。在各个领域的应用取得了巨大的成功和显著的经济效益,在工程领域、工业生产、军事、医学以及科学研究中的应用已十分普遍。例如:通过分析资源卫星得到的照片可以获得地下矿藏资源的分布及埋藏量;利用红外线、微波遥感技术不仅可以进行农作物估产、环境污染监测、国土普查,而且还可以侦查到隐蔽的军事设施;X射线 CT 已广泛应用于临床诊断,由于它可得到人体内部器官的断层图像,因此,可准确地确定病灶位置,为诊断和治疗疾病带来了极大的方便。至于在工业生产中的设计自动化及产品质量检验中更是大有可为。在安全保障及监控方面图像处理技术更是不可缺少的基本技术,如无损安全检查、指纹、虹膜、掌纹、人脸等生物特征识别与认证等应用例子随处可见,在信息安全中的信息隐藏及数字水印技术以其不可替代的优势也正受到广泛的关注,至于在通信及多媒体技术中,数字图像处理更是重要的关键技术。因此,图像处理技术在国计民生中的重要意义是显而易见的。正因为如此,图像处理理论和技术受到了各界的广泛重视。在科学工作者的不懈努力之下,已取得了令人瞩目的成就,并正在向更加深入及更高的层次发展。

1.2 图像处理技术的分类

图像处理技术基本可分为两大类,即模拟图像处理和数字图像处理。

1. 模拟图像处理

模拟图像处理(Analog Image Processing)包括:光学处理(利用透镜)和电子处理,如照相、遥感图像处理、电视信号处理等。模拟图像处理的特点是速度快,一般为实时处理,理论上讲可达到光的速度,并可同时并行处理。电视图像是模拟信号处理的典型例子,它处理的是活动图像,25 帧/秒。模拟图像处理的缺点是精度较差,灵活性差,很难有判断能力和非线性处理能力。

2. 数字图像处理

数字图像处理(Digital Image Processing)一般都用计算机处理或实时的硬件处理,因此,也称之为计算机图像处理(Computer Image Processing)。其优点是处理精度高,处理内容丰富,可进行复杂的非线性处理,有灵活的变通能力,一般来说只要改变软件就可以改变处理内容。其缺点是处理速度还有待提高,特别是进行复杂的处理更是如此。一般情况下处理静止画面居多,如果实时处理一般精度的数字图像,计算机大约要具有 100MIPS 的处理能力;其次是分辨率及精度尚有一定限制,如一般精度图像是 $512 \times 512 \times 8\text{bits}$,分辨率高的可达 $2048 \times 2048 \times 12\text{bits}$,如果精度及分辨率再提高,所需处理时间将显著地增加。

广义上讲,一般的数字图像很难为人所理解,因此,数字图像处理也离不开模拟技术,为实现人一机对话和自然的人—机接口,特别需要人去参与观察和判断的情况下,模拟图像处理技术是必不可少的。

1.3 数字图像处理的特点

数字图像处理的特点表现在如下几个方面。

(1) 图像信息量大

在数字图像处理中,一幅图像可看成是由图像矩阵中的像素(pixel)组成的,每个像素的灰度级至少要用 6bit(单色图像)来表示,一般采用 8bit(彩色图像),高精度的可用 12bit 或 16bit。一般分辨率的图像像素数为 256×256 像素、 512×512 像素,高分辨率图像可达 1024×1024 像素或 2048×2048 像素。

例如: $256 \times 256 \times 8 = 64 \text{ Kbytes}$
 $512 \times 512 \times 8 = 256 \text{ Kbytes}$
 $1024 \times 1024 \times 8 = 1 \text{ Mbytes}$
 $2048 \times 2048 \times 8 = 4 \text{ Mbytes}$

X 光照片一般有 $64 \sim 256 \text{ Kbytes}$ 的数据量,一幅遥感图像有 $3240 \times 2340 \times 4 = 30 \text{ Mbits}$,因此,大数据量为存储、传输和处理都带来了巨大的困难。

