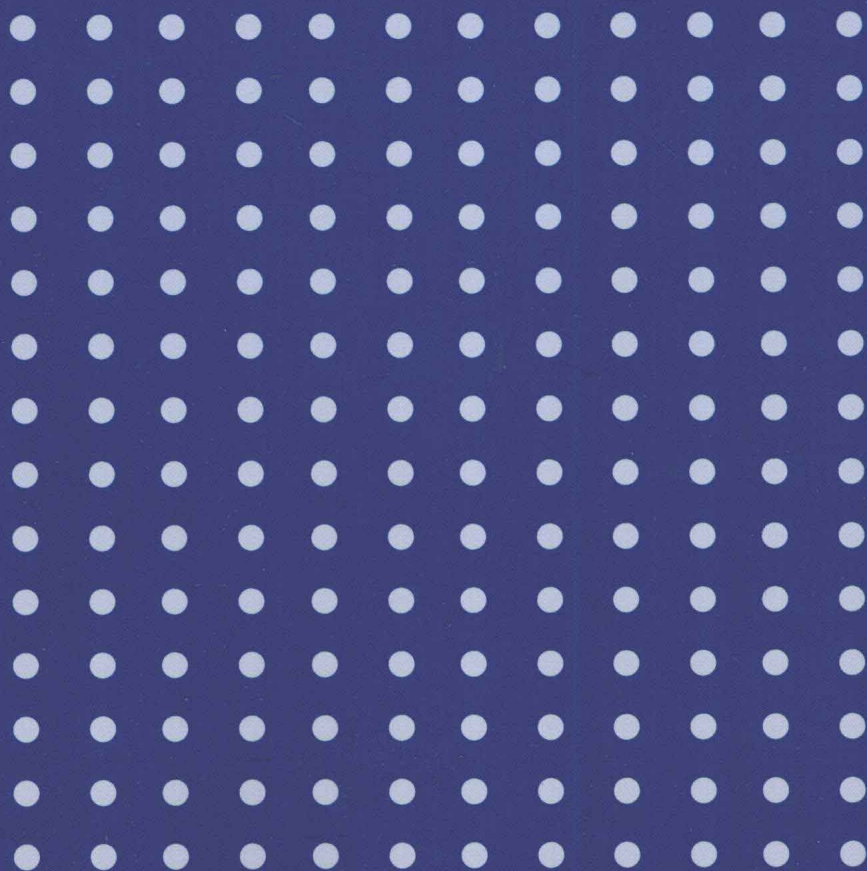


重点大学计算机专业系列教材

# 数字图像处理与分析

王志明 主编  
殷绪成 曾慧 副主编



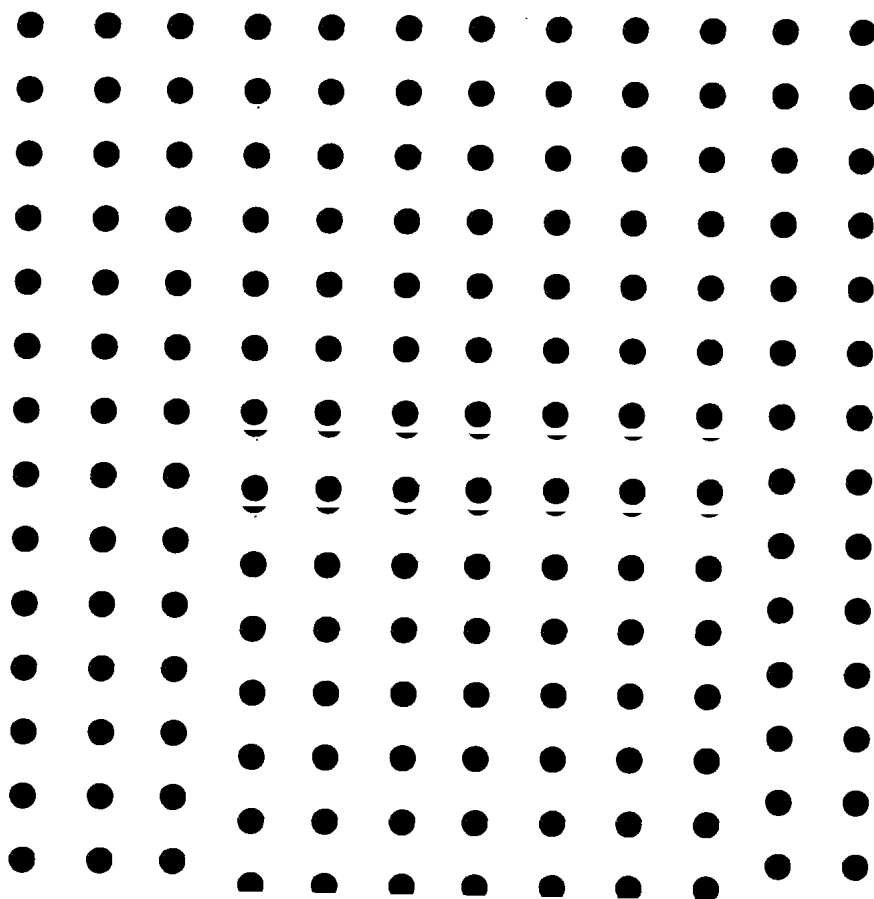
清华大学出版社

重点大学计算机专业系列教材

# 数字图像处理与分析

王志明 主编

殷绪成 曾慧 副主编



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了数字图像处理、图像特征提取、图像分析、图像理解等方面的基础知识,使读者能够在较短的时间内了解本领域研究的基本方法和经典算法。书中也引入了一些较新的、已得到本领域研究人员认可的先进算法,能够使有志于从事本领域研究的专业人员快速了解这一学科的最新研究方向和进展。书中将经典算法和大量的应用实例相结合进行阐述,并给出一些综合应用实例,便于读者学习理解,并能很快将这些方法投入到实际应用中。

本书可作为高等院校相关专业大学生和研究生的教材,也可以作为专业研究人员的参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理与分析/王志明主编. —北京:清华大学出版社,2012.2  
(重点大学计算机专业系列教材)

ISBN 978-7-302-27334-9

I. ①数… II. ①王… III. ①数字图像处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 237027 号

责任编辑:魏江江 赵晓宁

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:16 字 数:393千字

版 次:2012年2月第1版 印 次:2012年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

