



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

数字图像处理

(第二版)

许录平 编著



科学出版社

晋 类
国家 教材

数字图像处理

(第二版)

许录平 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍了数字图像处理的基本概念、常用方法、实用技术和典型应用。全书分三大部分共九章,第一部分是数字图像处理基础,包括绪论、数字图像处理基础和图像变换。第二部分介绍图像处理的基本方法和技术,包括图像增强、图像恢复和图像压缩编码。第三部分讲述数字图像分析的基本原理和方法,包括图像分割、图像描述和图像分类识别。内容系统,重点突出,理论与实例并重,每章配有小结和习题。

本书可作为高等院校信息与通信工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、生物医学工程、光学工程、电子科学与技术和网络与信息安全等学科研究生的图像处理课程的教材,以及电子信息工程、通信工程、探测制导与控制技术、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程、电气工程及其自动化等相关专业本科生的教材,也可作为从事图像处理与分析、模式识别、人工智能和计算机应用的研究和开发的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理 / 许录平编著. —2 版. —北京:科学出版社,2017. 1

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-051142-3

I. ①数… II. ①许… 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(2016)第 312700 号

责任编辑:潘斯斯 / 责任校对:桂伟利

责任印制:霍 兵 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第 二 版 印张:18

2017 年 1 月第十五次印刷 字数:363 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

本书第一版是作者于 2007 年按照高等院校教材及科技工作者参考的要求,集作者及其团队 20 多年的数字图像处理教学及科学研究经验编写的,以作为高等院校信息与通信工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、生物医学工程、光学工程、电子科学与技术和网络与信息安全等学科研究生的图像处理课程的教材,以及电子信息工程、通信工程、探测制导与控制技术、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程、电气工程及其自动化等相关专业本科生的教材,也可作为从事图像处理与分析、模式识别、人工智能和计算机应用的研究和开发的工程技术人员的参考书。本书内容系统,重点突出,理论与实例并重,每章配有小结和习题。出版后受到了高校师生和广大科技工作者的一致好评,期间经过修改和完善,已累计出版发行 2.5 万册,取得了良好的社会效益。

近十年来,数字图像处理技术得到了迅猛发展,并已应用到许多领域,如工业、农业、国防、军事、生物医学、通信、社会和日常生活等,尤其在人工智能等应用领域,数字图像处理已成为其核心技术。对此,作为教材使用的师生和广大科技读者需要与时俱进的新版书籍。在科学出版社“十二五”规划教材项目和西安电子科技大学教材立项的支持下,作者在全面总结原教材被高等院校作为教材和科技工作者作为参考书使用的基础上,适应学科和专业的发展需要,汲取教材使用者反馈的信息,尤其是宝贵的意见和建议,对全书进行了系统全面的修改。

本次修订,使本书作为教材和技术参考的特色更加突出。主要表现在如下几个方面。

(1) 结构上力求系统、全面,形式上保持简洁、实用,内涵上注重创新意识和能力培养。

(2) 遵循数字图像处理的特点,从概念出发,深入浅出;结合应用,融合科学研究成果。

(3) 全书覆盖数字图像处理基础、数字图像处理技术和图像分析等数字图像处理主要内容,使其具备教材和参考书的必备功能。

(4) 善于总结,明确数字图像处理方法或技术之间的关系,提出方法或技术的本质。比如,在图像增强中,提出了图像锐化的实质就是原图像加上加重的边缘,这样既明确了图像锐化和边缘检测的区别,同时又给出了二者的有机融合关系。

(5) 从教和学以及知识获取、理解掌握的特点出发,合理安排各章节的内容,以便于读者尽快理解和掌握。比如,在图像变换一章的离散沃尔什-哈达玛变换中,先介绍了变换核具有递推性的哈达玛变换(该方法的出现实际晚于离散沃尔什

变换),再介绍离散沃尔什变换,并提出了其变换核的间接递推性,方便了读者的理解掌握。

(6) 各章配有小结和习题,全书配有学习指导书和教学课件,以便于教师讲授,读者学习、理解掌握。

本书修订过程中,得到了科学出版社“十二五”规划教材和西安电子科技大学教材建设立项的资助,在此表示感谢。同时,也参考了国内外大量书籍和论文等参考资料,作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,期待读者一如既往的批评指正。

作者

2016 年 12 月于西安电子科技大学

第一版前言

数字图像处理就是利用计算机或数字系统对图像进行转换、加工、分析和处理,以改善其视觉效果,满足实际应用需要,或达到识别理解的目的。1964年美国喷气推进实验室对“旅行者7号”航天探测器传送的大批月球照片用计算机处理后,得到了清晰逼真的图像,开创了图像处理的先河。20世纪70年代,数字图像处理技术开始应用于医学、地球遥感监测和天文学等领域,其中的CT(计算机断层摄像术)就是图像处理在医学诊断领域最重要的应用之一。