(2) 图像处理技术综合性强

在数字图像处理中涉及的基础知识和专业技术相当广泛。一般来说涉及通信技术、计算机技术、电子技术、电视技术,至于涉及的数学、物理等方面的基础知识就更多。

当今的图像处理理论大多是通信理论的推广,很多理论是把通信中的一维问题推广到二维,以便于分析。在此基础上,逐步发展自己的理论体系。因此,图像处理技术与通信技术休戚

相关。

在图像处理工程中的信息获取和显示技术主要源于电视技术,其中的摄像、显示、同步等各项技术是必不可少的。

计算机已是图像处理的常规工具。在图像处理中涉及软件、硬件、网络、接口等多项技术,特别是并行处理技术在实时图像处理中显得十分重要。

图像处理技术的发展涉及越来越多的基础理论知识,雄厚的数理基础及相关的边缘学科知识对图像处理科学的发展有越来越大的影响。总之,图像处理科学是一项涉及多学科的综合性的科学。

(3) 图像信息理论与通信理论密切相关

早在 1948 年,Shannon 就发表了“A mathematical Theory of Communication”(通信中的数学理论)一文,它奠定了信息论的基础。此后,信息理论已渗透到了各个领域。图像信息论也属于信息论科学中的一个分支。从当今的理论发展看,我们可以说,图像信息论是在通信理论研究的基础上发展起来的。图像理论是把通信中的一维时间问题推广到二维空间上来研究的,也就是说,通信研究的是一维时间信息;图像研究的是二维空间信息;通信理论研究的是时间域和频率域的问题;图像理论研究的是空间域和空间频率域(或变换域)之间的关系;通信理论中认为:任何一个随时间变化的波形都是由许多频率不同、振幅不同的正弦波组合而成的;图像理论认为:任何一幅平面图像都是由许多频率、振幅不同的 x - y 方向的空间频率波相叠加而成的,高空间频率波决定图像的细节,低空间频率波决定图像的背景和动态范围。

总之,通信中的一维问题都可推广到二维来研究和分析图像处理问题,尽管有些理论尚不完全贴切,但对图像自身理论体系的形成有极大的借鉴意义。

1.4 数字图像处理的主要方法及主要内容

1.4.1 数字图像处理方法

数字图像处理方法大致可分为两大类,即空域法和变换域法。

1. 空域法

这种方法是把图像视为平面中各个像素组成的集合,然后直接对这个二维函数进行相应的处理。空域处理法主要有两大类:

(1) 邻域处理法

邻域处理方法包括梯度运算(Gradient Algorithm)、拉普拉斯算子运算(Laplacian Operation)、平滑算子运算(Smoothing Operation)和卷积运算(Convolution Algorithm)等。

(2) 点处理法

点处理法包括灰度处理(Grey Processing),面积、周长、体积和重心运算等。

2. 变换域法

数字图像处理的变换域处理法是首先对图像进行正交变换,得到变换域系数阵列,然后再施行各种处理,处理后再将其反变换到空间域,得到处理结果。

这类处理包括滤波、数据压缩、特征提取等处理。

1.4.2 数字图像处理的主要内容

完整的数字图像处理工程大体上可分为图像信息的获取、图像信息的存储、图像信息的传

送、图像信息的处理和图像信息的输出与显示几个方面。

1. 图像信息的获取 (Image Information Acquisition)

就数字图像处理而言,图像信息获取主要是把一幅图像转换成适合计算机或数字设备处理的数字信号。这一过程主要包括摄取图像、光电转换及数字化等几个步骤。通常图像获取的方法有如下几种。

(1) 电视摄像机 (Video Camera)

这是目前使用最广泛的图像获取设备。早期主要有光电摄像管、超正析摄像管等,近年来主要采用 CCD 摄像设备,如图 1-5 所示。该设备有如下优点:设备小巧、速度快、成本低、灵敏度高;缺点:灰度层次较差、非线性失真较大、有黑斑效应,在使用中需校正。

目前 CCD 摄像机在分辨率、灵敏度等方面已达到较高水平,如 1920×1035 或 1024×1024 的高分辨率 CCD 摄像机已很成熟。近年来 CMOS 的摄像机已日趋普遍。

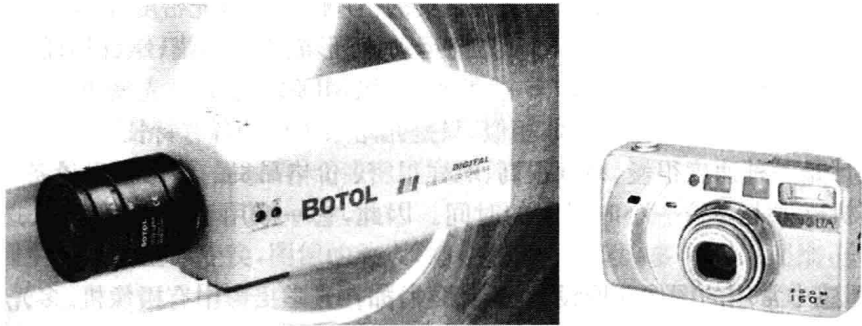


图 1-5 CCD 摄像设备

(2) 飞点扫描器 (Flying Point Scanner)

