



普通高等教育“十一五”规划教材

数字图像处理

何明一 卫保国 编著



科学出版社
www.sciencep.com

TN911.73
306
1:

普通高等教育“十一五”规划教材

数字图像处理

何明一 卫保国 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字图像处理的基本概念、理论、方法和算法。前三章介绍图像和图像处理的基础知识、图像的光学与生物学基础、图像获取与电子成像的基本方法,后六章分别介绍图像的基本变换、增强、恢复、压缩与编码,以及图像形态学处理和图像分析与识别。在内容安排上循序渐进、深入浅出,力求突出重点,面向应用,提高能力,解决问题。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、信息工程、计算机应用、自动化、摄影与遥感等相关专业、学科方向的高年级本科生和研究生的教材,也可作为有关的工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理/何明一,卫保国编著. —北京:科学出版社,2008

(普通高等教育“十一五”规划教材)

ISBN 978-7-03-022645-7

I. 数… II. ①何…②卫… III. 数字图像处理-高等学校-教材
IV. TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 114272 号

责任编辑:余江 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张克忠 / 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>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年8月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 500 字数:347 000

定价:28.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈文林〉)

前 言

数字图像处理是一门多学科交叉形成的、具有广泛而重大的应用需求以及有先进技术推动的年轻的发展中学科。首先,视觉是人类感知信息的重要手段,图像是视觉的基础。因此,图像历来成为心理学、生理学、物理学、电子科学、信息科学和计算机科学等诸多领域内的学者们研究视觉感知的有效工具。其次,图像处理在日常生活(如使用照相机和观看电视节目)、工业应用,特别是军事、遥感、气象等重大应用中有不断增长的需求。再次,图像获取设备(如照相机、数字摄像机、扫描仪等)、图像打印机、图像显示器和数字印刷技术的快速发展,使得图像处理设备已不再昂贵,给图像处理的发展提供了很好的条件与技术支持。目前,数字图像处理技术得到了空前的发展,被广泛应用于众多的科学与工程领域。不管是小到纳米级的生物分子结构检测,还是大如星球的天文图像的超光谱分析;不管是记录子弹穿越玻璃的超高速摄影,还是模拟缓慢的环境变化过程;不管是直观的自然景象照相,还是抽象的思维脑成像模拟;不管是日常的照相、电视,还是尖端技术的深空探测领域等,都与数字图像处理密切相关。

在图像信息感知过程中主要是图像的获取和图像的处理。随着科学技术的发展,图像获取技术已经得到很大的发展:获取普通图像的照相机、摄像机以及显示图像的电视机非常普遍,气象卫星、通信卫星源源不断将观测图像传到地球,神舟六号载人航天飞船把空天飞行过程中的图像及时传给地面站,等等。随着 VLSI 技术的飞速发展和高效的信号、图像处理结构与算法的出现,信号、图像处理速度有很大的提高,例如,过去几年内图像图形芯片的处理能力每隔 18 个月增长六倍(突破了每隔 18 个月翻一番的 Moor 定律)。利用计算机和专门的设备对图像进行处理的技术也得到很大的发展。然而,图像处理系统的能力的发展速度还跟不上图像获取系统的发展速度,例如,大约百分之九十的航空与卫星遥感图像尚未得到及时处理和利用,造成信息资源的大量浪费。出现这种状况的主要原因,一方面是信息社会中对图像信息量的需求急剧增长,另一方面是图像处理水平依赖于信息处理和智能技术的水平。因此,图像信息的处理和理解成为与图像信息有关的若干重大应用的关键技术,必将得到持续重视和发展。

图像可以有多种分类,如按时间运动性分为静止图像和运动图像(包括视频图像,序列图像);按空间连续性可分为(空间)连续图像和(空间)离散图像,其特殊情况是(空间)模拟图像和(空间)数字图像;按光谱特性分为单色图像、全光谱灰度图像、彩色图像、多光谱图像和超光谱图像等;按几何空间复杂度可分为平面图像、立体图像和抽象的高维图像;按光学特性可分为光学图像与非光学图像等。一般的

