



天津市高校“十五”规划教材

高等学校电子科学与技术专业教材

光电图像处理

刘文耀 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子科学与技术专业教材

光电图像处理

刘文耀 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

光电图像处理旨在研究光电图像处理的理论、概念与技术。共分 14 章,其中第 1 至第 9 章为基础篇,主要讨论光电图像处理的理论基础、概念及技术,包括光度学与色度学基础,图像的数学表征、变换、增强、复原、压缩与编码、分割与描述。第 10 至第 14 章为应用篇,涉及的内容有小波分析与应用、计算机层析及医学图像处理、光电图像的相关识别、遥感图像处理和视频图像处理。

本书可供遥感技术、生物医学、天文、通信、气象、工业自动控制、国防等行业从事信息科学和计算机相关技术的广大科技工作者,以及大专院校有关专业的师生参考,也可以作为高年级本科生或研究生相关课程的教材或教学参考书。

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

光电图像处理/刘文耀等编著. —北京:电子工业出版社,2002. 11

高等学校电子科学与技术专业教材

ISBN 7-5053-8076-1

I. 光… II. 刘… III. 光电子技术—应用—图像处理—高等学校—教材 IV. ①TP391.41 ②TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 081375 号

责任编辑:王传臣 特约编辑:雅 松

印 刷:北京四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

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:30 字数:657 千字

版 次:2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:38.00 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

前 言

随着信息化进程的飞速发展,作为信息最佳代表形式之一的图像及图像处理理论与技术,愈加显示出其不可替代的重要地位:大到对空间的探知,地球资源卫星的成功运营,哈勃望远镜对宇宙深处的探寻,各色各样的军事卫星的布放;小至对微观世界的研究,人类生命奥秘的揭示,DNA 及其图谱展示。在日常生活、工农业生产、科学研究、交通运输及安全防范、医学、生物学、国防建设中,图像处理及其应用司空见惯。图像及图像处理是众多学科领域的交叉点和融合点。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,是科学发展的必然趋势。它与国计民生紧密相连,已经和将要给人类带来巨大的经济与社会效益。

将光电图像处理作为本书的书名,其含义有二:一是本书所研究图像的生成过程是光学与电子学的方式;其二,图像处理的技术是以依靠光学与电子学手段实现的。随着科学与技术的发展,微电子与光电子技术取得极大成功,为光电图像处理及应用带来了空前的机遇,对科学研究、社会生产乃至人类生活的影响是巨大而深远的。

本书共分 14 章,是根据作者讲授三十余遍的教材及多年来科学研究的成果,并参考相关文献编写而成,概括地描述了光电图像处理理论和技术所涵盖的内容。其中第 1 章至第 9 章为基础篇,为光电图像处理所涉及的基础理论、概念及基本处理技术。作者多年来将这部分内容作为有关高年级本科生的必修/选修课程的主要讲授内容。第 10 章至第 14 章为应用篇,这部分内容为研究生教学中的延伸内容,主要为若干主要应用领域的关键处理技术。

本书第 2 章、第 6 章和第 9 章为谢洪波副教授、博士编著,第 7,8 两章为江洁副教授、博士编著,第 14 章为黄战华教授、博士编著,其余章节为刘文耀编著,刘文耀对全书进行了统编。本书得到了张宇博士、路烁博士、朱昊博士和薛白硕士的帮助。同时在编著工作中还引用了一些论文和资料,对此,本人深表感谢。由于本人水平所限,书中有许多不足之处,敬请读者批评指正。