这是一种以光源做扫描的图像获取设备。飞点扫描器是通过阴极射线管 (CRT) 作为光源,在图片上进行扫描,其反射光由光电倍增管接收并变换为电信号输出,外形如图 1-6 所示。

飞点扫描器可获得与电视摄像机相仿的扫描速度,但位置精度和分辨率都比电视摄像机高,图像清晰,可透射成像也可反射成像。

飞点扫描器的缺点是稳定性和再现性比较差,这与荧光物质的不均匀、阴极射线管的畸变、光点在屏幕上的位置不够稳定等因素有关。其体积略显庞大,设备价格也较高。

(3) 扫描鼓

这是一种高精度的滚筒式的图像摄取设备 (见图 1-7)。机械扫描鼓的原理与传真机相似。照片或负片安放在鼓形滚筒上,最大尺寸可达 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$,由光线照射或从内部光源透射在图像上,再由光学系统收集后送至光电倍增管,变换成电信号,经放大后送至 A/D 变换器,再经高速数据接口送入计算机。一般先送入磁盘等外存储器,再做处理。

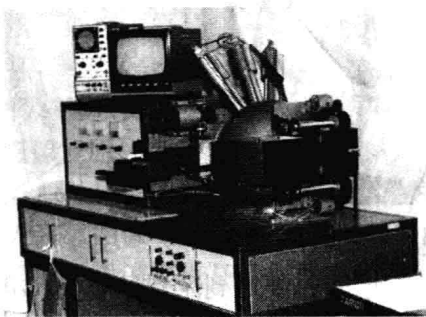


图 1-6 飞点扫描器

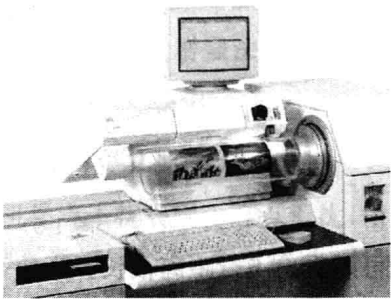


图 1-7 扫描鼓

机械扫描鼓是一种扫描精度高、信噪比高、可靠性好的图像输入设备。它输入一幅 36mm^2 的图片只需要数分钟,速度比平台式微密度计要快得多,它既可以输入也可以输出。其缺点是只能采用逐行扫描方式,不能用于随机扫描。同时,价格也相当昂贵,维护要求高。

(4) 扫描仪

扫描仪的特点是精度和分辨率中等,600 dpi 精度的扫描仪已常见,如图 1-8 所示。扫描仪的成本很低,近几年尤其降价显著,一般台式的已有不足一千元的产品。所以是当今应用最为广泛的图像信息获取设备。

扫描仪的缺点是速度较慢,精度一般。属非实时设备。

(5) 微光密度计

微光密度计(Microdensitometer)是一种平台机械扫描式的光电转换图像输入设备,它既可输入如胶片之类的负片图像,又可输入如照片、文件之类的正片图像。微光密度计的测量精度很高。使用计算机控制旋转被测样片的平台,作 x, y 方向运动,可形成逐行扫描、螺旋扫描、随机扫描及跟踪扫描。国外典型的产品有英国的 PDS 微光密度计、MDM—6 型微光密度计,都是比较先进的。以上产品的基本原理和操作都大体相似,只是光路系统设计各有特长。

微光密度计是一种速度很慢、精度很高、取样很密、价格昂贵的图像输入设备。一般输入一张图片到计算机磁带上要费一小时以上的时间。因此,它一般用于要求精度高、速度慢的图像输入。

此外,在遥感中常用的图像获取设备已有多种,如在光学摄影中有摄像机、多光谱相机等,多光谱扫描仪(MSS);微波辐射计、侧视雷达、真实孔径雷达、合成孔径雷达(SAR)也都是遥感中常用的图像获取设备。