近十年来,数字图像处理技术得到了迅猛发展,并已应用到许多领域,如工业、农业、国防军事、社会和日常生活、生物医学、通信等。今天,几乎不存在与数字图像处理无关的技术领域。因此,许多领域的研究者、教师、学生、科研和工程技术人员都迫切希望获取和掌握有关数字图像处理的方法、技术和应用技能。然而,数字图像处理的理论方法与技术涉及数学、物理学、信号处理、控制论、模式识别、人工智能、生物医学、神经心理学、计算机科学与技术等众多学科,它是一门兼具交叉性和开放性的学科。图像处理和分析所涉及的知识种类多样,方法繁多。鉴于此,作者在近二十年图像处理教学和科研实践的基础上,参考了近年来国内外相关领域的最新成果,编写了这本数字图像处理教材,旨在介绍数字图像处理的基本概念、主要方法和典型应用。

全书共9章,可以分为三个部分。第1~3章为图像处理基础部分,介绍有关数字图像处理的基础知识,主要包括图像及图像处理的概念、应用领域,人的视觉特性、图像数字化和图像变换。第4~6章为第二部分,主要介绍常用的数字图像处理技术。第4章介绍有关图像增强的理论及方法,在此基础上第5章阐述了图像恢复的相关知识。它们的主要目的就是为了提高图像质量,如去除噪声、增强图像细节的清晰度、恢复原图像等,而第6章的图像压缩编码则是以压缩表示图像信息的数据量为目的。第7~9章为图像分析部分。第7章介绍了图像分割的方法和技术,它是图像分析的必要准备。在第8章,利用图像描述的有关知识对已分割后的局部区域和图像整体作出描述和归纳,分析其局部特性并得到目标物的特征参数。第9章根据前面得到的目标物特征参数对图像进行相应的分类和识别,并列举了一些图像识别的经典方法,如统计模式识别、结构模式识别和神经网络识别方法等。

本书的部分章节中加入了一些科研成果,可作为研究生课程的内容,仅供本科生及其他读者参考。另外,在每章后面都有习题,习题解答提示及部分答案可见配套的学习指导书。

本书以讲透概念,重视方法,突出应用和好教易学为指导思想。从概念出发,精简实用,返璞归真,顺理成章,深入浅出。同时配有学习指导书和电子教案,以构成立体化教材,提高教学效果。

本书可作为高等院校信息与通信工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、生物医学工程、光学工程和电子科学与技术等学科研究生的图像处理课程的教材,以及电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程、电气工程及其自动化等相关专业本科生的教材,也可作为从事图像处理与分析、模式识别、人工智能和计算机应用研究开发的工程技术人员的参考书。

本书编写过程中,得到了西安电子科技大学教材建设立项的资助,在此表示感谢。同时,也参考了国内外大量书籍和论文等参考资料,对书中所引用参考资料的作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,敬请读者批评指正。

作 者

于西安电子科技大学

目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 图像和图像处理	1
1.1.1 图像	1
1.1.2 图像处理	1
1.1.3 图像表示	2
1.2 数字图像处理的步骤和方法	3
1.2.1 数字图像处理的基本步骤	3
1.2.2 数字图像处理的内容和方法	4
1.3 数字图像处理系统的组成	6
1.3.1 数字图像输入模块	6
1.3.2 数字图像存储模块	7
1.3.3 数字图像输出模块	7
1.3.4 数字图像通信模块	7
1.3.5 数字图像处理与分析模块	8
1.4 数字图像处理的主要应用	8
1.5 全书内容简介	10
习题	11
第 2 章 数字图像处理基础	12
2.1 色度学基础	12
2.1.1 三基色原理	12
2.1.2 颜色模型	13
2.2 人的视觉特性	17
2.2.1 人眼的构造与机理要点	17
2.2.2 人的视觉模型	19
2.2.3 人眼的亮度感觉	21
2.3 图像数字化	24
2.3.1 图像采样	24
2.3.2 采样图像的均匀量化	26