数字图像处理教材主要讲解静态、平面的数字图像的处理。

目前,由于社会对人才需求的多样性,除层次划分之外,各高校在人才培养上和定位上也呈现出不同的特点和特色。为了使培养的学生能够更好地贴近社会的需要,各高校对课程体系、教学内容和教学目标都在进行研究和改革,并取得了一定的阶段成果。这些成果体现了教学改革的普遍性和特殊性。普遍性反映了各高校的共同特点,而特殊性则反映了各高校在培养人才上的不同定位。

正是在以上几方面背景下,作者结合多年承担本科生课程“数字图像处理”和研究生课程“先进数字图像处理”的教学、教改实践经验,编写了本书。

在编写本书过程中,我们的基本思想和教材特色是:

(1) 用统一的观点处理信号和图像。

(2) 拓宽图像概念。把图片(照片)、电视图像、遥感多光谱与超光谱图像等综合介绍,突破一般书仅涉及照片和电视图像的习惯。

(3) 用发展的观点论述数字图像处理的内容,特别是包括一些新近发展的方法和技术,如多光谱图像处理等。

(4) 理论与实践结合,有比较多的应用举例。

(5) 注重基础和基本概念。

(6) 增加与图像处理相关的内容,如图像获取方法、图像处理软件、以及图像处理系统概念。

(7) 提供各章的电子教案,期望对任课教师和读者提供高效率的帮助。

(8) 在课程组织时,可以根据授课对象和计划课时有选择地组合。

本书主要内容包括:第1章图像概述,第2章图像的光学与生物学基础,第3章电子成像与图像获取,第4章图像变换,第5章图像增强,第6章图像恢复,第7章图像压缩,第8章图像形态学,第9章图像分析与识别,其中还涉及数字图像处理的一些前沿问题等。

为了方便教师和学生使用本书,我们按照40和60课时分别给出内容安排与教学计划。在教学计划制订时可以根据各自特点和课时数灵活安排。对于40和60课时的安排建议如下表:

	40 课时安排	60 课时安排	建议主要讲授内容
第1章	2	2	图像的定义,表示,分类,主要内容及系统基本组成,应用与意义
第2章	4	4	光、亮度、光强与光谱,*人眼的构造与视觉感知,颜色与颜色模型,混色原理
第3章	3	4	光学成像,*电子成像,*三维成像,图像数字化,空间、幅度和时间分辨率
第4章	6	10	预备知识,二维离散傅里叶变换,离散余弦变换,沃尔什变换,阿达马变换,*哈尔变换,*斜变换,*离散K-L变换,*小波变换
第5章	4	6	对比度增强,修正直方图增强,平滑增强,锐化增强,*自适应迭代滤波增强,同态滤波增强,伪彩色和假彩色图像增强,图像间的四则运算

续表

	40 课时安排	60 课时安排	建议主要讲授内容
第 6 章	4	6	图像退化模型, * 退化函数的估计, 空间域恢复方法, 频域恢复方法, 运动模糊恢复, * 几何畸变校正
第 7 章	5	8	图像压缩基础, 无损压缩, * 有损压缩, * 图像压缩标准
第 8 章	2	4	* 图像形态学基本概念, * 二值图像形态学基本运算, * 基本的形态学算法, * 灰度级图像扩展
第 9 章	4	6	图像分割, 图像特征及其描述, * 纹理分析, * 图像分类
实验	4	8	由教师根据实际情况确定
考试	2	2	

备注: 建议讲授内容按 60 课时安排, 40 课时可不讲授带 * 的内容。上述建议仅供参考, 教师可根据需要和实际条件补充本书以外的内容。

本人在任全国电子信息类专业教学指导委员期间, 曾多次在同行学术交流讨论中介绍了我们进行数字图像处理教学改革与教材建设的体会, 得到同行专家学者的肯定和支持。该教材的编写计划和大纲由本人于 2004 年制定。编写过程中, 得到同事和研究生们的大力支持和参与。本书由何明一主编, 何明一与卫保国合作编著完成。博士生戴玉超、李旭、高涛、张易凡、任继军、孙锋利和硕士生张静、张媛、江昊等先后参与资料搜集、整理和插图绘制等工作。在编写过程中, 还得到图像处理领域前辈赵荣椿等教授的帮助与支持, 在此一并感谢。任课教师们也给予大力支持与帮助。