合成孔径雷达(见图 1-9)是 20 世纪 50 年代发展起来的技术。它采用小天线通过直线飞行(长距离)合成一条很长的线阵天线,从而达到优良的横向方位的分辨率。目前的国际水平,在距雷达 $50\sim 100\text{km}$ 范围内,合成孔径雷达(SAR)的纵向和横向分辨率已达 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 以下。雷达的天线孔径计算公式如下:

$$L=K \frac{\lambda R_0}{2\delta\gamma_a}$$

例如, $\lambda=3\text{cm}$, 距雷达 50km 处的分辨率要达到 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 时所需的飞行直线合成孔径为: $\lambda=3\text{cm}$, $K=1.35$, $R_0=50\text{km}$, $\delta\gamma_a=1$, $L=1012\text{m}$ 。

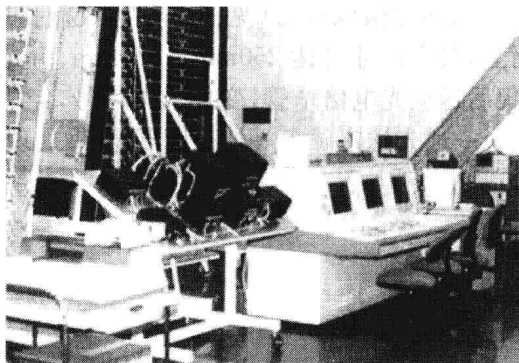


图 1-9 星载合成孔径雷达(SAR)

由此可以看出飞行距离很长。为使飞机能直线、恒速飞行,要用到陀螺导航仪、GPS 定位系统等设备和技术加以保证。

2. 图像信息的存储(Image Information Storage)

图像信息的突出特点是数据量巨大。一般作档案存储主要采用磁带、磁盘或光盘。为解决海量存储问题,主要研究数据压缩、图像格式、图像数据库以及图像检索技术等。其中,图像压缩和检索是当前研究的热点之一。

3. 图像信息的传送(Image Information Transmission)

图像信息的传送可分为系统内部传送与外部远距离传送。内部传送多采用 DMA 技术(Direct Memory Access)以解决速度问题。外部远距离传送主要研究图像通信问题。电视是大家熟知的图像传输方式,目前有各种制式和标准,如彩色电视的 NTSC、PAL、SECAM 制式,会议电视的 H. 320、H. 323、RTP/RTCP、UDP 传输协议,以及 H. 261、H. 263、H. 264、H. 26L、MPEG1、MPEG2、MPEG4、MPEG7 等编码标准。图像通信主要解决占用带宽问题,图像通信网正在逐步建立。

4. 数字图像的处理(Digital Image Processing)

目前,数字图像处理多半采用计算机处理,因此,有时也称为计算机图像处理(Computer Image Processing)。数字图像处理概括地说,主要包括如下几项内容:几何处理,算术处理,图像增强,图像复原,图像重建,图像编码,图像识别和图像理解。

(1) 几何处理(Geometrical Processing)

几何处理主要包括坐标变换,图像的放大、缩小、旋转、移动,多个图像配准,全景畸变校正,扭曲校正,周长、面积、体积计算等。其中,图像配准问题是十分重要的处理方法之一,它涉及众多的数学变换问题,特别是在医学图像处理中具有重要的应用价值。

(2) 算术处理(Arithmetic Processing)

算术处理主要对图像施以加、减、乘、除等运算,虽然该处理主要针对像素点的处理,但非常有用,如医学图像的减影处理就有显著的效果,如图 1-10 所示。

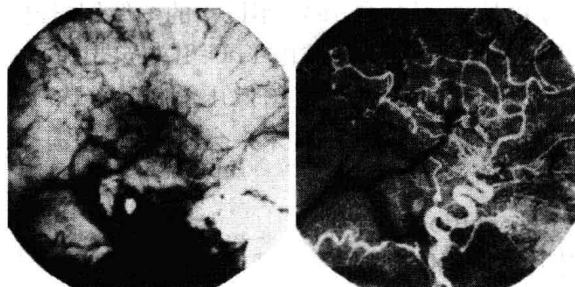


图 1-10 减影处理的实例

(3) 图像增强(Image Enhancement)

图像增强处理主要是突出图像中感兴趣的信息,而减弱或去除不需要的信息,从而使有用信息得到加强,便于区分或解释。主要方法有直方图修改技术、伪彩色增强法(Pseudo Color)、灰度窗口、图像平滑、图像尖锐化处理、同态处理等技术。