2.3.3 数字化参数的选择及对图像的影响	27
2.4 数字图像表示形式和特点	29
2.5 小结	31
习题	31
第3章 图像变换	33
3.1 图像的几何变换	33
3.1.1 图像几何变换的一般表达式	33
3.1.2 平移变换	33
3.1.3 比例缩放	34
3.1.4 旋转变换	34
3.1.5 仿射变换	34
3.1.6 透视变换	35
3.1.7 灰度插值	36
3.2 图像的离散傅里叶变换	38
3.2.1 一维离散傅里叶变换(1D-DFT)	38
3.2.2 二维离散傅里叶变换(2D-DFT)	39
3.3 图像变换的一般表示形式	43
3.4 图像的离散余弦变换	46
3.5 图像的离散沃尔什-哈达玛变换	48
3.5.1 离散哈达玛变换(DHT)	48
3.5.2 离散沃尔什变换(DWT)	50
3.5.3 2D-DHT 和 2D-DWT 的特点及举例	51
3.6 K-L 变换	53
3.6.1 图像的向量表示和统计参数	53
3.6.2 C_f 的特征值和特征向量	54
3.6.3 离散 K-L 变换及其性质	54
3.6.4 图像的主分量表示和降维重建	56
3.7 小结	58
习题	58
第4章 图像增强	60
4.1 图像的对比度增强	60
4.1.1 灰度线性变换	61
4.1.2 灰度的非线性变换	62
4.2 图像的直方图修正	65
4.2.1 灰度直方图的定义	65

4.2.2	灰度直方图的性质	65
4.2.3	直方图与图像清晰性的关系	66
4.2.4	直方图均衡化	67
4.2.5	直方图规定化	70
4.3	图像平滑	75
4.3.1	空域平滑法	75
4.3.2	频域低通滤波法	80
4.3.3	中值滤波法	86
4.4	图像锐化	88
4.4.1	空域锐化法	89
4.4.2	高频提升滤波法	93
4.5	图像的同态滤波	97
4.6	图像的彩色增强	99
4.6.1	伪彩色(pseudo color)增强	99
4.6.2	假彩色(false color)增强	100
4.6.3	真彩色图像增强	101
4.7	小结	102
	习题	103
第5章	图像恢复	105
5.1	退化模型	105
5.1.1	连续退化模型	106
5.1.2	离散退化模型	107
5.1.3	循环矩阵 H 的对角化	108
5.1.4	频域退化模型	110
5.2	常见退化函数模型及辨识方法	110
5.2.1	几种常见退化函数模型	111
5.2.2	退化函数的辨识方法	111
5.3	图像的无约束恢复——反向滤波法	114
5.3.1	无约束恢复	115
5.3.2	反向滤波法	115
5.4	图像的有约束最小二乘恢复——维纳和约束最小平方滤波法	117
5.4.1	维纳滤波法	118
5.4.2	约束最小平方滤波法	119
5.5	几何畸变图像的恢复	122
5.5.1	空间坐标变换	122

5.5.2 灰度值的确定	124
5.6 超分辨率图像复原	126
5.6.1 超分辨率复原的理论基础	126
5.6.2 超分辨率图像复原的数学模型	128
5.6.3 超分辨率图像复原算法	129
5.6.4 超分辨率图像复原的研究现状与发展趋势	135
5.7 小结	136
习题	136
第6章 图像压缩编码	138
6.1 概述	138
6.1.1 图像压缩的可能性	138
6.1.2 图像压缩编码的概念	138
6.1.3 图像压缩方法分类	138
6.2 图像编码的基本理论	140
6.2.1 数据冗余	140
6.2.2 图像编解码模型	142
6.2.3 保真度准则	144
6.3 无损压缩编码	146
6.3.1 信息量	146
6.3.2 信源的熵	146
6.3.3 基本编码定理	147
6.3.4 霍夫曼编码法	148
6.3.5 香农-费诺编码法	150
6.3.6 算术编码	151
6.4 限失真编码	153
6.4.1 信息率失真理论	153
6.4.2 预测编码	154
6.4.3 正交变换编码	159
6.5 二值图像编码	164
6.5.1 常数块编码与空白块编码	164
6.5.2 游程编码(RLC)	164
6.5.3 四叉树编码	165
6.6 小波变换及在图像压缩编码中的应用	166
6.6.1 从傅里叶分析到小波变换	167
6.6.2 连续小波变换	168

