



数字图像处理

贾永红 编著



全国优秀出版社
武汉大学出版社

数字图像处理

贾永红 编著

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理/贾永红编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2003.9

ISBN 7-307-03996-6

I. 数… II. 贾… III. 数字图像处理—高等学校—教材 IV. TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 064350 号

责任编辑: 王金龙 责任校对: 黄添生 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 武汉理工大印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.75 字数: 398 千字

版次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-03996-6/TN·15 定价: 24.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 摘 要

本书是武汉大学“十五”规划教材之一,是对原教材进一步完善与扩展。主要包括四部分内容:第一部分是数字图像处理的理论基础。由绪论、数字图像处理的基本概念和图像变换三章组成。第二部分是数字图像处理的理论、方法和实例。包括图像增强、图像恢复与重建、图像编码与压缩三章。第三部分是图像特征提取与分析的理论、方法和实例。包括图像分割、二值图像处理与形状分析、纹理分析、模板匹配与模式识别四章。第四部分是数字图像处理的应用和基本程序。

本书可作为高校计算机科学与技术、电子工程、自动化、地理信息系统、医学、遥感、地质、矿业、通信、气象、农业等相关专业本科生和研究生教材,也可供相关领域的大学教师、科研人员和工程技术人员参考。

前 言

数字图像处理是集光学、数学、计算机科学、电子学、信息论、控制论、物理学、心理学和生理学等学科为一体的一门综合性边缘科学。随着计算机科学的迅猛发展,以及与近代发展的新理论如小波分析、马尔柯夫随机场、分形学、数学形态学、人工智能和人工神经网络等的结合,数字图像处理近年来获得了长足的进展,呈现出强大的生命力。已在科学研究、工农业生产、军事、公安、医疗卫生、教育等许多领域得到广泛应用,产生了巨大的经济效益和社会效益,对推动社会发展,改善人们生活水平都起到了重要的作用。

本书是武汉大学“十五”规划教材之一,是对《计算机图像处理与分析》教材的拓新与扩展。为使读者能全面了解数字图像处理的基本概念、方法及应用,并为在本领域中进行研究和开发打下扎实的基础,本书在内容上既选取了有代表性的经典内容,着重介绍了图像处理的基本概念和方法,又结合数字图像处理的发展,选取了一些新的研究成果,具有一定的广度、深度和新颖性。在结构上仍沿用以往数字图像处理课程循序渐进的结构。因为传统的结构久经考验,结构严谨、系统。从图像处理的应用特点出发,图像处理的学习需要理论与实践结合才能收到最佳效果。本书中列举了许多示例;提供了图像处理的基本程序,以便学生在此基础上编写其他程序;在每章最后附有习题、部分编程和上机操作内容。

本书主要包括四部分内容。第一部分是数字图像处理的理论基础。由绪论、数字图像处理的基本概念和图像变换三章组成。第二部分是数字图像处理的理论、方法和实例。包括图像增强、图像恢复与重建、图像编码与压缩三章。第三部分是图像特征提取与分析的理论、方法和实例。包括图像分割、二值图像处理与形状分析、纹理分析、模板匹配与模式识别四章。第四部分是数字图像处理的应用和基本程序。

本书可作为高校计算机科学与技术、电子工程、自动化、地理信息系统、医学、遥感、地质、矿业、通信、气象、农业等相关专业本科生和研究生教材,也可供相关领域的大学教师、科研人员和工程技术人员参考。

本书在编写过程中,参考了国内外出版的大量书籍和论文,本人对本书中所引用论文和书籍的作者深表感谢。武汉大学出版社徐方、王金龙、王爱平等同志为本教材的出版做了大量工作,李均力同学参与编写了第十二章,王玲、吴芳等同学参与了部分录入和校对工作,在此对以上人员表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足和不妥之处,恳请读者批评指正。