(4) 图像复原(Image Restoration)

图像复原处理的主要目的是去掉干扰和模糊,恢复图像的本来面目。典型的例子如去噪就属于复原处理。图像噪声包括随机噪声和相干噪声,随机噪声干扰表现为麻点干扰,相干噪声表现为网纹干扰。去模糊也是复原处理的任务。这些模糊来自透镜散焦、相对运动、大气湍流、云层遮挡等。这些干扰可用维纳滤波、逆滤波、同态滤波等方法加以去除。

(5) 图像重建(Image Reconstruction)

几何处理、算术处理、图像增强、图像复原都是从图像到图像的处理,即输入的原始数据是图像,处理后输出的也是图像,而重建处理则是从数据到图像的处理。也就是说输入的是某种数据,而处理结果得到的是图像。该处理的典型应用就是 CT 技术,CT 技术发明于 1972 年,早期为 X 光(X-ray)CT,后来发展有 ECT、超声 CT、核磁共振(NMR)等。图像重建的主要算法有代数法、迭代法、傅里叶反投影法、卷积反投影法等,其中以卷积反投影法运用最为广泛,因为它的运算量小、速度快。值得注意的是三维重建算法发展很快,而且由于与计算机图形学相结合,把多个二维图像合成三维图像,并加以光照模型和各种渲染技术,能生成各种具有强烈真实感及纯净的高质量图像。三维图形的主要算法有线框法、表面法、实体法、彩色分域法等,这些算法在计算机图形学中都有详尽的介绍。三维重建技术也是当今颇为热门的虚拟现实和科学计算可视化技术的基础。

(6) 图像编码(Image Encoding)

图像编码的研究属于信息论中信源编码范畴,其主要宗旨是利用图像信号的统计特性及人类视觉的生理学及心理学特性对图像信号进行高效编码,即研究数据压缩技术,以解决数据量大的矛盾。一般来说,图像编码目的有三个:①减少数据存储量;②降低数据率以减少传输带宽;③压缩信息量,便于特征抽取,为识别做准备。

就编码而言,M. Kunt 提出第一代、第二代编码的概念。Kunt 把 1948 年至 1988 年这 40 年中研究的以去除冗余为基础的编码方法称为第一代编码。如 PCM、DPCM、 ΔM 、亚取样编码法;变换编码中的 DFT、DCT、Walsh-Hadamard 变换等方法,以及以此为基础的混合编码法均属于经典的第一代编码法。而第二代编码方法多是 20 世纪 80 年代以后提出的新的编码方法,如金字塔编码法、Fractal 编码法、基于神经网络的编码法、小波变换编码法、模型基编码法等。现代编码法的特点是:①充分考虑人的视觉特性;②恰当地考虑对图像信号的分解与表述;③采用图像的合成与识别方案压缩数据率。

图像编码应是经典的研究课题,经过自 1948 年以来的图像编码已有多种成熟的方法得到应用。随着多媒体技术的发展已有若干编码标准由 ITU-T 制定出来。如 JPEG、H. 261、H. 263、MPEG1、MPEG2、MPEG4、MPEG7、JBIG(二值图像压缩,Joint Bi-level Image Coding Expert Group)等。相信经广大科技工作者的不懈努力,未来会有更多、更有效的编码方法问世,以满足多媒体信息处理及通信的需要。

(7) 图像识别(Image Recognition)

图像模式识别是数字图像处理的又一研究领域。当今,模式识别方法大致有三种,即统计识别法、句法结构模式识别法和模糊识别法。

统计识别法侧重于特征,句法结构模式识别法侧重于结构和基元,模糊识别法是把模糊数学的一些概念和理论用于识别处理。在模糊识别处理中充分考虑人的主观概率,同时也考虑了人的非逻辑思维方法及人的生理、心理反映,这一独特性的识别方法目前正处于研究阶段,方法尚未成熟。

(8) 图像理解(Image Understanding)

图像理解是由模式识别发展起来的方法。该处理输入的是图像,输出的是一种描述。这种描述并不仅是单纯地用符号做出详细的描绘,而且要利用客观世界的知识使计算机进行联想、思考及推论,从而理解图像所表现的内容。图像理解有时也叫景物理解。在这一领域还有相当多的问题需要进行深入研究。

以上所述的八项处理任务是图像处理所涉及的主要内容。总的说来,经过多年的发展,图像