还要感谢科学出版社刘俊来先生和余江女士的帮助, 特别是责任编辑余江多次与我们讨论编著计划, 修改书稿等。她非常敬业的精神给我们留下深刻印象。

由于时间仓促、任务紧迫, 以及编著者水平有限, 书中有不妥和错误之处, 恳请读者提出批评指正。

何明一

2008 年 5 月于西安

目 录

前言

第 1 章 图像的概述	1
1.1 概述	1
1.2 图像的定义	1
1.2.1 信号、图像与多维信号	1
1.2.2 图像表示	3
1.3 图像的分类	5
1.3.1 连续图像与离散图像	5
1.3.2 静止图像与运动图像	6
1.3.3 灰度图像和彩色图像	7
1.3.4 全光谱、多光谱与超光谱图像	7
1.3.5 平面图像与立体图像	8
1.4 数字图像处理主要内容及系统基本组成	9
1.5 数字图像处理的应用领域	11
1.6 小结	12
1.7 习题	13
第 2 章 图像的光学和生物学基础	14
2.1 概述	14
2.2 光与光谱	14
2.2.1 可见光与电磁波	14
2.2.2 光的特性与度量	15
2.2.3 成像用的电磁波谱	17
2.3 人眼的构造与视觉感知	18
2.3.1 人眼的构造	18
2.3.2 视觉感知	21
2.3.3 计算机视觉	28
2.3.4 生物神经视觉	29
2.4 颜色与颜色模型	30
2.4.1 颜色的三要素	30
2.4.2 颜色模型	31
2.4.3 几种颜色模型之间的转换	34

2.5	混色原理	35
2.6	小结	36
2.7	习题	37
第3章	电子成像与数字图像获取	38
3.1	概述	38
3.2	光学成像	39
3.3	电子成像	41
3.3.1	光电成像	41
3.3.2	X光成像	42
3.3.3	超声成像	44
3.3.4	磁共振成像	46
3.3.5	其他电子成像	47
3.4	三维成像	48
3.4.1	物体的空间信息和深度信息	48
3.4.2	三维图像与立体成像	49
3.4.3	激光扫描的三角形测量法	50
3.4.4	飞行时间测量法	51
3.4.5	多目视觉法	52
3.4.6	三维CT与体视化	53
3.5	图像数字化	55
3.5.1	图像的采样、量化与分辨率	55
3.5.2	数字图像的表达	57
3.5.3	图像数字化传感器	59
3.6	小结	60
3.7	习题	61
第4章	图像变换	62
4.1	预备知识	62
4.1.1	数字图像的表达形式	62
4.1.2	酉变换	63
4.1.3	线性变换的一般表示式	65
4.1.4	基图像与基函数	67
4.2	离散傅里叶变换	68
4.2.1	二维连续傅里叶变换	69
4.2.2	二维离散傅里叶变换	72
4.2.3	二维离散傅里叶变换的性质	73
4.2.4	快速傅里叶变换	76

4.2.5	图像信号的采样定理	78
4.3	离散余弦变换	80
4.3.1	离散余弦变换的定义	80
4.3.2	离散余弦变换的计算	81
4.4	沃尔什-阿达马变换	83
4.4.1	离散沃尔什变换	83
4.4.2	阿达马变换	85
4.5	哈尔变换	86
4.5.1	哈尔函数的定义	87
4.5.2	哈尔函数的性质	87
4.5.3	哈尔矩阵与哈尔变换	89
4.6	斜变换	90
4.6.1	斜矩阵	90
4.6.2	斜变换	91
4.7	离散 K-L 变换	91
4.8	小波变换	92
4.8.1	概述	92
4.8.2	连续小波变换	93
4.8.3	离散小波变换	96
4.8.4	小波包	98
4.8.5	二维小波	99
4.9	小结	101
4.10	习题	101
第 5 章	图像增强	102
5.1	概述	102
5.2	灰度对比度变换	103
5.2.1	线性变换	103
5.2.2	分段线性变换	103
5.2.3	非线性变换	105
5.2.4	其他变换	107
5.3	修正直方图增强	108
5.3.1	直方图	108
5.3.2	直方图均衡化	109
5.3.3	直方图规定化	112
5.4	平滑增强	114
5.4.1	噪声	114