# 出版说明

随着国家信息化步伐的加快和高等教育规模的扩大,社会对计算机专业人才的需求不仅体现在数量的增加上,而且体现在质量要求的提高上,培养具有研究和实践能力的高层次的计算机专业人才已成为许多重点大学计算机专业教育的主要目标。目前,我国共有16个国家重点学科、20个博士点一级学科、28个博士点二级学科集中在教育部部属重点大学,这些高校在计算机教学和科研方面具有一定优势,并且大多以国际著名大学计算机教育为参照系,具有系统完善的教学课程体系、教学实验体系、教学质量保证体系和人才培养评估体系等综合体系,形成了培养一流人才的教学和科研环境。

重点大学计算机学科的教学与科研氛围是培养一流计算机人才的基础,其中专业教材的使用和建设则是这种氛围的重要组成部分,一批具有学科方向特色优势的计算机专业教材作为各重点大学的重点建设项目成果得到肯定。为了展示和发扬各重点大学在计算机专业教育上的优势,特别是专业教材建设上的优势,同时配合各重点大学的计算机学科建设和专业课程教学需要,在教育部相关教学指导委员会专家的建议和各重点大学的大力支持下,清华大学出版社规划并出版本系列教材。本系列教材的建设旨在“汇聚学科精英、引领学科建设、培育专业英才”,同时以教材示范各重点大学的优秀教学理念、教学方法、教学手段和教学内容等。

本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本组织原则和特点。

(1) 面向学科发展的前沿,适应当前社会对计算机专业高级人才的培养需求。教材内容以基本理论为基础,反映基本理论和原理的综合应用,重视实践和应用环节。

(2) 反映教学需要,促进教学发展。教材要能适应多样化的教学需要,正确把握教学内容和课程体系的改革方向。在选择教材内容和编写体系时注意体现素质教育、创新能力与实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。

(3) 实施精品战略,突出重点,保证质量。规划教材建设的重点依然是专业基础课和专业主干课;特别注意选择并安排了一部分原来基础比较好的优秀教材或讲义修订再版,逐步形成精品教材;提倡并鼓励编写体现重点大学

计算机专业教学内容和课程体系改革成果的教材。

(4) 主张一纲多本,合理配套。专业基础课和专业主干课教材要配套,同一门课程可以有多种具有不同内容特点的教材。处理好教材统一性与多样化的关系;基本教材与辅助教材以及教学参考书的关系;文字教材与软件教材的关系,实现教材系列资源配套。

(5) 依靠专家,择优落实。在制订教材规划时要依靠各课程专家在调查研究本课程教材建设现状的基础上提出规划选题。在落实主编人选时,要引入竞争机制,通过申报、评审确定主编。书稿完成后要认真实行审稿程序,确保出书质量。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

**教材编委会**

# 前言

图像是人类获取信息最主要的来源,伴随着数字计算机的普及,数字图像处理、分析、理解等技术近半个世纪以来有了长足的发展,已广泛应用于医学、天文、地球资源遥感卫星观测、工业检查、安全检查、娱乐等诸多生产与生活领域。

本书希望对这一领域的基本原理、经典方法,以及新技术做一个系统的介绍。力争做到以下几点:重视图像处理基础知识,基础部分详细介绍,如图像增强、复原等部分,能够使初学者快速学到这一领域最重要的基础知识和经典算法;高层次图像处理部分具有一定深度,如图像识别、图像理解等部分,适于有一定基础的读者(如研究生或本领域科研人员)进行更深入的学习,并可结合书中的大量实例快速投入实际应用;跟踪学科发展,介绍一些已得到本领域研究人员广泛认可的新方法,如小波收缩去噪、偏微分方程方法等部分,能够使读者了解本领域的最新研究进展。

本书第1~5章是传统数字图像处理的内容,也称为低层图像处理,介绍了数字图像处理的基本概念、图像变换、图像增强、图像复原、图像分割等方面的基础知识。第6章介绍了图像处理领域的新方法——偏微分方程方法——对图像增强、图像复原、图像分割等多个传统图像处理方法所带来的巨大改进,以及图像修补等新应用。第7和第8章属于中层图像处理,介绍了各种图像统计特征及其提取方法、几何形状描述方法,为进一步的识别和理解奠定基础。第9和第10章属于高层图像处理,介绍了常见的图像识别方法、图像分析模型、场景描述与理解等内容。

作为教材,本书可适用于不同层次的教学需求,对于本科生的“数字图像处理”课程,可以选择第1~第5章内容,或者在课时较多时增加第6~第8章的部分内容;对于研究生的“图像分析与理解”课程,可以选择第1、第5、第7、第8和第10章内容,课时较多时增加第6和第9章内容。

本书第1、第4、第6和第10章由王志明编写,第2、第3和第5章由曾慧编写,第7~第9章由殷绪成编写。

本书主要内容在北京科技大学计算机与通信工程学院和自动化学院的本科生及研究生教学中使用多年,对其间各位同学提出的宝贵意见在此一并

表示感谢。同时,也感谢北京科技大学计算机科学与技术系模式识别与图像处理实验室的同学对本书部分内容进行的资料准备和方法试验工作。

本书得到北京科技大学研究生教育发展基金项目资助,在此表示感谢!

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

**编 者**

2011年12月于北京科技大学

## 目录

<b>第 1 章 数字图像基础</b> .....	1
1.1 数字图像处理 .....	1
1.2 图像获取 .....	3
1.2.1 采样.....	3
1.2.2 量化.....	4
1.3 像素基本关系 .....	5
1.3.1 邻接关系.....	5
1.3.2 邻接性、连通性、区域和边界.....	6
1.3.3 距离度量.....	7
1.4 图像分析的数据结构 .....	7
1.4.1 矩阵.....	8
1.4.2 链表 .....	10
1.4.3 金字塔 .....	10
1.5 颜色模型.....	11
1.5.1 RGB 模型 .....	11
1.5.2 CMY 模型 .....	12
1.5.3 HSI 模型 .....	12
1.6 图像质量评价.....	13
1.6.1 均方误差 .....	14
1.6.2 信噪比与峰值信噪比 .....	14
1.6.3 结构相似度 .....	14
1.7 本章小结.....	15
<b>第 2 章 图像变换</b> .....	17
2.1 傅里叶变换.....	17
2.1.1 一维傅里叶变换 .....	17
2.1.2 二维傅里叶变换 .....	19