贾永红

2003年5月于武汉大学

目 录

第一章 导 论	1
1.1 数字图像处理的概念	1
1.1.1 图像	1
1.1.2 图像处理	2
1.2 数字图像处理的内容和其他相关学科的关系	2
1.2.1 数字图像处理的内容	2
1.2.2 数字图像处理与其他相关学科的关系	3
1.3 数字图像处理系统概述	4
1.3.1 数字图像采集模块	4
1.3.2 数字图像显示模块	5
1.3.3 数字图像存储模块	5
1.3.4 数字图像通信模块	7
1.3.5 计算机	7
1.3.6 图像处理软件	7
1.4 数字图像处理的特点及其应用	8
1.4.1 数字图像处理的特点	8
1.4.2 数字图像处理的应用	9
习题	9
第二章 数字图像处理的基本概念	10
2.1 人眼的视觉原理	10
2.1.1 人眼的构造	10
2.1.2 图像的形成	11
2.1.3 视觉范围和分辨力	11
2.1.4 视觉适应性和对比灵敏度	12
2.1.5 亮度感觉与色觉	12
2.1.6 马赫带	14
2.2 连续图像的描述	15
2.3 图像数字化	16
2.3.1 采样	16
2.3.2 量化	17
2.3.3 数字图像的表达	17

2.3.4 采样、量化参数与数字化图像间的关系	19
2.3.5 数字化设备的组成及性能	20
2.4 图像灰度直方图	22
2.4.1 概念	23
2.4.2 直方图的性质	23
2.4.3 直方图的应用	24
2.5 数字图像处理算法的形式	25
2.5.1 基本功能形式	25
2.5.2 几种具体算法形式	25
2.6 图像的数据结构与图像文件格式	28
2.6.1 图像的数据结构	28
2.6.2 图像文件格式	31
2.7 图像的特征与噪声	36
2.7.1 图像的特征类别	36
2.7.2 特征提取与特征空间	37
2.7.3 图像噪声	38
习题	39
第三章 图像变换	41
3.1 预备知识	41
3.1.1 点源和狄拉克函数	41
3.1.2 二维线性位移不变系统	42
3.2 傅立叶变换	43
3.2.1 连续函数的傅立叶变换	43
3.2.2 离散函数的傅立叶变换	45
3.2.3 二维离散傅立叶变换的若干性质	47
3.3 其他可分离图像变换	50
3.3.1 通用公式	50
3.3.2 沃尔什变换	52
3.3.3 哈达玛变换	53
3.3.4 离散余弦变换	55
3.4 小波变换	56
3.4.1 连续小波变换	57
3.4.2 离散小波变换	60
习题	60
第四章 图像增强	62
4.1 图像增强的点运算	62
4.1.1 灰度级校正	63

4.1.2 灰度变换	63
4.1.3 直方图修正法	64
4.1.4 局部统计法	72
4.2 图像的空间域平滑	72
4.2.1 局部平滑法(邻域平均法或移动平均法)	72
4.2.2 超限像素平滑法	73
4.2.3 灰度最相近的 K 个邻点平均法	73
4.2.4 梯度倒数加权平滑法	73
4.2.5 最大均匀性平滑	75
4.2.6 有选择保边缘平滑法	75
4.2.7 空间低通滤波法	76
4.2.8 多幅图像平均法	77
4.2.9 中值滤波	77
4.3 空间域锐化	79
4.3.1 梯度锐化法	79
4.3.2 Laplacian 增强算子	82
4.3.3 高通滤波法	83
4.4 频率域增强	84
4.4.1 频率域平滑	84
4.4.2 频率域锐化	86
4.4.3 同态滤波增强	88
4.5 彩色增强技术	89
4.5.1 伪彩色增强	89
4.5.2 假彩色增强	91
4.5.3 彩色变换及其应用	92
4.6 代数运算	94
4.6.1 加运算	94
4.6.2 减运算	94
4.6.3 乘运算	94
4.6.4 除运算	94
习题	95
第五章 图像复原与重建	98
5.1 退化模型	98
5.1.1 退化	98
5.1.2 退化的数学模型	98
5.2 代数恢复方法	100
5.2.1 无约束复原	100
5.2.2 约束最小二乘复原	101

5.3 频率域恢复方法	102
5.3.1 逆滤波恢复法	102
5.3.2 去除由匀速运动引起的模糊	103
5.3.3 维纳滤波复原方法	105
5.4 几何校正	106
5.4.1 空间坐标变换	106
5.4.2 像素灰度内插	108
5.5 图像重建	110
5.5.1 计算机断层扫描的二维重建	110
5.5.2 三维形状的复原	112
习题	113
 第六章 图像编码与压缩	 114
6.1 概述	114
6.1.1 图像数据压缩的必要性与可能性	114
6.1.2 图像编码压缩技术的分类	115
6.2 图像保真度准则	115
6.2.1 客观保真度准则	115
6.2.2 主观保真度准则	116
6.3 统计编码方法	117
6.3.1 图像冗余度和编码效率	117
6.3.2 霍夫曼编码	117
6.3.3 费诺-仙依编码	119
6.3.4 算术编码	120
6.3.5 行程编码	121
6.4 预测编码	122
6.4.1 线性预测编码	123
6.4.2 非线性预测编码	124
6.5 正交变换编码	124
6.5.1 变换编码原理	124
6.5.2 正交变换的性质	125
6.5.3 变换编码的数学分析	125
6.5.4 最佳变换与准最佳变换	126
6.5.5 各种准最佳变换的性能比较	128
6.5.6 编码	129
6.6 图像编码的国际标准简介	130
6.6.1 静止图像压缩标准	130
6.6.2 运动图像压缩标准	131
6.6.3 二值图像压缩标准	131

习题	131
第七章 图像分割	132
7.1 概述	132
7.2 边缘检测算子	133
7.2.1 梯度算子	134
7.2.2 Roberts 梯度算子	134
7.2.3 Prewitt 和 Sobel 算子	135
7.2.4 方向算子	135
7.2.5 Laplacian 算子	136
7.2.6 马尔算子	137
7.2.7 Canny 边缘检测算子	138
7.2.8 沈俊边缘检测方法	140
7.2.9 曲面拟合法	141
7.3 边缘跟踪	141
7.3.1 光栅扫描跟踪	142
7.3.2 全向跟踪	143
7.4 Hough 变换线检测法	144
7.4.1 Hough 变换检测直线	144
7.4.2 广义 Hough 变换检测曲线	145
7.5 区域分割	146
7.5.1 最简单图像的区域分割	147
7.5.2 复杂图像的区域分割	149
7.5.3 特征空间聚类	149
7.6 区域增长	150
7.6.1 简单区域扩张法	150
7.6.2 质心型增长	151
7.6.3 混合型增长	151
7.7 分裂合并法	152
习题	155
第八章 二值图像处理与形状分析	156
8.1 二值图像的连接性和距离	156
8.1.1 邻域和邻接	156
8.1.2 像素的连接	157
8.1.3 连接成分	157
8.1.4 欧拉数	158
8.1.5 像素的可删除性和连接数	158
8.1.6 距离	160

8.2 连接成分的变形处理	161
8.2.1 标记	161
8.2.2 膨胀和收缩	161
8.2.3 线图形化	163
8.3 形状特征提取与分析	166
8.3.1 区域内部形状特征提取与分析	166
8.3.2 区域外部形状特征提取与分析	169
8.4 关系描述	174
8.4.1 字符串描述	174
8.4.2 树结构描述	176
习题	177
第九章 影像纹理分析	178
9.1 概述	178
9.2 直方图分析法	179
9.3 Laws 纹理能量测量法	179
9.4 自相关函数分析法	181
9.5 灰度共生矩阵分析法	182
9.5.1 灰度共生矩阵	182
9.5.2 灰度共生矩阵特征的提取	183
9.5.3 灰度-梯度共生矩阵分析法	184
9.6 行程长度统计法	186
9.7 傅立叶频谱分析法	187
9.8 马尔柯夫随机场分析法	189
9.8.1 马尔柯夫随机场的定义和基本性质	189
9.8.2 纹理的 MRF 模型参数提取与分析	190
9.9 影像纹理的小波分析	191
9.10 影像纹理的分形分析法	192
9.10.1 分形	192
9.10.2 分维	193
9.10.3 影像纹理的分维特征提取与分析	193
9.11 影像纹理的句法结构分析法	194
9.12 影像纹理区域分割与边缘检测	195
9.12.1 纹理区域分割	195
9.12.2 纹理边缘检测	196
习题	196
第十章 模板匹配与模式识别技术	197
10.1 模板匹配	197
10.1.1 模板匹配方法	197

10.1.2 模板匹配方法的改进	198
10.2 统计模式识别	199
10.2.1 特征处理	200
10.2.2 统计分类法	201
10.3 结构模式识别法	204
10.3.1 结构模式识别原理	204
10.3.2 树分类法	206
10.4 人工神经网络识别法	207
10.4.1 神经网络的结构	207
10.4.2 神经元	207
10.4.3 神经网络的工作过程	208
10.4.4 神经网络的性能	208
10.4.5 BP 神经网络	209
习题	211
第十一章 数字图像处理的应用	212
11.1 多源遥感影像像素级融合技术 *	212
11.1.1 基本概念	212
11.1.2 像素级影像融合过程与特点	212
11.1.3 多源遥感影像的空间配准方法	213
11.1.4 像素级影像融合方法及其特点	213
11.2 指纹识别系统	219
11.2.1 指纹的基本特征	220
11.2.2 指纹识别系统简介	221
11.2.3 指纹库的建立与查对	225
11.3 OCR 文字识别技术	225
11.3.1 版面分析方法	226
11.3.2 文字识别技术	227
第十二章 若干基本操作的 C + + 源代码	231
参考文献	246
附 录 英汉专业术语对照	247

第一章 导 论

1.1 数字图像处理的概念

1.1.1 图像

图像是对客观对象的一种相似性的、生动性的描述或写真。或者说图像是客观对象的一种表示,它包含了被描述对象的有关信息。它是人们最主要的信息源。据统计,一个人获取的信息大约有 75% 来自视觉。俗话说“百闻不如一见”,“一目了然”,都反映了图像在信息传递中的独特效果。

图像种类很多,根据人眼的视觉特性可将图像分为可见图像和不可见图像如图 1.1.1。其中可见图像的一个子集为图片,它包括照片、用线条画的图和画;另一个子集为光图像,即用透镜、光栅和全息技术产生的图像。不可见的图像包含不可见光成像和不可见量形成的图,如温度、压力及人口密度等的分布图。

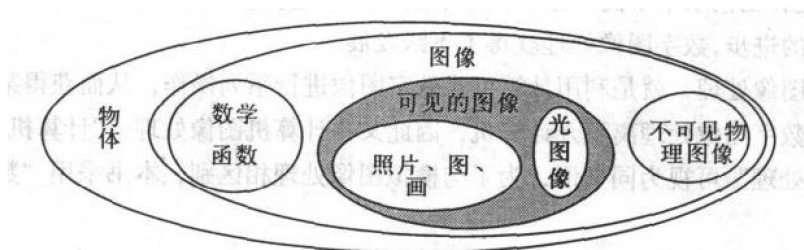


图 1.1.1 图像种类

图 1.1.2 是电磁波谱图。按波段数图像可分为单波段、多波段和超波段图像。单波段图像上每个点只有一个亮度值;多光谱图像上每个点具有多个特性,例如彩色图像上每个点具有红、绿、蓝三个亮度值;超波段图像上每个点具有几十或几百个特性。

按图像空间坐标和亮度(或色彩)的连续性可分为模拟图像和数字图像。模拟图像指空间坐标和亮度(或色彩)都是连续变化的图像。数字图像是一种空间坐标和灰度均不连续的、用离散数字(一般用整数)表示的图像。

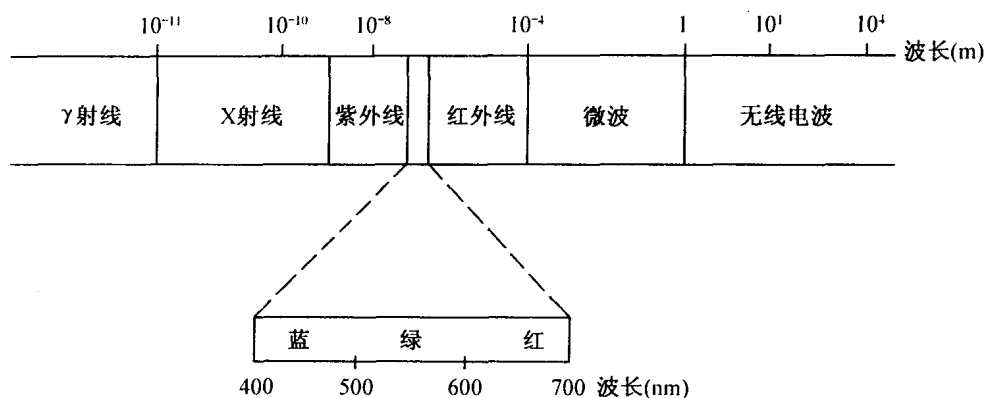


图 1.1.2 电磁波谱

1.1.2 图像处理

对图像进行一系列的操作,以达到预期的目的的技术称作图像处理。图像处理可分为模拟图像处理和数字图像处理。

利用光学、照像方法对模拟图像的处理称为模拟图像处理。光学图像处理方法已有很长的历史,在激光全息技术出现后,它得到了进一步发展。尽管光学图像处理理论日臻完善,且处理速度快,信息容量大,分辨率高,又非常经济,但处理精度不高,稳定性差,设备笨重,操作不方便和工艺水平不高等原因限制了它的发展速度。从 20 世纪 60 年代起,随着电子计算机技术的进步,数字图像处理获得了飞跃发展。

所谓数字图像处理,就是利用计算机对数字图像进行系列操作,从而获得某种预期的结果的技术。数字图像处理离不开计算机,因此又称计算机图像处理。“计算机图像处理”与“数字图像处理”可视为同义语,为了与模拟图像处理相区别,本书采用“数字图像处理”。

1.2 数字图像处理的内容和其他相关学科的关系

1.2.1 数字图像处理的内容

自 20 世纪 60 年代以来,由于数字技术和微电子技术的迅猛发展给数字图像处理提供了先进的技术手段,数字图像处理也就从信息处理、自动控制系统论、计算机科学、数据通信、电视技术等学科中脱颖而出,成为研究“图像信息的获取、传输、存储、变换、显示、理解与综合利用”的一门崭新学科。

数字图像处理所包含的内容是相当丰富的,根据抽象程度不同,数字图像处理可分为三个层次:狭义图像处理、图像分析和图像理解。如图 1.2.1 所示。

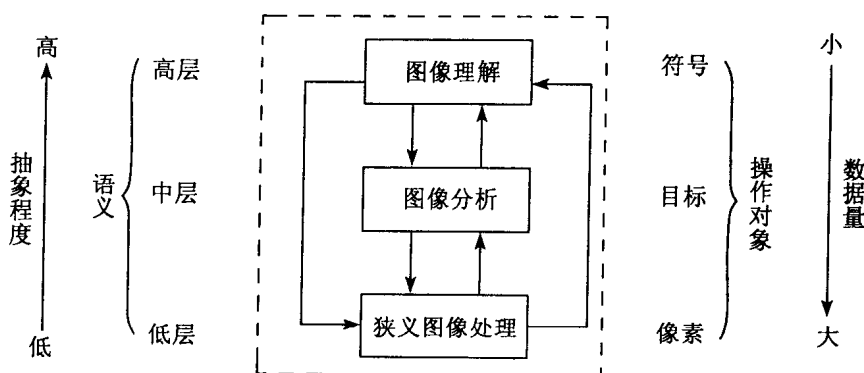


图 1.2.1 数字图像处理三层次示意图

狭义图像处理是对输入图像进行某种变换得到输出图像,是一种图像到图像的过程。狭义图像处理主要指对图像进行各种操作以改善图像的视觉效果,或对图像进行压缩编码以减少所需存储空间或传输时间、传输通路的要求。

图像分析主要是对图像中感兴趣的目标进行检测和测量,从而建立对图像的描述。图像分析是一个从图像到数值或符号的过程。

图像理解则是在图像分析的基础上,基于人工智能和认知理论,研究图像中各目标的性质和它们之间的相互联系,对图像内容的含义加以理解以及对原来客观场景加以解译,从而指导和规划行动。如果说图像分析主要是以观察者为中心研究客观世界(主要研究可观察到的对象),那么图像理解在一定程度上是以客观世界为中心,借助知识、经验等来把握整个客观世界。

可见,狭义图像处理、图像分析和图像理解是相互联系又相互区别的。狭义图像处理是低层操作,它主要在图像像素级上进行处理,处理的数据量非常大;图像分析则进入了中层,经分割和特征提取,把原来以像素构成的图像转变成比较简洁的非图像形式的描述;图像理解是高层操作,它是对描述中抽象出来的符号进行推理,其处理过程和方法与人类的思维推理有许多类似之处。由图 1.2.1 可见,随着抽象程度的提高,数据量逐渐减少。一方面,原始图像数据经过一系列的处理逐步转化为更有组织和用途的信息,在这个过程中,语义不断引入,操作对象发生变化,数据量得到了压缩;另一方面,高层操作对低层操作有指导作用,能提高低层操作的效能。

1.2.2 数字图像处理与其他相关学科的关系

数字图像处理是一门综合性边缘学科,在数字图像处理这把大伞下会聚了光学、电子学、数学、摄影技术、计算机技术等众多方面的学科。从研究范围来看,它与计算机图形学、模式识别、计算机视觉等学科既有联系又有区别。

图 1.2.2 给出了图像处理学三个层次的输入输出内容以及与计算机图形学、模式识别、计算机视觉等学科的联系。图形学原本指用图形、图表、绘图等形式表达数据信息的科学,目前计算机图形学研究的内容是如何利用计算机技术来产生这些形式,即由非图像形式的数据生成图像。和图像分析对比,两者的处理对象和输出结果正好相反。计算机图形学试图从非图像形式的数据描述来生成图像。另一方面,模式识别与图像分析则比较相似,只是

前者试图把图像抽象成用符号描述类别。它们有相同的输入,而不同的输出结果之间可较方便地进行转换。至于计算机视觉主要强调用计算机去实现人的视觉功能,其中涉及图像处理的许多技术,但目前的研究内容主要与图像理解相结合。

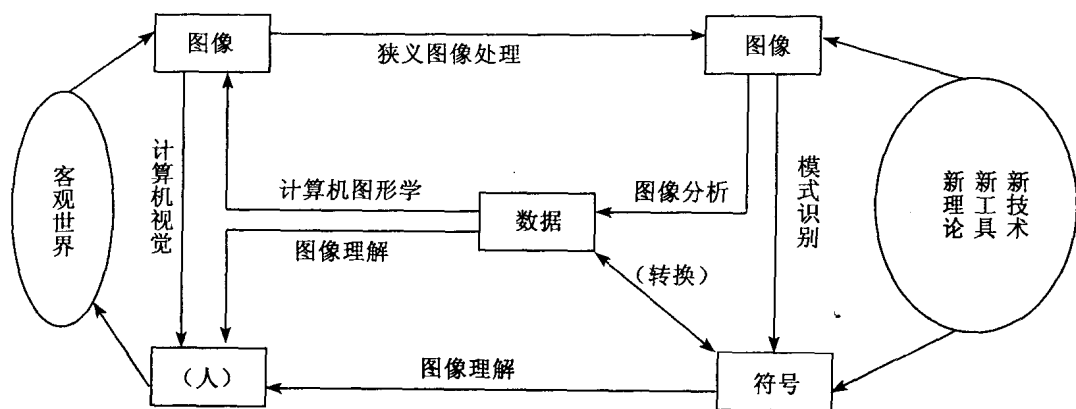


图 1.2.2 图像处理学与相关学科和领域的联系和区别

由此看来,以上学科相互联系,相互交叉,它们之间并没有绝对的界限。虽各有侧重但又互相补充。另外以上各学科都得到了人工智能、神经网络、遗传算法、模糊逻辑等新理论、新工具、新技术的支持,所以它们在近年得到了进步的发展。

1.3 数字图像处理系统概述

图 1.3.1 是一个数字图像处理系统的基本组成。它包括采集、显示、存储、通信、处理和分析五个模块。与一般的用于数据处理的计算机系统的不同点是必须有专用的输入输出和通信设备。各模块都有其特定的功能,对图 1.3.1 中的各个模块分别简介如下。

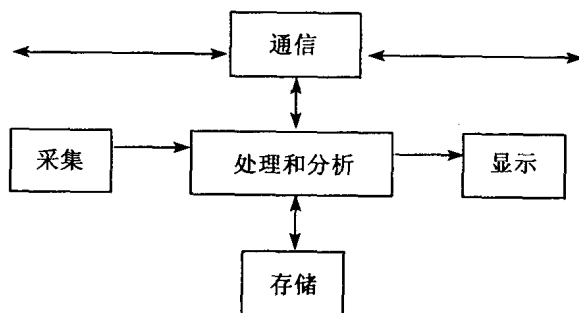


图 1.3.1 图像处理和系统分析系统的构成示意图

1.3.1 数字图像采集模块

为采集数字图像,所用设备由两个部件组成:一是对某个电磁能量波谱段(如 X 射线、

紫外线、可见光、红外线等)敏感的物理器件,它能产生与所接受到的电磁能量成正比的(模拟)电信号;一是模/数转换部件,它能将上述(模拟)电信号转化为数字(离散)的形式。所有数字图像采集设备都包含这两种部件。目前图像采集设备有电荷耦合器件照相机、数字摄像机和扫描仪等。较详细介绍见第二章第三节。

1.3.2 数字图像显示模块

对狭义数字图像处理来说,其目的是提供一幅便于分析、解译和识别的图像。对图像分析而言,分析的结果可以借助计算机图形学技术转换为更直观的图像形式显示。所以图像显示是数字图像处理的重要内容之一。

图像的显示主要有两种:一种是将图像通过 CRT 显示器、液晶显示器或投影仪等设备暂时性显示的软拷贝形式;一种是通过照相机、激光拷贝和打印机等将图像输出到物理介质上的永久性硬拷贝形式。

打印设备一般用于输出较低分辨率的图像。以往打印灰度图像的一种简便方法是利用标准行打印机的重复打印功能,输出图像上任一点的灰度由该点打印的字符数量和密度来控制。近年来使用的各种热敏、喷墨和激光打印机等具有更好的性能,已可打印出较高分辨率的图像。

1.3.3 数字图像存储模块

图像的数据量往往很大,因而需要大量的空间存储图像。在图像处理和分析系统中,大容量和快速的图像存储器是必不可少的。在计算机中,图像数据最小的度量单位是比特(bit)。存储器的存储量常用字节(1byte = 8bit)、千字节(kbyte)、兆(10^6)字节(Mbyte)、吉(10^9)字节(Gbyte)、太(10^{12})字节(Tbyte)等表示。例如存储 1 幅 1024×1024 的 8bit 图像就需要 1Mbyte 的存储器。用于图像处理和分析的数字存储器可分为 3 类:快速存储器;在线或联机存储器;不经常使用的数据库(档案库)存储器。

计算机内存就是一种提供快速存储功能的存储器。目前微型计算机的内存常为 32Mbyte ~ 512Mbyte。另外一种提供快速存储功能的存储器是特制的硬件卡,即帧缓存,它可存储多幅图像并以视频速度(每秒 25 或 30 幅图像)读取,也可以对图像进行放大缩小、垂直翻转和水平翻转。目前常用的帧缓存容量在几十 Mbyte 到上百 Mbyte。

固定硬盘和 3.5 英寸的软磁盘一直是小型和微型计算机的必备外存储器。固定硬盘为计算机提供了大容量的存储介质,但是其盘片无法更换,存储的信息也不便于携带和交换。

软盘虽然提供了可更换的存储介质,但软盘存在可靠性差、容量小、速度慢、寿命短、容易损坏等缺点,其 1.44MB 的存储容量远远不能满足图像处理的应用要求。

闪存盘是以闪存记忆体为存储介质,由朗科发明,朗科称之为“U 盘”。它是以 USB 为接口的一种存储方式,具有存储容量大、体积小、保存数据期长且安全可靠、方便携带、抗震性能强、防磁防潮、耐温、性价比高等突出优点,是软盘的理想替代品。

移动硬盘和 U 盘性能基本相同,可靠性高,数据保存可达 10 年以上,数据传输率较快,可达到 12 ~ 400MB/s。操作方便,支持热拔插,无需外接电源,只要插入主机后面的 USB 接口就可使用。但在外形和性价比上二者有很大的差别:U 盘只有大拇指般大小,重 20g,采用闪存技术,容量大致在 8M ~ 1G 之间;移动硬盘重量在 150 ~ 250g 之间,一般采用玻璃盘片存