5.4.2	邻域平均法	115
5.4.3	多图平均法	119
5.4.4	中值滤波法	120
5.4.5	频域低通滤波和带阻滤波	123
5.5	锐化增强	127
5.5.1	模糊机理及基本解决方法	127
5.5.2	一阶微分——梯度模算子	128
5.5.3	二阶微分——拉氏算子	131
5.5.4	自适应锐化——Wallis算子	134
5.5.5	其他自适应锐化算法	135
5.5.6	高通滤波和高频加强滤波	135
5.6	自适应迭代滤波增强	138
5.6.1	自适应迭代滤波原理	138
5.6.2	图像的自适应迭代滤波算法	141
5.7	同态滤波增强	141
5.8	伪彩色和假彩色图像增强	143
5.8.1	伪彩色技术	143
5.8.2	假彩色技术	145
5.9	图像间的四则运算	146
5.10	小结	147
5.11	习题	148
第6章	图像恢复	149
6.1	概述	149
6.2	图像退化模型	150
6.2.1	图像退化的物理过程	150
6.2.2	连续的线性系统退化模型	150
6.2.3	离散的线性系统退化模型	152
6.2.4	循环矩阵对角化	154
6.2.5	非线性退化模型	155
6.3	退化函数的估计	156
6.3.1	图像观察估计法	156
6.3.2	试验估计法	156
6.3.3	模型估计法	157
6.4	空间域恢复方法	158
6.4.1	无约束最小二乘方恢复	158
6.4.2	约束最小二乘方恢复一般形式	159

6.4.3	能量约束恢复	160
6.4.4	平滑约束恢复	160
6.4.5	均方误差最小约束(维纳滤波)	162
6.5	频域恢复方法	163
6.5.1	逆滤波法	163
6.5.2	能量约束最小二乘滤波	165
6.5.3	平滑约束最小二乘滤波	166
6.5.4	频率域维纳滤波	166
6.5.5	功率谱均衡恢复	167
6.6	运动模糊恢复	169
6.7	几何畸变恢复	172
6.7.1	像素坐标校正	173
6.7.2	像素灰度估算	174
6.8	小结	175
6.9	习题	176
第7章	图像压缩	177
7.1	概述	177
7.2	图像压缩基础	177
7.2.1	图像压缩的必要性	177
7.2.2	图像压缩的可能性	178
7.2.3	图像压缩质量的评价	179
7.2.4	图像压缩模型	181
7.2.5	图像压缩方法的分类	183
7.3	无损压缩	185
7.3.1	变长编码压缩	185
7.3.2	LZW 编码压缩	189
7.3.3	位平面编码压缩	190
7.3.4	无损预测编码	191
7.4	有损压缩	193
7.4.1	率失真理论	193
7.4.2	有损预测编码压缩	194
7.4.3	变换编码压缩	196
7.4.4	小波编码压缩	198
7.5	图像压缩标准	200
7.5.1	静止图像压缩标准	200
7.5.2	运动图像压缩标准	206

7.6	小结	213
7.7	习题	214
第8章	图像形态学	215
8.1	概述	215
8.2	图像形态学基本概念	215
8.3	二值图像形态学基本运算	217
8.3.1	腐蚀	217
8.3.2	膨胀	218
8.3.3	开	220
8.3.4	闭	221
8.3.5	击中未击中变换	222
8.3.6	形态学基本运算性质	223
8.4	基本的形态学算法	224
8.4.1	噪声去除	224
8.4.2	边界提取	225
8.4.3	连通区域提取	225
8.4.4	细化	226
8.4.5	骨架化	227
8.5	灰度级图像扩展	229
8.5.1	膨胀	229
8.5.2	腐蚀	229
8.5.3	开和闭运算	230
8.6	小结	232
8.7	习题	232
第9章	图像分析与识别	233
9.1	概述	233
9.2	图像分割	233
9.2.1	图像分割的定义	234
9.2.2	图像分割方法分类	234
9.2.3	常用的分割方法	237
9.2.4	彩色图像分割	251
9.2.5	图像分割质量评价	251
9.3	图像特征及其描述	253
9.3.1	投影特征	253
9.3.2	标记	253
9.3.3	链码	254