2.1.3	二维离散傅里叶变换的性质 .....	19
2.1.4	快速傅里叶变换 .....	23
2.2	离散余弦变换 .....	24
2.2.1	离散余弦变换的定义 .....	25
2.2.2	离散余弦变换的计算 .....	26
2.3	Harr 变换 .....	28
2.3.1	Harr 函数的定义 .....	28
2.3.2	Harr 函数的性质 .....	28
2.3.3	Harr 变换的定义 .....	30
2.4	小波变换 .....	31
2.4.1	连续小波变换 .....	31
2.4.2	离散小波变换 .....	36
2.4.3	快速小波变换 .....	37
2.5	脊波变换、曲波变换及轮廓波变换 .....	40
2.5.1	脊波变换 .....	40
2.5.2	曲波变换 .....	42
2.5.3	轮廓波变换 .....	45
2.6	本章小结 .....	48
<b>第 3 章</b>	<b>图像增强 .....</b>	<b>49</b>
3.1	概述 .....	49
3.2	基于点运算的图像增强 .....	50
3.2.1	灰度变换 .....	50
3.2.2	直方图处理 .....	55
3.2.3	图像算术/逻辑运算 .....	63
3.3	空间域图像增强 .....	66
3.3.1	空间域滤波基础 .....	66
3.3.2	空间平滑滤波器 .....	67
3.3.3	空间锐化滤波器 .....	69
3.4	频域图像增强 .....	72
3.4.1	频域滤波基础 .....	72
3.4.2	频域平滑滤波器 .....	72
3.4.3	频域锐化滤波器 .....	76
3.5	本章小结 .....	79
<b>第 4 章</b>	<b>图像复原 .....</b>	<b>80</b>
4.1	基本概念 .....	80
4.2	常见噪声模型 .....	81
4.2.1	高斯噪声 .....	82

4.2.2	脉冲噪声	82
4.2.3	瑞利噪声	82
4.2.4	伽玛噪声	83
4.2.5	指数噪声	83
4.2.6	均匀噪声	84
4.3	基本去噪方法	84
4.3.1	均值滤波	84
4.3.2	高斯滤波	85
4.3.3	中值滤波	85
4.3.4	非局部均值滤波	86
4.3.5	小波收缩去噪	86
4.4	常见模糊退化模型	88
4.4.1	运动模糊	88
4.4.2	散焦模糊	88
4.4.3	大气扰动	89
4.5	基本去模糊化方法	89
4.5.1	逆滤波	89
4.5.2	维纳滤波	90
4.5.3	约束最小二乘滤波	91
4.5.4	几何均值滤波	92
4.6	几何校正	93
4.6.1	空间变换	93
4.6.2	灰度插值	94
4.7	本章小结	96
<b>第5章</b>	<b>图像分割</b>	<b>97</b>
5.1	基本概念	97
5.2	基于阈值的图像分割方法	98
5.2.1	基本原理	98
5.2.2	基于直方图的图像阈值分割	99
5.2.3	基于迭代的图像阈值分割	100
5.2.4	基于最大类间方差的阈值分割	101
5.3	基于边缘的分割	102
5.3.1	边缘检测	102
5.3.2	边缘局部处理	106
5.3.3	边界跟踪	107
5.3.4	Hough 变换	108
5.4	基于区域的分割	110
5.4.1	区域生长	111

5.4.2	区域分裂与合并	114
5.5	分水岭方法	116
5.6	本章小结	118
<b>第6章</b>	<b>基于偏微分方程的图像处理</b>	<b>119</b>
6.1	基本概念	119
6.1.1	偏微分方程	119
6.1.2	变分法和梯度下降流	120
6.1.3	数值计算方法	121
6.2	图像去噪与增强	122
6.2.1	各向同性扩散	122
6.2.2	各向异性扩散	123
6.2.3	方向扩散	126
6.2.4	TV 去噪模型	127
6.2.5	高阶偏微分方程	128
6.3	图像去模糊	129
6.3.1	TV 去模糊模型	130
6.3.2	改进的 TV 方法	130
6.3.3	盲反卷积	131
6.4	图像分割	132
6.4.1	测地活动轮廓模型	133
6.4.2	无边缘活动轮廓模型	134
6.5	图像修补	135
6.5.1	TV 修补模型	135
6.5.2	曲率扩散方法	136
6.5.3	BSCB 模型	137
6.6	本章小节	138
<b>第7章</b>	<b>图像特征</b>	<b>139</b>
7.1	基本特征	139
7.1.1	幅度特征	139
7.1.2	统计特征	140
7.1.3	几何特征	141
7.2	纹理特征	145
7.2.1	基于统计的纹理特征	145
7.2.2	基于几何的纹理特征	147
7.2.3	基于模型的纹理特征	149
7.2.4	基于信号处理的纹理特征	150
7.3	特征子空间	152