刘文耀

2002 年 3 月于天津大学

目 录

第1章 图像概述	1
1.1 绪言	1
1.2 数字图像处理系统	2
1.3 视觉	3
1.3.1 视觉原理	3
1.3.2 视觉现象	4
1.3.3 视觉模型	10
习题1	13
第2章 光度学与色度学基础	15
2.1 辐射度量	15
2.1.1 电磁辐射与可见光	15
2.1.2 辐射度量概念	16
2.2 光度量	17
2.2.1 光度量基本概念	17
2.2.2 光学量和辐射量间的关系	18
2.3 颜色的表征及色度量	20
2.3.1 颜色的表观特征	20
2.3.2 颜色的定量描述	20
2.3.3 混色原理与亮度方程	22
2.3.4 视觉系统对颜色的感知	23
2.4 CIE 标准色度学系统	24
2.4.1 CIE1931 标准色度学系统	25
2.4.2 CIE1964 补充标准色度学系统	27
2.5 CIE 均匀颜色空间及色差公式	28
2.5.1 彩色图像处理对颜色空间的要求	28
2.5.2 (x, y, z) 颜色空间是非均匀颜色空间	29
2.5.3 均匀颜色空间及相应的色差公式	30

2.6 彩色图像处理与颜色空间	31
2.6.1 由色卡系列构成的颜色空间	32
2.6.2 CIE 早期推荐的颜色空间	32
2.6.3 CIE 推荐的近似匀色空间	32
2.6.4 LHS 颜色空间	33
2.6.5 其他颜色空间	33
习题 2	34
第 3 章 图像的数学表征	35
3.1 连续图像的表达式	35
3.2 二维线性系统	37
3.3 连续图像的统计表征	38
3.4 抽样与量化	41
3.5 图像的矩阵与向量表示	44
3.5.1 图像的矩阵表示	44
3.5.2 图像的向量表示	44
3.5.3 图像矩阵的奇异值分解	44
3.5.4 向量空间中的随机图像场	46
习题 3	47
第 4 章 图像的傅里叶变换	48
4.1 连续函数的傅里叶变换	48
4.2 离散的傅里叶变换	52
4.3 图像傅里叶变换的性质	54
4.3.1 图像的频谱幅度随频率增大而迅速衰减	54
4.3.2 可分离性	56
4.3.3 平移	57
4.3.4 周期性与共轭对称性	58
4.3.5 旋转	59
4.3.6 线性和比例性	60
4.3.7 平均值	60
4.3.8 微分性质	61
4.4 卷积与相关	61
4.4.1 卷积和卷积定理	61

4.4.2 相关和相关定理	66
4.5 抽样理论	67
4.6 FFT	72
4.6.1 FFT 算法	72
4.6.2 运算次数分析	73
4.6.3 反变换	75
4.6.4 FFT 算法流程	75
习题 4	76
第 5 章 其他离散图像变换	79
5.1 离散正交变换的通式	79
5.2 离散余弦变换	81
5.3 沃尔什变换	83
5.4 哈德玛变换	86
5.5 哈尔变换	90
5.6 斯拉特变换	92
5.7 K-L 变换	95
习题 5	97
第 6 章 图像增强	100
6.1 图像直方图和对比度增强	100
6.1.1 灰度直方图	100
6.1.2 色彩直方图	101
6.1.3 灰度级映射变换	102
6.1.4 对比度扩展	102
6.2 直方图增强	104
6.2.1 直方图均衡化增强	104
6.2.2 直方图规定化增强	105
6.3 图像平滑	106
6.3.1 平滑卷积模板	106
6.3.2 邻域加权平均	106
6.3.3 中值滤波	107
6.3.4 多图像平均	108
6.4 图像锐化	109

6.4.1	图像锐化与边缘增强	109
6.4.2	一阶微分或差分算子	109
6.4.3	梯度算子	110
6.4.4	拉氏算子	111
6.4.5	具有平滑作用的增强算子	113
6.5	频率域增强技术	113
6.5.1	高通滤波与低通滤波	113
6.5.2	同态滤波	115
6.6	图像的彩色增强	117
6.6.1	伪彩色增强技术	117
6.6.2	假彩色增强技术	119
6.6.3	真彩色增强技术	120
习题 6		120
第 7 章	图像复原	122
7.1	退化模型	123
7.1.1	退化的数学模型	123
7.1.2	连续函数退化模型	124
7.1.3	离散的退化模型	125
7.1.4	循环矩阵对角化	127
7.2	无约束和有约束复原	129
7.3	经典的图像复原方法	130
7.3.1	逆滤波复原	130
7.3.2	维纳滤波复原	131
7.3.3	等功率谱滤波复原	133
7.4	常见的退化模型及其复原过程	134
7.4.1	常见的退化模型	134
7.4.2	一些退化系统的退化模型及传递函数	135
7.4.3	消除匀速直线运动模糊	137
7.4.4	几何畸变校正	141
7.4.5	噪声图像的复原	146
7.4.6	图像复原新方法	151
习题 7		156