9.3.4	傅里叶描绘子	256
9.3.5	矩特征	259
9.3.6	比例特征	260
9.3.7	边心距	261
9.4	纹理分析	261
9.4.1	纹理及其测度	261
9.4.2	傅里叶功率谱法	262
9.4.3	联合概率矩阵法	263
9.4.4	灰度差分统计法	263
9.4.5	行程长度统计法	263
9.4.6	其他方法	264
9.5	图像分类	264
9.5.1	特征提取的原则	265
9.5.2	分类器	265
9.5.3	特征选取	266
9.5.4	贝叶斯分类方法	268
9.5.5	决策树分类	269
9.5.6	感知器分类	270
9.5.7	分类器的类型	272
9.6	小结	272
9.7	习题	273
参考文献		274

第 1 章 图像的概述

1.1 概 述

人类传递信息的主要媒介是语音和图像。图像是能为人类视觉所感知的信息形式或人们心目中的有形想像。据统计,在人类接受的信息中,视觉信息约占 80%,俗语“百闻不如一见”就反映了图像在信息感知中的独到之处。图像是我们从客观世界获取信息的主要来源,而相应的图像信息处理技术则是我们人脑视觉延伸的重要手段。图像具有直观形象、易懂、信息量大的特点,其应用领域也越来越广。可是,从技术角度来讲,相对于语音处理技术,图像处理技术起步较晚,在第三代计算机问世后,才得到了迅速发展。图像处理的研究有着重要的意义,其发展必将对国计民生产生更加重大的影响。

本章介绍图像的概念与定义、图像表示、图像分类、图像处理的主要内容,以及数字图像处理系统的基本组成和应用领域。

1.2 图像的定义

1.2.1 信号、图像与多维信号

信号是信息的载体。传统信号处理的对象是物理信号,例如语音信号、心电信号、文字、光信号等。这些信号,表现为一个或多个物理量随着另外一些变量(如时间、空间、温度、频率等)的变化而变化。从更一般的意义上说,信号可以视为是指标空间 $d \in D$ 到值空间 $u \in U$ 的映射 f ,即

$$f: d \in D \xrightarrow{\text{映射}} u \in U \quad (1-1)$$

例如,正弦波振荡器的输出电压 u 为一随时间 t 变化的信号,则信号 $u(t)$ 就是指标空间 $t \in (-\infty, +\infty)$ 到值空间 $u \in (-\infty, +\infty)$ 的函数。再例如,彩色电视屏幕上出现的彩色信号(即光信号),其三色值空间是 $u_R \in [0, +\infty)$, $u_G \in [0, +\infty)$ 和 $u_B \in [0, +\infty)$,其物理意义是红、绿、蓝三基色的亮度。而其指标空间中的每一个元素可以用屏幕位置 (x, y) 和时间 t 表示。

上面所提的语音信号和心电信号的指标空间是时间 t ,电视机光信号的指标空间则是水平方向 x 、垂直方向 y 确定的位置空间和 t 确定的时间。于是,光信号的指标空间可表示成 $d = \{d_x, d_y, d_t\}$,其中 $d_x = (-\infty, +\infty)$, $d_y = (-\infty, +\infty)$,

$d_i = (-\infty, +\infty)$ 。早期,把光信号称为图像,即光学图像。现在,把可以在空间 (x, y, z) 上显示或表示出来的信号都统称为图像,例如,图片、照片、电视画面、CT 片、气象云图等。显然,图像包括光学图像和经过可视化处理的非光学图像。

从信号的观点看,图像只是一种特殊的信号,即指标空间是位置空间和时间等。从映射的观点看,图像可以定义为一个映射,其值空间为亮度(包括颜色),其指标空间由位置、时间、波长等组成。

可见,用映射来定义信号和图像就更具有普遍意义。一切物理的和非物理的、自然的与人工的、物质的与精神的领域都普遍存在着上述定义下的信号和图像。

我们非常熟悉的(平面)照片或图片的指标空间是由 (x, y) 二个变量确定,这类信号又习惯上称为二维信号,或直接称为图像。

当我们观察自然世界的物体时,绝大多数物体的外表的亮度和颜色是随着 (x, y, z) 三个变量变化的,如人体、机器零件、地球等的外形。对人体或发动机内部可视化时,也需要在 (x, y, z) 位置空间来表示。用 (x, y, z) 三个变量表示的图像特别地称为三维信号,或三维图像,或立体图像。