7.3.1	奇异值分解	153
7.3.2	主元分析	153
7.3.3	独立成分分析	155
7.4	基于角点的特征	156
7.4.1	SIFT 特征	158
7.4.2	改进型 SIFT 特征	161
7.5	图像稀疏表示	161
7.5.1	稀疏性度量	161
7.5.2	图像稀疏表示	162
7.5.3	图像调和与分析表示	162
7.6	应用实例: FMI 岩石图像特征提取与分类	163
7.6.1	岩石图像特征表示	164
7.6.2	岩石图像分类	168
7.7	本章小结	170
<b>第 8 章</b>	<b>图像描述</b>	<b>171</b>
8.1	图像标识	171
8.2	基于轮廓的形状描述	172
8.2.1	链码表示	172
8.2.2	简单几何边界表示	173
8.2.3	片段序列边界表示	175
8.2.4	B 样条表示	176
8.2.5	其他方法	177
8.3	基于区域的形状描述	178
8.3.1	简单标量区域表示	178
8.3.2	矩表示	179
8.3.3	凸包表示	180
8.3.4	骨架图表示	181
8.3.5	区域分解	182
8.3.6	区域近邻图	182
8.4	本章小结	183
<b>第 9 章</b>	<b>图像识别</b>	<b>184</b>
9.1	贝叶斯分类	184
9.1.1	贝叶斯分类器	184
9.1.2	贝叶斯最优分类器	185
9.1.3	朴素贝叶斯分类器	186
9.1.4	贝叶斯网络	186
9.2	近邻法及模板匹配	187

9.2.1	近邻法	187
9.2.2	模板匹配	188
9.3	神经网络	190
9.3.1	BP 网络	190
9.3.2	RBF 网络	192
9.4	核方法	192
9.4.1	支持向量机	192
9.4.2	核 Fisher 判别分析	194
9.5	集成学习	197
9.5.1	Bagging	197
9.5.2	Adaboost	197
9.5.3	应用于特征集成的 Boosting 变体算法	198
9.6	应用实例：基于 Adaboost 的特征集成及文字识别	200
9.6.1	简单分类问题	201
9.6.2	手写体数字识别	202
9.7	本章小结	204
<b>第 10 章</b>	<b>图像理解</b>	<b>206</b>
10.1	图像理解基本概念	206
10.1.1	研究内容	206
10.1.2	研究方法	209
10.2	图像分析模型	210
10.2.1	平面图结构模型	210
10.2.2	点分布模型	212
10.2.3	活动轮廓模型	214
10.2.4	隐马尔克夫模型	216
10.3	场景中目标检测与识别	220
10.3.1	目标检测	220
10.3.2	目标识别	222
10.4	场景描述与理解	224
10.4.1	图像理解控制策略	224
10.4.2	场景分类	226
10.4.3	目标之间关系	227
10.4.4	场景标注和约束传播	227
10.5	语义分割与理解	231
10.5.1	语义描述图结构	232
10.5.2	语义区域增长	232
10.5.3	遗传图像解释	233
10.6	本章小结	236
	<b>参考文献</b>	<b>237</b>

# 数字图像基础

## 第 1 章

数字图像处理、分析、理解等技术在近半个世纪来有了长足的发展,已广泛应用于医学、天文、地球资源遥感、卫星观测、工业检查、安全检查等诸多生产与生活领域。本章介绍有关数字图像处理的基础,包括数字图像的概念、获取方法、像素间基本关系、分析处理中经常用到的数据结构、常见的颜色模型、常用的图像质量评价指标等知识。

### 1.1 数字图像处理

许多研究表明,人类获取的信息有 70% 左右来源于视觉,而视觉信息源于外部世界在人眼中产生的图像。图像能够比数字或文字包含更多的信息,而且更为直观。常言道“百闻不如一见”,就说明即使用很多语言文字也难以传达一张图像所富含的信息。

当前研究很热的科学可视化技术就是一个很好的例子,种类繁多的信息源产生的大量数据,远远超出了人脑分析解释这些数据的能力。可视化技术将各种数据用图形图像的方式呈现出来,使人们对这些数据产生意想不到的洞察力,在很多领域使科学家的研究方式发生了根本变化。

数字图像是指数字化的图像信息,由一些离散的位置点和像素值构成。对于一幅常见的灰度数字图像,其本质上就是一个非负矩阵,每个元素对应于一个像素点,其值大小决定了这一点的亮度,如图 1-1 所示,左侧为一个数字图像,右侧为其左上角  $7 \times 5$  区域的灰度值。

在图像处理过程中经常将图像表示为一个有界二维函数  $f(x, y)$ , 其中  $x, y$  为空间位置坐标,函数值  $f$  为  $(x, y)$  点的灰度值。只有坐标和函数值均有限的离散值时,我们才称之为数字图像。数字图像处理(Digital Image Processing)则是特指利用数字计算机对数字图像进行各种处理的过程。

广义的图像处理内含丰富,涵盖了大量的研究领域,根据处理的先后顺序和所涉及的知识复杂程度,数字图像处理可以分为多个不同的层次:

(1) 低层处理:即狭义上的图像处理,是指以像素或邻域为对象进行的

各种基本操作,如图像增强、图像去噪、图像去模糊化等处理,其特点是处理后的结果仍是一幅图像。其目的是改善图像质量、突出某些信息,为后续处理奠定基础,或改善视觉效果,方便人眼观察。

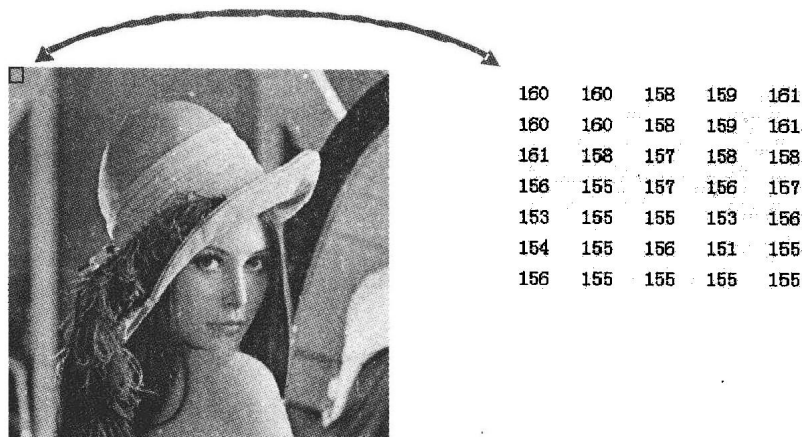


图 1-1 数字图像示例

(2) 中层处理:又称为图像分析,是指以低层处理结果为基础进行的一些区域处理,如图像分割、区域描述、目标检测与分类等处理,其特点是输入为图像,输出为一些抽象知识描述。主要目的是对图像中感兴趣的进行检测和测量,为后续的图像识别与理解提供对象描述。

(3) 高层图像:又称为图像识别与理解,处理则以中层处理结果为基础,进行综合分析、识别、理解,研究图像中各个目标的性质和及其相互关系,得出对图像内容的理解和场景的解释,输出为往往为某一决策结果。

这三个层次之间的关系如图 1-2 所示。从低层到高层,抽象程度逐渐提高,数据量逐渐缩小,处理对象由像素到目标,再到符号,语义信息不断增加。

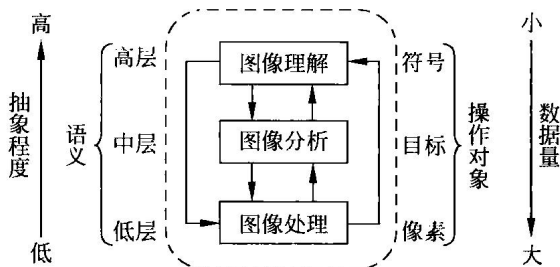


图 1-2 图像处理的三个层次

另外,在学习图像处理、分析、理解的知识过程中,需要区分两个相关但又不相同的学科:计算机视觉(Computer Vision)和计算机图形学(Computer Graphics)。计算机视觉是指利用计算机及相关设备模拟生物的视觉功能,主要任务是通过硬件设备采集的图像或视频进行处理获取现实世界的二维信息(亮度、色彩)和三维信息(相对空间位置关系、位移、速度等),作为智能系统进一步决策和行动的依据。计算机图形学则是一种使用数学算法将二维或三维图形转化为计算机显示器的栅格形式的科学,主要研究如何在计算机中表示图

形,以及利用计算机进行图形的计算、处理和显示的相关原理与算法,比如点、线、面、体等几何元素的表示,光源、物体材质、纹理的建模等。“图像”是指计算机内以位图形式存在的灰度或彩色信息,而“图形”则含有几何属性,或者说更强调场景的几何表示,是由场景的几何模型和景物的物理属性共同组成的。

## 1.2 图像获取

现实生活中的场景如何转换为数字图像呢?首先需要一定的硬件,如光电传感器、模数转化、放大和滤波电路等。这里只介绍算法基本原理,不涉及硬件知识,感兴趣的读者可查阅相关专业的参考文献。从基本原理上来讲,数字图像的获取包括两个关键步骤:采样(Sampling)和量化(Quantization)。

### 1.2.1 采样

现实生活中的场景是连续变化的,包括空间位置关系和明暗色彩变化,而计算机的存储是有限的和离散的。那么如何将无限连续的信息转换为有限离散的信号呢?对于空间位置,可以用一定的步长间隔( $\Delta h$ )对信号进行强度采集,而舍弃其他位置的信息,即认为以采样步长为边长的一个正方形区域内(以方形采样栅格为例)具有相同的信号强度。显然,这只是对实际信号的一种近似。因此,采样(包括后续的量化)必然会造成信号质量的下降,或称为信息量的损失,我们在进行数字图像处理的过程中必须牢记这一点。

如图 1-3 所示,以一维信号为例,说明采样和量化的过程和效果。图 1-3(a)可以近似认为是一幅连续图像(实际上也是数字图像,只是分辨率较高),图 1-3(b)为图 1-3(a)中黑线所示位置的灰度级曲线,图 1-3(c)中的小方框标出了离散采样为 16 点后的像素灰度值,图 1-3(d)为进一步将灰度值量化为 8 个级别后的采样点灰度值。

从图 1-3 中可以清楚地看出,原来连续细腻的信号经过处理后变成了一系列离散粗糙的点。

假设图像在  $x$  和  $y$  方向的采样间隔分别  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,则采样过程是取  $x=j\Delta x, y=k\Delta y(j=1, 2, \dots, M, k=1, 2, \dots, N)$  位置点的灰度值,采样函数可以用一组  $\delta$  函数表示为

$$s(x, y) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \delta(x - j\Delta x, y - k\Delta y) \quad (1.1)$$

采样图像可表示为采样函数与连续图像函数的乘积:

$$f_s(x, y) = f(x, y) \cdot s(x, y) = f(x, y) \cdot \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \delta(x - j\Delta x, y - k\Delta y) \quad (1.2)$$

根据香农采集定理(Shannon Sampling Theorem),采样频率必须高于图像中信号最高频率的 2 倍(即采样间隔小于图像中最小细节尺寸的一半),才不至于在采样过程中产生混叠效应(频谱交叉),出现错误的信号。更深入的分析可参考相关的信号处理教材,或某些给出详细介绍和图示的图像处理教材。

图 1-4 所示是二维采样和量化效果的示意图。其中图 1-4(a)显示了图 1-3(a)经过采样后的数字图像,分辨率为  $32 \times 32$ ,为方便观察,放大到  $256 \times 256$  像素。图 1-4(b)是对图 1-4(a)再经过 8 等级灰度量化后的图像(详见 1.2.2 节)。



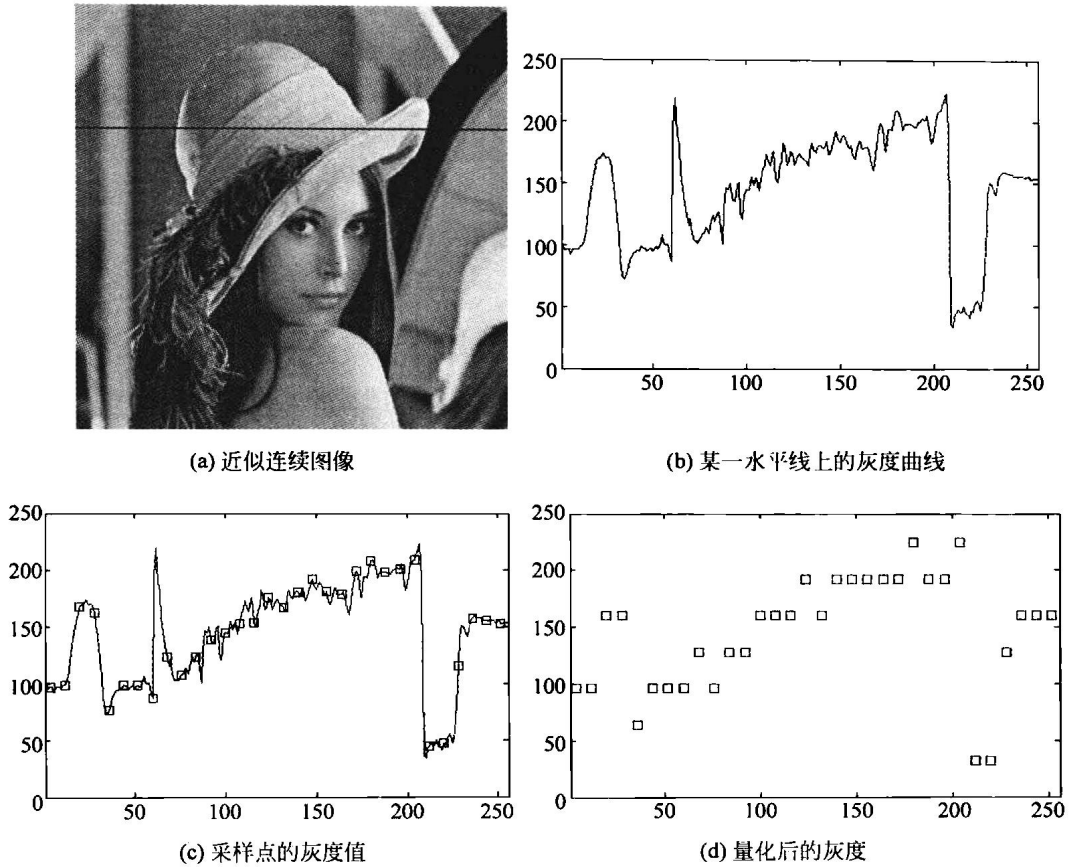
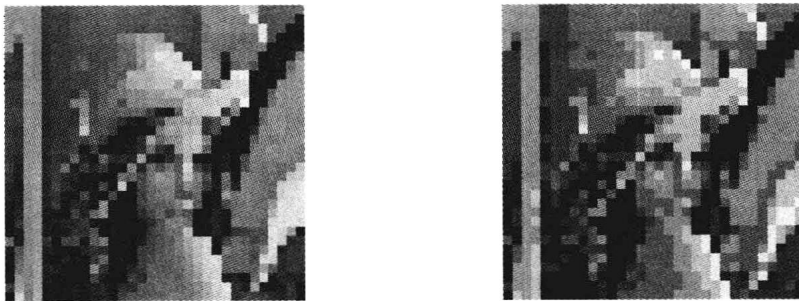


图 1-3 图像的采样和量化



(a) 采样后的图像(空间位置离散、灰度连续) (b) 采样和量化后的图像(空间位置和散灰度均离散)

图 1-4 经采样和量化后的图像

从图中可以看出,采样不足时,会产生类似于马赛克的效果。

### 1.2.2 量化

经过采样的图像包含有限个点的灰度值,但每一个灰度值仍是在连续空间中任意取值,无法存储到计算机内。因此,需要对其灰度级也进行离散化处理,即进行量化操作。量化是将连续的灰度值转换为离散的有限个灰度值,即就是电子电路中的模数转换。