第 8 章 图像压缩	158
8.1 图像压缩的基本概念	158
8.1.1 图像压缩的必要性	158
8.1.2 图像压缩的基础	159
8.1.3 常用的图像压缩方法及其分类	162
8.2 统计编码	163
8.2.1 游程编码	163
8.2.2 LZW 编码	164
8.2.3 哈夫曼编码	165
8.2.4 算术编码	167
8.3 预测编码	169
8.3.1 预测编码压缩的原理	169
8.3.2 无损预测编码	171
8.3.3 有损预测编码	171
8.3.4 最优预测器	172
8.3.5 最优量化器	174
8.3.6 图像的预测编码	175
8.4 正交变换编码	177
8.4.1 正交变换编码的基本原理	178
8.4.2 子图像尺寸的选择	179
8.4.3 变换的选择	179
8.4.4 比特分配	180
8.5 新的压缩编码技术	181
8.5.1 子带编码	181
8.5.2 分形编码	185
8.6 图像压缩国际标准简介	188
8.6.1 二值图像压缩标准	189
8.6.2 静止图像压缩标准	190
8.6.3 运动图像压缩标准	192
习题 8	199
第 9 章 图像分割与描述	201
9.1 概述	201
9.2 灰度特征与分割	202

9.2.1	灰度阈值法	203
9.2.2	分裂-合并算法分割图像	208
9.2.3	利用边界进行分割	210
9.2.4	纹理分析	217
9.3	匹配检测技术与分割	220
9.4	跟踪技术与分割	223
9.4.1	跟踪技术	223
9.4.2	曲线跟踪	223
9.4.3	区域跟踪(区域生长)	224
9.5	区域描述	225
9.5.1	像点间的几何性质	225
9.5.2	图像的幅度及统计特征	226
9.5.3	曲线描述	229
9.5.4	区域边界描述: 傅氏描述	233
9.5.5	区域综合特征描述: 矩描述	234
9.5.6	区域形态描述: 拓扑描述	236
9.5.7	区域的几何特性描述	237
9.5.8	区域的中轴变换: 骨架抽取	240
9.5.9	区域的扩展、收缩与细化	240
9.6	相似性描述	242
9.6.1	距离测度	242
9.6.2	相关性测度	243
9.6.3	结构相似性	243
9.7	关系描述	243
9.7.1	关系矩阵	243
9.7.2	标记图	245
习题 9		246
第 10 章	计算机层析及医学图像处理	247
10.1	傅里叶变换重建	247
10.1.1	投影-切片定理	247
10.1.2	傅里叶变换重建	249
10.2	滤波-逆投影重建	251
10.3	用于扇束投影的滤波-逆投影重建	254

10.3.1	等角间隔射线组成的扇束	254
10.3.2	等间距直线排列探测器	258
10.4	代数重建技术	260
10.5	二维轮廓重建三维形体	263
10.5.1	简单轮廓线及其三维形体重建	263
10.5.2	复杂轮廓线的三维轮廓重建	267
10.5.3	多轮廓线之间的三维形体重构	269
10.6	条纹调制三维信息的恢复	272
10.6.1	与物体表面形状相关的相位信息的获取	272
10.6.2	空间位相分布与物体表面深度像的映射关系	273
习题 10		276
第 11 章	小波分析与应用	278
11.1	加窗傅里叶变换	278
11.2	盖伯变换	279
11.3	小波变换	281
11.3.1	一维连续小波变换	281
11.3.2	离散小波变换	284
11.3.3	二维小波变换	285
11.4	小波函数	285
11.5	图像的小波分解和重构	289
11.6	小波变换快速算法	291
11.7	基于小波变换的图像压缩编码	293
11.7.1	扩展零树编码	293
11.7.2	零树与游程相结合的编码方法	297
11.7.3	基于小波变换的多项式近似分形图像编码	300
11.7.4	多小波变换与图像编码	304
11.8	基于小波变换的纹理分类	309
11.9	基于小波变换的边缘提取空间目标跟踪技术	312
11.10	基于小波变换的位移测量	317
习题 11		319
第 12 章	光电图像的相关识别	320
12.1	光学匹配滤波相关器	321

12.1.1	光学匹配滤波器原理	321
12.1.2	光学匹配滤波相关器的实现	322
12.2	光学联合变换相关器	323
12.2.1	光学联合变换相关器原理	323
12.2.2	光电联合变换相关器的实现	324
12.2.3	光电单臂联合变换相关器	326
12.2.4	光电畸变不变性识别	335
12.3	光电图像相关识别的应用	341
12.3.1	车辆牌照的识别	341
12.3.2	以纹理为基础进行虹膜识别	349
	习题 12	355
第 13 章	遥感图像处理	357
13.1	遥感图像的复原	357
13.1.1	遥感图像的辐射度校正	357
13.1.2	遥感图像的几何校正	365
13.2	遥感图像的增强处理	374
13.2.1	遥感图像的色彩增强	374
13.2.2	多图的增强	377
13.3	遥感图像的分类处理	379
13.3.1	最大似然法分类	379
13.3.2	无参量分类法	383
13.3.3	非监督分类法	386
13.4	多源遥感图像的融合	389
	习题 13	392
第 14 章	视频图像处理	394
14.1	视频基础	394
14.1.1	视频标准	394
14.1.2	视频图像获取与数字化	404
14.1.3	视频图像的特点与研究内容	414
14.2	运动分析	416
14.2.1	基于帧差的目标运动与轨迹探测	416
14.2.2	基于块的二维运动估算	424

14.2.3 基于光流场的二维运动估算.....	430
14.2.4 基于像素递归的二维运动估算.....	437
14.3 视频滤波	440
14.3.1 运动补偿滤波.....	441
14.3.2 噪声滤波.....	441
14.3.3 超分辨率重建.....	447
习题 14	456
参考文献	457

第1章 图像概述

自从 20 世纪 50 年代电子计算机问世以来,图像处理技术与科学随着超大规模集成技术,以及计算机结构、性能及算法的迅猛发展,也得到了飞速发展,并且越来越广泛地用于众多科学与工程领域,如遥感、工业检测、医学、气象、侦察、通信、智能机器人等。所有这些成就正在或将要深刻地改善着人们的生产手段、生活方式和人类社会的面貌。

1.1 绪言

当今,在这个人类 21 世纪的起点上,回顾 20 世纪,的确我们应该为在过去的一个世纪里在图像科学中取得的巨大成就而自豪。其中影响深远的标志性成就如下。

人造卫星的上天使得人们以无比宏大的视野触目我们赖以生存的地球,并眺望无垠的天际星云。是精密的哈勃望远镜将天际星空的影像传送给了我们,是各种星载的成像传送设备将地球的面貌、植被、高山大川、地物宝藏和与我们休戚相关的雷电云雨和波浪海涛,以图像的形式呈现给我们。图像是我们连接宇宙万物的“介质”。

人造卫星的上天和电视的发展使我们坐在家中便能同步地观看悉尼奥运会的精彩比赛,分享人类文明的巨大战果——“和平号”空间站凯旋回归的绚烂的一幕。图像使我们分享着人类的高度文明。

网络的出现使全球性的电子商务成为现实,我们购物的商店不再是传统的购物场所,而是以图像及其他数据组成的电子商城,图像取代了购物者对商品实物的认知。

图书馆使人类分享知识财富,不分种族,不分语言,信息的传送与显示应用也是以图像的形式进行的。

我们还可以列举很多很多……

图像是信息表征的绝好形式,其直观性和易理解性是显而易见的,是其他类信息所不能比拟的。

图像是自然界物和物群经可见光的照射,由人的视觉系统所感知的景物。当然图像的含义远不止如此。其实广义地讲,任何数据场在空间的有序排列都可转化成可视图像。

1.2 数字图像处理系统

对图像的应用必须涉及到图像的形成、处理、传输与显示。其中数字图像处理是图像应用的关键。

数字图像处理涵盖了数字图像处理技术的基本理论、概念和方法。其具体内容为图像的数学表征、线性变换处理、增强技术、复原、压缩编码、分割处理、分析与识别以及三维处理等。

承担上述处理任务的是数字图像处理系统。有大型的专业化的图像处理系统，例如国际上著名的 I²S Mode-75 系统和 C-4500 系统等，还有非专业化的小型系统。随着微型计算机的迅猛发展，就其容量、速度等诸多性能而言，并不比 20 年前的“大型机”差。所以配合适当的图像采集卡，可以构成一个性能十分优良的数字图像处理系统。

图像采集卡是构成所谓“小型”数字图像处理系统关键之一。它的性能直接影响着数字图像处理系统的性能。目前国内的中国大恒公司和中自公司均能提供性能十分优良的系列产品。

随着多媒体技术的发展，我们购置的多媒体计算机本身就是一个图像处理平台。

当然专用的图像图形工作站，如 Silicon Graphic，配合 OpenGL 图像处理软件，将使图像处理功能如虎添翼。

典型的数字图像处理系统，包括数字化输入设备，成像显示记录输出设备，数字图像处理器，以及图像存储器，其结构框图如图 1-1 所示。

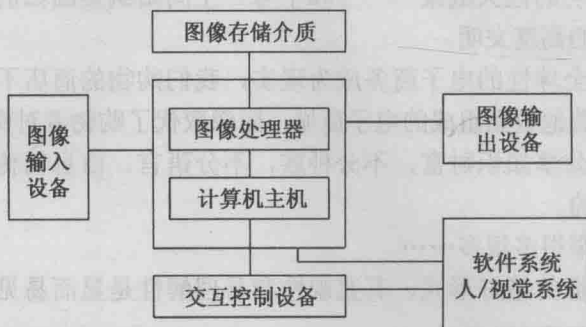


图 1-1 典型数字图像处理系统框图

图像输入设备：作为数字图像处理系统的图像输入的设备，各类品种均可以由市场购到。例如，常用的 CCD 摄像机、图像扫描仪、转鼓式扫描精密光学密度计，以及磁带机和磁盘机均可作为图像数据的输入设备，近年来市场上出现的数码相机也可作为输入设备。

图像输出设备：与图像输入设备一样，各类品种均可以在市场上买到。比如最常用的显示器、图像拷贝机、绘图仪、各类打印机。此外有磁带机、磁盘机和 VCR 即视频录像机等。

图像存储介质：数字图像处理系统的操作对象是数字图像。数字图像占据容量巨大，不论是在处理过程还是在存档过程中均如此。所以具有大容量存储器尤为重要。大容量硬磁盘和磁带机及近年来出现的 CD 光碟等均可作为图像存储器。

图像处理器/计算机主机：是数字图像处理系统的核心，或称之为“心脏”。担负着对图像进行各种处理、分析、控制、传输任务。它的运行速度直接影响着整个系统的处理图像的速度。

交互控制设备/人/视觉系统/软件系统：数字图像的处理过程必须由人参与介入，才能圆满完成处理任务。交互控制设备常使用鼠标、点控制器。处理进程在软件系统运行中完成。不能将人/视觉系统排斥在数字图像处理系统之外。因为处理过程和处理结果及对处理结果的满意度须由人来认定，而非计算机，所以必须了解人的视觉系统的特征。

1.3 视觉

1.3.1 视觉原理

人类眼睛的结构如图 1-2 所示。眼睛的形状为一圆球，其平均直径约为 20 mm，它由三层薄膜包着，即在图 1-2 中所示的角膜和巩膜外壳，脉络膜和视网膜。角膜是一种硬而透明的组织，它覆盖着眼睛的前表面。巩膜与角膜连在一起，巩膜是一层包围着眼球剩余部分的不透明的膜。

脉络膜位于巩膜的里边，这层膜包含着血管网，是眼睛的重要滋养源。脉络膜外壳着色，有助于减少外来光束进入人眼球内的回射。在脉络膜的最前面被分为睫状体和虹膜。虹膜的收缩和扩张控制着允许进入人眼内的光量。虹膜的中间开口处（瞳孔）的直径是可变的，约由 2 mm 到 8 mm。虹膜的前部有眼睛的明显的色素，而后部含有黑色素。

眼睛最里层的膜为视网膜，它布满在整个后部的内壁上。当眼睛被适当地聚焦时，从眼睛外部物体反射来的光就在视网膜上成像。整个视网膜表面上的分离的光接收器形成物体影像视觉。这种光接收器分为两类，即锥状体和杆状体。每只眼睛中的锥状体的数量在 600 万到 700 万之间，它们主要位于视网膜的中间部分，叫做中央凹，它对颜色很敏感，锥状体能充分地识别图像的细节。因为每个锥状体都连接着其自身的神经的一端，控制眼睛的肌肉，使眼球转动，从而使人所感兴趣的物体的像落到视网膜的中央凹上。锥状视觉称为白昼视觉。

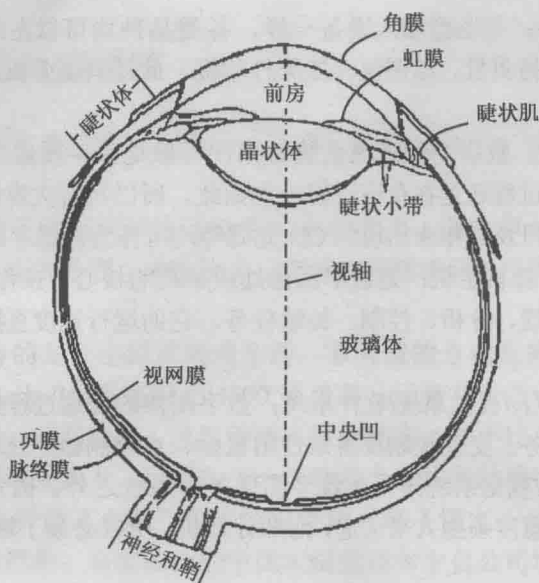


图 1-2 人类眼睛的结构示意图

杆状体数目更多，约有 7 500 万到 15 000 万个，分布在视网膜表面上。因为分布面积较大，并且几个杆状体连接到同一个神经末端上，因而识别图像的细节减小了。杆状体形成视野中总的物体的影像，没有颜色的感觉，而对低照明度景物较敏感。

晶状体由纤维细胞的同心层组成，并由睫状体的睫状小带支撑着。它含有 60% 到 70% 的水，约 6% 的脂肪。晶状体被稍黄的色素染色，并随年岁而增加，它大约吸收可见光谱的 8%，在越短的波长上吸收得越多。红外和紫外光被晶状结构内的蛋白质大大吸收，如果红外和紫外光过量，会使眼睛受到损伤。

人的眼睛的晶状体是一个精密绝伦的光学成像透镜，这种成像系统比普通的电光学透镜组成的成像系统有更强的适应性。

1.3.2 视觉现象

下述的视觉现象大多起因于人类的主观因素，而这些现象或多或少是相互联系的。

1. 亮度适应力

人的视觉系统能够适应光强度的级别的范围是很宽的。由夜视阈值到强闪光之间光强度的级别约为 10^{10} 级。很多实验数据表明，主观亮度（即由人的视觉系统感觉到的亮度）是进入眼内的光强度的对数函数。如图 1-3 所示，图中曲线表示出了光强度与主观亮度之间的关系。图中箭头所示为人的视觉系统所能适应的光强度的范围。昼视觉