从映射的观点,隐去具体的物理意义,如果指标空间的变量数目为 n ,我们称这样的信号为 n 维信号。举例如下,

二维图像:如照片、常规 CT、B 超、卫星云图等,是 (x, y) 的函数。

三维图像:如三维 CT、兵马俑三维测量数据等,三维图像是 (x, y, z) 的函数。有时也可把电视图像称为三维图像,因为它是 (x, y, t) 的函数。

四维图像:如四维 B 超、四维 CT 等,是 (x, y, z, t) 的函数。

高维图像:例如多光谱图像,是 $(x, y; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 的函数,其中 λ_i 表示第 i 波段的波长参数。

在数字图像处理等研究领域,有时还需要将指标空间推广到多维空间,相应地有多维图像和多维成像的概念。习惯上,把图像指标空间的变量数目为 n 的图像直接称为 n 维图像。

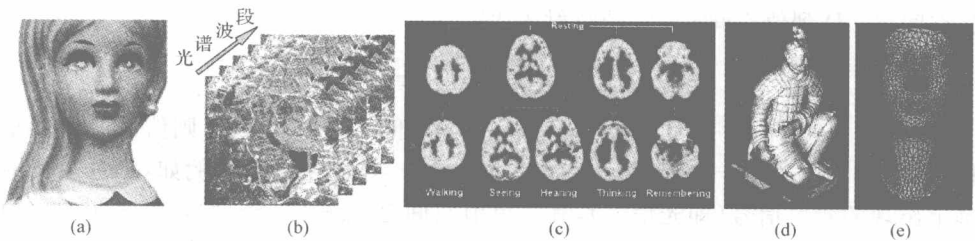


图 1-1 图像举例

- (a) 虚拟人照片;(b) 5 波段多光谱图像;(c) 正电子脑功能断层成像
(下面从左到右分别表示走、看、听、思和忆,上面 4 幅为相应的休息状态);
(d) 兵马俑三维模型图;(e) 三角片表示的人头三维模型

图 1-1 和图 1-2 是图像举例。

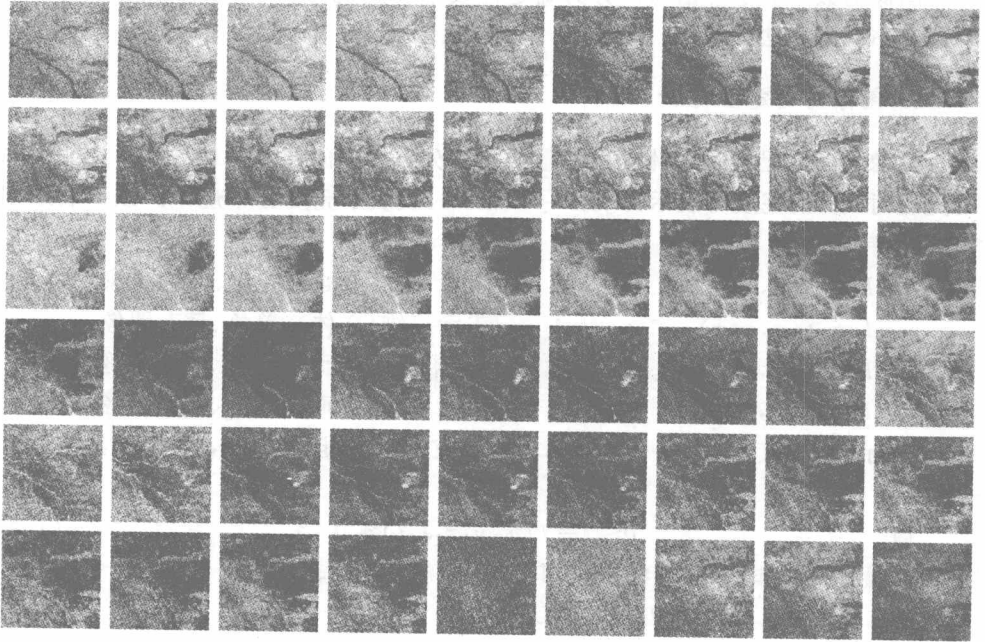


图 1-2 某金矿区域 54 幅多光谱遥感图像(波长范围 1960~2460nm, 光谱分辨率大约 10nm)