6.6.3	二进小波变换	170
6.6.4	多分辨率分析	171
6.6.5	图像的小波变换编码	175
6.7	图像压缩国际标准简介	184
6.7.1	JPEG 标准	184
6.7.2	JPEG2000	184
6.7.3	H. 261/H. 263	185
6.7.4	MPEG	185
6.8	小结	186
	习题	187
第7章	图像分割	188
7.1	图像分割的定义和依据	188
7.1.1	图像分割的定义	188
7.1.2	灰度图像分割的依据	189
7.1.3	图像分割方法分类	189
7.2	边缘点检测	190
7.2.1	边缘点检测的基本原理	190
7.2.2	正交梯度算子法	191
7.2.3	方向梯度法(方向匹配模板法)	195
7.2.4	线检测模板	201
7.2.5	二阶导数算子法	202
7.3	边缘线跟踪	204
7.3.1	局部边缘连接法	205
7.3.2	光栅扫描跟踪法	205
7.3.3	Hough 变换法	207
7.4	门限化分割	211
7.4.1	灰度门限法	211
7.4.2	灰度门限的确定	212
7.5	区域分割法	216
7.5.1	区域生长法	216
7.5.2	分裂合并法	218
7.6	小结	219
	习题	219
第8章	图像描述	221
8.1	像素间的基本关系	221

8.1.1	像素的相邻与邻域	221
8.1.2	像素的邻接和连通	222
8.1.3	区域和边界	224
8.1.4	距离测量	225
8.2	目标物边界的描述	226
8.2.1	目标物边界的链码表示	226
8.2.2	曲线拟合	229
8.2.3	闭合曲线的傅里叶描述子	230
8.3	目标物的区域描述	232
8.3.1	区域的四叉树描述	232
8.3.2	区域的拓扑描述	233
8.3.3	骨架描述	234
8.4	图像的几何特征	238
8.4.1	区域面积	238
8.4.2	曲线长度和区域周长	238
8.4.3	区域圆形度	239
8.4.4	区域的外接矩形	239
8.4.5	区域的偏心率	239
8.4.6	区域的紧凑性	240
8.5	图像的矩描述	241
8.5.1	矩描述子的定义	241
8.5.2	矩的不变性	241
8.6	图像的纹理描述	243
8.6.1	基于粗糙度的纹理描述	244
8.6.2	灰度差分统计的纹理分析	245
8.6.3	等灰度游程长度的纹理描述	245
8.6.4	灰度共生矩阵纹理描述	247
8.6.5	傅里叶功率谱纹理描述	249
8.7	形态学在图像描述中的应用	250
8.7.1	形态学在区域描述中的应用	250
8.7.2	形态学在边界描述中的应用	256
8.7.3	形态学用于纹理描述	257
8.8	小结	257
	习题	258
第9章	图像分类识别	260
9.1	图像匹配	260

9.1.1 模板匹配	260
9.1.2 特征匹配	262
9.2 图像的分类	263
9.2.1 监督分类法	263
9.2.2 非监督分类法(聚类分析法)	266
9.3 图像识别	266
9.3.1 统计模式识别	266
9.3.2 结构模式识别	269
9.3.3 神经网络识别	270
9.4 小结	271
习题	272
参考文献	273

第 1 章 绪 论

本章主要介绍有关数字图像处理的一些基本概念和应用领域。其中包括图像和图像处理的概念、图像处理技术、图像处理系统构成以及图像处理的重要应用。

1.1 图像和图像处理

1.1.1 图像

“图”是物体透射或反射光的分布,是客观存在的。“像”是人的视觉系统对图在大脑中形成的印象或认识,是人的感觉^[1]。图像(image)是图和像的有机结合,既反映物体的客观存在,又体现人的心理因素;图像也是对客观存在的物体的一种相似性的生动模仿或描述。或者说图像是客观对象的一种可视表示,它包含了被描述对象的有关信息。人们在工作或日常生活中会经常见到图像,比如红外图像、雷达图像、医学图像、照片、绘画、动画、电视画面等都是图像的最直接的例子,它是人们最主要的信息源。据统计,人类从外界获取的信息中约有 75% 来自视觉,即以图像的形式获取。人们常说“百闻不如一见”“一目了然”都说明了这个事实^[2]。

人们可以通过各种观测系统从被观察的场景获得图像。观测系统有照相机和摄像机、显微图像摄像系统、卫星多光谱扫描成像系统、合成孔径雷达成像系统、医学成像系统(超声成像系统、磁共振成像系统等)等。从观测系统所获取的图像可以是静止的,如照片、绘画、医学显微图片等;也可以是运动的,如飞行物、心脏图像等视频图像;还可以是三维(3D)的,大部分装置都将 3D 客观场景投影到二维(2D)像平面,所得图像是 2D 的;图像可以是黑白的,也可以是彩色的。根据图像空间坐标和幅度(亮度或色彩)的连续性可分为模拟(连续)图像和数字图像。模拟图像是空间坐标和幅度都连续变化的图像,而数字图像是空间坐标和幅度均用离散的数字(一般是整数)表示的图像。

1.1.2 图像处理

图像处理(image processing)就是对图像信息进行加工处理和分析,以满足人的视觉心理需要和实际应用或某种目的(如压缩编码或机器识别)的要求。图像处理可分为以下 3 类。

1. 模拟图像处理(analogue image processing)

模拟图像处理也称光学图像处理,它是利用光学透镜或光学照相方法对模拟图像进行的处理。光学图像处理方法历史已久,并在 20 世纪 60 年代激光全息技术出现后,得到了进一步的发展。该方法具有实时性强、速度快、处理信息量大、分辨率高等优点。但是处理精度低,灵活度差,难有判断功能。从 60 年代起,随着计算机技术的发展和广泛应用,数字图像处理诞生并得到了迅速的发展。

2. 数字图像处理(digital image processing)

数字图像处理就是利用计算机对数字图像进行处理。随着计算机和多媒体技术的迅速发展和普及,数字图像处理技术受到了空前广泛的重视,出现了许多新的应用领域和新的处理方法。它具有精度高、处理内容丰富、方法易变、灵活度高等优点。但是它的处理速度受到计算机和数字器件的限制,一般也是串行处理,因此处理速度较慢。

3. 光电结合处理(optoelectronic processing)

光电结合处理是用光学方法完成运算量巨大的处理(如频谱变换等),而用计算机对光学处理结果(如频谱)进行分析判断等。该方法是前两种方法的有机结合,它集结了二者的优点。光电结合处理是今后图像处理的发展方向,也是一个值得关注的研究方向。随着集成光学的发展和光电结合的应用,在光学计算机出现以后,图像处理技术将会有全新的巨大突破。

1.1.3 图像的表达

1. 图像的数学表示

任何一幅图像都可看作是由无数个很小的光点组成的光强度集合,因此用数学方法描述一幅图像时,常考虑它的点的性质。一幅图像所包含的信息首先表现为光的强度(intensity),即一幅图像可看成是空间各个坐标点上的光强度 I 的集合。其普遍数学表达式为

$$I = f(x, y, z, \lambda, t) \quad (1.1.1)$$

式中, (x, y, z) 为空间坐标; λ 为波长; t 为时间; I 为光点 (x, y, z) 的强度(幅度)。

式(1.1.1)表示一幅运动(t)的、彩色/多光谱(λ)的、立体(x, y, z)图像。

对于静止图像,则与时间 t 无关;对于单色图像(也称灰度图像),则波长 λ 为一常数;对于平面图像,则与坐标 z 无关。即在这 3 种情况的每一种下,图像的表达可省略掉一维,即

(1) 静止图像 $I = f(x, y, z, \lambda)$ 。

(2) 灰度图像 $I = f(x, y, z, t)$ 。

(3) 平面图像 $I = f(x, y, \lambda, t)$ 。

而对于平面上的静止灰度图像,其数学表达式可简化为

$$I = f(x, y) \quad (1.1.2)$$

运动图像可用(静止)图像序列表示,彩色图像可分解成三基色图像,三维图像可由二维重建。因此本书主要针对平面上的静止灰度图像进行介绍。

2. 图像的特点

对于表示图像的光强度函数 $f(x, y)$,根据它所代表的物理内容,应具有如下特点:

1) 空间有界

因为人的视野有限,人们看到的一幅图像应该是空间有界的,或在实际应用中要表示的一幅图像的大小也应该是有限的,即对于图像 $f(x, y)$ 应该有: $L_x^- \leq x \leq L_x^+$, $L_y^- \leq y \leq L_y^+$ 。

2) 幅度(强度)有限

作为图像的幅度(光强度)的量度函数, $f(x, y)$ 应该是非负的,即 $f(x, y) \geq 0$, 而且是一个有限值,即对于所有的 x, y 都有 $0 \leq f(x, y) \leq B_m$, 其中 B_m 为有限值。

所以,我们处理的平面图像是一个二元、有界、非负连续(指模拟图像)函数,其具有良好的可分析特性,即可以对其进行微分、积分,也可以进行傅里叶变换等各种变换处理。

1.2 数字图像处理的步骤和方法

1.2.1 数字图像处理的基本步骤

数字图像处理技术在广义上是指各种与数字图像处理有关的技术的总称,目前主要指应用数字计算机和数字系统对数字图像进行加工处理的技术。这包括利用计算机和其他数字系统进行和完成的一系列数字图像处理任务,基本步骤如下:

1. 图像信息的获取

首先要获取能用计算机和数字系统处理的数字图像,其方法包括直接用数码相机、数码摄像机等输入设备来产生,或利用扫描仪等转换设备,将照片等模拟图像变成数字图像,这就是图像数字化。