1.2.2 图像的表达

二维光学图像可以用二维亮度函数来表示。由于光是能量的一种表现形式, 所以图像的亮度可以表示为

$$I = f(x, y) \quad (1-2)$$

式中, I 为图像的强度即亮度, (x, y) 是坐标。显然

$$0 \leq f(x, y) < +\infty \quad (1-3)$$

光学图像一般是由物体表面反射的光形成的。虽然透射光也可以形成图像, 但在没有特别说明时, 一般指反射光形成的图像。 $f(x, y)$ 可以看成是由所看到的景物上入射光量及物体对光的反射系数共同确定的。如果用 $i(x, y)$ 表示入射分量, 用 $r(x, y)$ 来表示反射系数, 那么

$$I = f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (1-4)$$

其中

$$0 \leq i(x, y) < +\infty, \quad 0 \leq r(x, y) \leq 1 \quad (1-5)$$

全吸收时, r 为 0; 全反射时 r 为 1。这里的 $i(x, y)$ 一般是由光源的性质来确定的, 而 $r(x, y)$ 取决于被照的物体。

关于图像的物理基础将在第2章论述,下面重点介绍图像的数学表示。

图像的数学表示方法可以分为确定性表示和随机性表示,往往根据不同的问题选用不同的方法。

1. 图像的确定性表示

图像的实质是记录物体辐射能量的空间分布。空间位置为 (x, y, z) 、波长为 λ 的光在时间 t 的亮度可表示为 $f(x, y, z, \lambda, t)$,反映了亮度分布规律。以下表示则是一些特殊情况:

$I = f(x, y)$	表示二维(平面)、静止、单色图像
$I = f(x, y, z)$	表示三维(立体)、单色、静态图像
$I = f(x, y, t)$	表示二维(平面)、动态、单色图像
$I = f(x, y, \lambda, t)$	表示二维(平面)、动态、光谱图像

实际上,连续图像 $I = f(x, y, z, \lambda, t)$ 应受到一定的约束,这里隐含了三项约束:

$$1) \quad 0 \leq I = f(x, y, z, \lambda, t) \leq A \quad (1-6)$$

说明光强是一个非负、有界的实数,其中最大亮度不能超过常数 A 。

$$2) \quad \begin{cases} -L_x \leq x \leq L_x \\ -L_y \leq y \leq L_y \\ -L_z \leq z \leq L_z \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} -L_x \leq x \leq L_x \\ -L_x \leq y \leq L_x \\ -L_x \leq z \leq L_x \end{cases} \quad (1-7)$$

即图像的指标范围或成像尺寸不可能是无穷的。对二维情况,图像限制在一个矩形区域内,对三维图像则限制在一个立方体内。

3) 满足 $-T \leq t \leq T$,即观察时间有限,符合实际情况。

如果图像获取系统所接收到的光是所有光谱分量的累积效应,则可以把观察到的图像亮度表示为亮度分布函数 $F(x, y, \lambda, t)$ 以光谱响应函数 $S(\lambda)$ 为权的加权积分:

$$I = f(x, y, t) = \int_0^{+\infty} F(x, y, \lambda, t) S(\lambda) d\lambda \quad (1-8)$$

式中, $S(\lambda)$ 为光谱响应函数。如果不讨论随时间变化的图像和立体图像,则使用的图像函数为 $f(x, y)$,这是平面坐标与亮度之间的关系。

2. 图像的随机表示

假如检测图像像素的亮度数据的分布规律,可以发现某一亮度间隔内的像素出现的频率是符合随机分布规律的,能够用基于概率论的统计模型对其描述。经验告诉我们,这样的随机图像服从高斯(Gaussian)分布或正态分布(normal distribution)。实际上,图像像素的这种不确定性,来源于图像的测量误差和各种干扰。

用随机变量 X 表示一幅图像,可以用如下两种方法表示其分布: