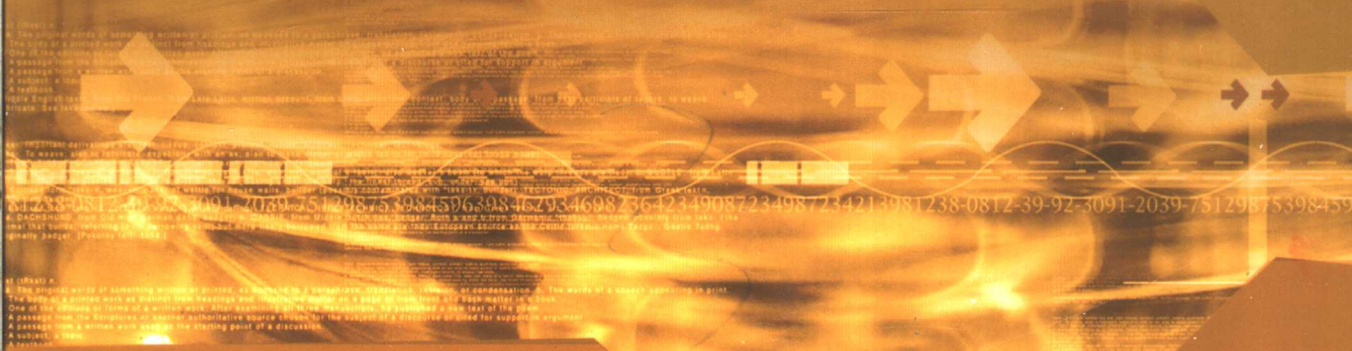


SHUZI TUXIANG CHULI

数字图像处理

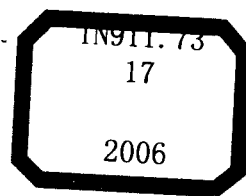
王慧琴 编著



ISBN 978-7-304-02342-3



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



数字图像处理

王慧琴 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书重点介绍了数字图像处理的基本概念、基本理论、实用技术,以及用 Matlab 进行图像处理、编程的方法。全书共 7 章,主要内容包括图像及其数字处理、Matlab 图像处理工具箱、图像的变换、图像的增强、图像的复原、图像编码与压缩技术和数字图像的应用实例等。

本书结构合理,叙述清晰、简练,理论与实践并重。使用 Matlab 作为实验平台,加入了大量的实验实例,并且有大量的实验结果图片,对读者理解利用 Matlab 软件进行数字图像处理有很大的帮助。

全书深入浅出、图文并茂,反映了近年来数字图像处理领域的最新发展情况,适合作为通信与信息类、计算机类及相关专业高年级本科生或低年级研究生学习数字图像处理课程的教材或教学参考书,也可作为从事图像处理、图像通信、多媒体通信、数字电视等领域科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字图像处理/王慧琴编著. —北京:北京邮电大学出版社,2006

ISBN 7-5635-1294-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080601 号

书 名: 数字图像处理

编 著: 王慧琴

责任编辑: 孙伟玲

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

北方营销中心: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

南方营销中心: 电话: 010-62282902 传真: 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14

字 数: 347 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1294-2/TN·464

定价: 22.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

前 言

数字图像处理是一个跨学科的前沿科技领域,在工程学、计算机科学、信息学、统计学、物理、化学、遥感、生物医学、地质、海洋、气象、农业、冶金等许多学科中得到了广泛的应用,并显示出广阔的前景,成为计算机科学、信息科学、生物学、医学等学科研究的热点。

本书重点介绍了数字图像处理的基本概念、基本理论、实用技术,以及用 Matlab 进行图像处理、编程的方法。本书结构安排合理,叙述清晰、简练,理论与实践并重,使用 Matlab 作为实验平台,将图像处理内容与 Matlab 有机结合,在每一部分的理论讲解后都附有 Matlab 函数功能和实现方法,并且加入了大量的实验实例,以及实验结果图片,对读者的理解有很大的帮助。全书深入浅出、图文并茂,文字描述力求简单易懂。选材上既注重基本概念、理论和方法的介绍,同时也反映了近年来数字图像处理领域的最新发展情况。在第 7 章介绍了数字指纹、车牌识别、图像型火灾探测以及图像数字水印等数字图像应用领域实例。每一章节后附有习题。

全书共 7 章,主要内容包括图像及其数字图像处理、Matlab 图像处理工具箱、图像的变换、图像的增强、图像的复原、图像编码与压缩技术以及数字图像的应用实例等。

本书适合作为通信与信息类、计算机类及相关专业高年级本科生或低年级研究生学习数字图像处理课程的教材或教学参考书,也可供从事图像处理、图像通信、多媒体通信、数字电视等领域的科技人员参考。

本书在编写过程中,参考了国内外出版的大量文献以及网站资料(这些资料在本书的参考文献中已尽量列出,若有遗漏深表歉意),在此对本书所引用文献的作者深表感谢。本书的内容也融入了作者所在课题组在数字图像处理教学和科研中的成果和经验,这里对课题组的全体人员一并表示感谢。此外,西安建筑科技大学的柱高峰、白梅同学参与了书中的部分程序的调试工作,余伟、刘莹、王振华、李虎胜、刘怡、贾雷刚等同学参与了部分插图的绘制、录入和校对工作,在此对以上人员表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有不足和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2006 年 7 月

目 录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 图像的概念 | 1 |
| 1.2 图像的分类 | 2 |
| 1.3 图像的表达 | 2 |
| 1.3.1 图像信号的表示 | 2 |
| 1.3.2 数字图像的表达 | 3 |
| 1.4 人类的视觉 | 4 |
| 1.4.1 人眼构造和视觉现象 | 4 |
| 1.4.2 人类视觉特性 | 5 |
| 1.5 图像质量的评价方法 | 8 |
| 1.6 数字图像处理 | 10 |
| 1.6.1 图像信号的数字化 | 10 |
| 1.6.2 数字图像文件的存储格式 | 15 |
| 1.6.3 数字图像处理主要的研究内容 | 19 |
| 1.6.4 数字图像处理系统 | 20 |
| 1.6.5 图像处理、图像分析和图像理解 | 21 |
| 1.6.6 图像通信系统 | 21 |
| 1.6.7 数字图像处理的主要应用 | 23 |
| 习题 | 24 |
| 第 2 章 Matlab 图像处理工具箱 | 25 |
| 2.1 Matlab 简介 | 25 |
| 2.2 Matlab 常用的基本命令 | 26 |
| 2.3 图像处理工具箱简介 | 30 |
| 2.4 Matlab 中的图像类型及类型转换 | 32 |
| 2.4.1 图像和图像数据 | 32 |
| 2.4.2 图像处理工具箱所支持的图像类型 | 33 |
| 2.4.3 Matlab 图像类型转换 | 36 |
| 2.4.4 图像文件的读写和查询 | 39 |
| 2.4.5 图像文件的显示 | 41 |
| 2.4.6 不同类型的图像显示方法 | 43 |
| 习题 | 48 |
| 第 3 章 图像的变换 | 49 |
| 3.1 图像的正交变换 | 49 |
| 3.2 傅里叶变换 | 51 |
| 3.2.1 连续函数的傅里叶变换 | 51 |

| | | |
|--------------|------------------------|-----------|
| 3.2.2 | 离散函数的傅里叶变换 | 53 |
| 3.2.3 | 离散傅里叶变换的若干性质 | 55 |
| 3.2.4 | 离散傅里叶变换的 Matlab 实现 | 57 |
| 3.3 | 离散余弦变换 | 62 |
| 3.3.1 | 一维离散余弦变换 | 62 |
| 3.3.2 | 二维离散余弦变换 | 62 |
| 3.3.3 | 离散余弦变换的 Matlab 实现 | 63 |
| 3.4 | 沃尔什变换和哈达玛变换 | 65 |
| 3.4.1 | 离散沃尔什变换 | 65 |
| 3.4.2 | 离散哈达玛变换 | 68 |
| 3.4.3 | 沃尔什变换和哈达玛变换的 Matlab 实现 | 70 |
| 3.5 | 小波变换 | 72 |
| 3.5.1 | 小波变换基本理论 | 72 |
| 3.5.2 | 频域空间的划分 | 74 |
| 3.5.3 | 图像小波变换的 Matlab 实现 | 74 |
| | 习题 | 78 |
| 第 4 章 | 图像的增强 | 80 |
| 4.1 | 引言 | 80 |
| 4.2 | 灰度变换法 | 81 |
| 4.2.1 | 全域线性变换 | 81 |
| 4.2.2 | 非线性灰度变换 | 82 |
| 4.3 | 直方图修正法 | 83 |
| 4.3.1 | 直方图 | 83 |
| 4.3.2 | 直方图修正 | 86 |
| 4.3.3 | 直方图均衡化 | 87 |
| 4.3.4 | 直方图规定化 | 90 |
| 4.3.5 | 直方图均衡化的 Matlab 实现 | 94 |
| 4.4 | 图像的平滑 | 97 |
| 4.4.1 | 邻域平均法 | 97 |
| 4.4.2 | 中值滤波 | 98 |
| 4.4.3 | 多图像平均法 | 100 |
| 4.5 | 图像锐化 | 101 |
| 4.5.1 | 梯度锐化法 | 101 |
| 4.5.2 | Laplacian 增强算子 | 103 |
| 4.6 | 频率域滤波增强 | 103 |
| 4.6.1 | 频率域低通滤波器 | 104 |
| 4.6.2 | 频率域高通滤波器 | 105 |
| 4.6.3 | 带通和带阻 | 106 |
| 4.6.4 | 图像增强的 Matlab 实现 | 106 |
| 4.7 | 彩色增强 | 112 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 4.7.1 伪彩色增强 | 113 |
| 4.7.2 真彩色增强 | 115 |
| 4.7.3 彩色增强的 Matlab 实现 | 115 |
| 习题 | 116 |
| 第 5 章 图像的复原 | 118 |
| 5.1 概述 | 118 |
| 5.2 退化的数字模型 | 118 |
| 5.2.1 退化模型 | 118 |
| 5.2.2 连续函数的退化模型 | 120 |
| 5.2.3 离散的退化模型 | 120 |
| 5.3 代数恢复方法 | 124 |
| 5.3.1 无约束复原 | 124 |
| 5.3.2 约束最小二乘复原 | 124 |
| 5.4 频率域恢复方法 | 126 |
| 5.4.1 逆滤波恢复法 | 126 |
| 5.4.2 去除由匀速运动引起的模糊 | 127 |
| 5.5 维纳滤波复原方法 | 129 |
| 5.6 图像复原的 Matlab 实现 | 130 |
| 5.6.1 模糊及噪声 | 130 |
| 5.6.2 维纳滤波复原的 Matlab 实现 | 132 |
| 5.6.3 约束最小二乘方滤波复原的 Matlab 实现 | 133 |
| 习题 | 135 |
| 第 6 章 图像编码与压缩技术 | 136 |
| 6.1 概述 | 136 |
| 6.1.1 图像的信息冗余 | 137 |
| 6.1.2 图像压缩编码技术的分类 | 137 |
| 6.2 图像压缩编码评价 | 138 |
| 6.2.1 基于压缩编码参数的评价 | 139 |
| 6.2.2 图像的逼真度准则 | 139 |
| 6.3 图像的统计编码 | 140 |
| 6.3.1 行程编码 | 141 |
| 6.3.2 方块编码 | 142 |
| 6.3.3 霍夫曼编码 | 143 |
| 6.3.4 算术编码 | 147 |
| 6.3.5 行程编码和霍夫曼编码的 Matlab 实现 | 150 |
| 6.4 预测编码 | 153 |
| 6.4.1 DPCM 编码 | 154 |
| 6.4.2 最佳线性编码 | 154 |
| 6.4.3 DPCM 系统中的图像降质 | 156 |
| 6.4.4 预测编码的 Matlab 实现 | 157 |

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 6.5 | 比特面编码 | 158 |
| 6.6 | 变换编码 | 160 |
| 6.7 | 编码技术的新进展——第二代编码方法 | 161 |
| 6.8 | 静止图像压缩编码标准 | 162 |
| 6.8.1 | JPEG 标准 | 162 |
| 6.8.2 | JPEG 2000 标准 | 167 |
| | 习题 | 171 |
| 第7章 | 数字图像处理的应用与发展 | 172 |
| 7.1 | 指纹识别技术 | 172 |
| 7.1.1 | 概述 | 172 |
| 7.1.2 | 指纹识别系统分类 | 172 |
| 7.1.3 | 指纹识别系统工作原理 | 173 |
| 7.1.4 | 指纹识别模块算法 | 176 |
| 7.1.5 | 指纹特征提取和比对 | 179 |
| 7.2 | 车辆牌照识别技术 | 180 |
| 7.2.1 | 概述 | 180 |
| 7.2.2 | 车辆牌照识别系统的结构 | 181 |
| 7.2.3 | 预处理 | 182 |
| 7.2.4 | 牌照定位 | 182 |
| 7.2.5 | 字符的分割 | 183 |
| 7.2.6 | 车牌字符识别 | 183 |
| 7.3 | 图像型火灾探测技术 | 186 |
| 7.3.1 | 概述 | 186 |
| 7.3.2 | 火灾图像的分割处理 | 186 |
| 7.3.3 | 火灾图像识别 | 190 |
| 7.3.4 | 仿真及结果 | 193 |
| 7.4 | 数字图像水印技术 | 197 |
| 7.4.1 | 概述 | 197 |
| 7.4.2 | 数字图像水印的特性和分类 | 197 |
| 7.4.3 | 数字水印原理 | 198 |
| 7.4.4 | DCT 域数字图像水印技术 | 200 |
| 附录 | 数字图像处理实验 | 204 |
| | 实验项目及学时安排 | 204 |
| | 实验一 Matlab 图像工具箱的使用 | 204 |
| | 实验二 图像变换 | 205 |
| | 实验三 图像灰度修正技术和直方图均衡化 | 206 |
| | 实验四 图像的平滑 | 207 |
| | 实验五 图像的锐化 | 208 |
| | 实验六 DCT 域图像数字水印算法 | 211 |
| | 参考文献 | 213 |

第1章 绪 论

随着人类社会的进步和科学技术的发展,人们对信息处理和信息交流的要求越来越高。

人类传递信息的主要媒介是语音和图像。在接受的信息中,听觉信息占 20%,视觉信息占 60%,其他如味觉、触觉、嗅觉总的加起来不超过 20%。图像信息处理是人类视觉延续的重要手段。人的眼睛只能看到波长为 380~780 nm 的可见光部分,而迄今为止人类发现可成像的射线已有多种(如 γ 射线、紫外线、红外线、微波),它们扩大了人类认识客观世界的的能力。

数字图像处理是一个跨学科的前沿科技领域,在工程学、计算机科学、信息学、统计学、物理、化学、遥感、生物医学、地质、海洋、气象、农业、冶金等许多学科中的应用取得了巨大的成功和显著的经济效益。

1.1 图像的概念

图像是当光辐射能量照在物体上,经过它的反射或透射,或由发光物体本身发出的光能量,在人的视觉器官中所重现出的物体的视觉信息。图像一般用 Image 表示,是视觉景物的某种形式的表示和记录。通俗地说,图像是指利用技术手段把目标原封不动地再现。由于图像感知的主体是人类,所以不仅可以将图像看作是二维平面上或三维立体空间中具有明暗或颜色变化的分布,还可以包括人的心理因素对图像接收和理解所产生的影响。

与图像密切相关的两个基本概念是图片(picture)和图形(graphics)。一般认为,图片是图像的一种类型,在一些教科书中将其定义为“经过合适的光照后可见物体的分布”,图片强调现实世界中的可见物体。图形是指人为的图形,如图画、动画等人造的二维或三维图形,它强调应用一定的数学模型生成图形。图形与图像的数据结构不同,图形采用矢量结构,图像则采用栅格结构。图形学(主要指计算机图形学)是研究应用计算机生成、处理和显示图形的一门科学。它涉及利用计算机将由概念或数学描述所表示的物体(而不是实物)图像进行处理和显示的过程,侧重点在于根据给定的物体描述数学模型、光照及想像中的摄像机的成像几何,生成一幅图像的过程。

而图像处理进行的却是与此相反的过程,它是基于画面进行二维或三维物体模型的重建,这在很多场合是十分重要的。如高空监视摄影、宇航探测器收集到的月球或行星的慢速扫描电视图像。从工业机器人的“眼”中测到的电视图像、染色体扫描、X 射线图像、断层、指纹分析等,都需要图像处理技术。图像处理包括图像增强、模式识别、景物分析和计算机视觉模型等领域。虽然计算机图形学和图像处理目前仍然是两个相对独立的学科分支,但他们的重叠之处越来越多(例如它们都是用计算机进行点、面处理,都使用光栅显示器等)。在

图像处理中,需要用计算机图形学中的交互技术和手段输入图形、图像和控制相应的过程。在计算机图形学中,也经常采用图像处理操作帮助合成模型的图像。图形和图像处理算法的结合是促进计算机图形学和图像处理技术发展的重要趋势之一。

1.2 图像的分类

视觉是人类最重要的感觉,也是人类获取信息的主要来源。图像与其他的信形式相比,具有直观、具体、生动等诸多显著的优点,可以按照图像的表现形式、生成方法等对其进行不同的划分。

1. 按照图像的存在形式分类

按照图像的存在形式分类,可分为实际图像与抽象图像。

(1) 实际图像。通常为二维分布,又可分为可见图像和不可见图像。可见图像指人眼能够看到并能接受的图像,包括图片、照片、图、画、光图像等。不可见图像如温度、压力、高度和人口密度分布图等。

(2) 抽象图像。如数学函数图像,包括连续函数和离散函数。

2. 按照图像亮度等级分类

按照图像亮度等级分类,可分为二值图像和灰度图像。

(1) 二值图像。只有黑白两种亮度等级的图像。

(2) 灰度图像。有多重亮度等级的图像。

3. 按照图像的光谱分类

按照图像的光谱特性分类,可分为彩色图像和黑白图像。

(1) 彩色图像。图像上的每个点有多于1个的局部特性,如在彩色摄影和彩色电视中重现的3基色(红、绿、蓝)图像,每个像点就有分别对应3个基色的3个亮度值。

(2) 黑白图像。每个像点只有一个亮度值分量,如黑白照片、黑白电视画面等。

4. 按照图像是否随时间变换分类

按照图像是否随时间变换分类,可分为静止图像与活动图像。

(1) 静止图像。不随时间而变换的图像,如各类图片等。

(2) 活动图像。随时间而变换的图像,如电影和电视画面等。

5. 按照图像所占空间和维数分类

按照图像所占空间和维数分类,可分为二维图像和三维图像。

(1) 二维图像:平面图像,如照片等。

(2) 三维图像:空间分布的图像,一般使用2个或者多个摄像头完成。

1.3 图像的表达

1.3.1 图像信号的表示

图像的亮度一般可以用多变量函数表示为

$$I=f(x,y,z,\lambda,t) \quad (1.3.1)$$

式中, x, y, z 表示空间某个点的坐标; λ 为光的波长; t 为时间轴坐标。当 $z = z_0$ (常数) 时, 则表示二维图像; 当 $\lambda = \lambda_0$ 时, 则表示单色图像; 当 $t = t_0$ 时, 则表示静态图像。

由于 I 表示的是物体的反射、投射或辐射能量, 因此它是正的、有界的, 即

$$0 \leq I \leq I_{\max} \quad (1.3.2)$$

式中, I_{\max} 表示 I 的最大值, $I = 0$ 表示绝对黑色。

式(1.3.1)是一个多变量的函数, 不易分析, 需要采用一些有效的方法进行降维。

由3基色原理知, I 可表示为3个基色分量的和, 即

$$I = I_R + I_G + I_B \quad (1.3.3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} I_R &= f_R(x, y, z, \lambda_R) \\ I_G &= f_G(x, y, z, \lambda_G) \\ I_B &= f_B(x, y, z, \lambda_B) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.4)$$

其中 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ 为3个基色波长。

由于式(1.3.4)中的每个彩色分量都可以看作一幅黑白图像, 所以, 所有对于黑白图像的理论和方法都适于彩色图像的每个分量。

1.3.2 数字图像表示

一幅 $m \times n$ 的数字图像可用矩阵表示为

$$F = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,n-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,n-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(m-1,0) & f(m-1,1) & \cdots & f(m-1,n-1) \end{pmatrix} \quad (1.3.5)$$

数字图像中的每个像素都对应于矩阵中相应的元素。把数字图像表示成矩阵的优点在于, 能应用矩阵理论对图像进行分析处理。在表示数字图像的能量、相关等特性时, 采用图像的矢量(向量)表示比用矩阵表示方便。若按行的顺序排列像素, 使该图像后一行第1个像素紧接前一行最后一个像素, 可以将该幅图像表示成 $1 \times mn$ 的列向量 f , 即

$$f = (f_0, f_1, \dots, f_{m-1})^T \quad (1.3.6)$$

式中, $f_i = (f(i,0), f(i,1), \dots, f(i,n-1))^T, i = 0, 1, \dots, m-1$ 。这种表示方法的优点在于, 对图像进行处理时, 可以直接利用向量分析的有关理论和方法。构成向量时, 既可以按行的顺序, 也可以按列的顺序。选定一种顺序以后, 后面的处理都要与之保持一致。

灰度图像是指每个像素由一个量化灰度来描述的图像, 没有彩色信息, 如图1.1所示。若图像像素灰度只有两级(通常取0(黑色)或1(白色)), 这样的图像称为二值图像, 如图1.2所示。

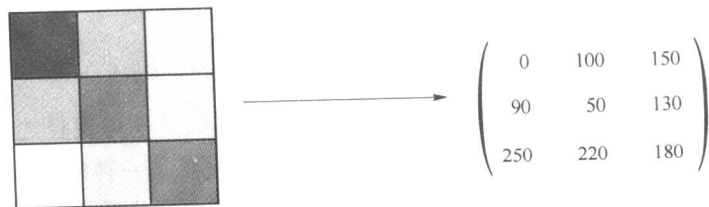


图 1.1 灰度图像

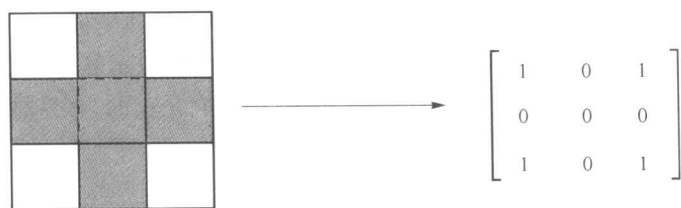


图 1.2 二值图像

彩色图像是指每个像素由红、绿、蓝(分别用 R 、 G 、 B 表示)3 原色构成的图像,其中 R 、 G 、 B 是由不同的灰度级描述的。

$$R = \begin{pmatrix} 255 & 240 & 240 \\ 255 & 0 & 80 \\ 255 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} 0 & 160 & 80 \\ 255 & 255 & 160 \\ 0 & 255 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 80 & 160 \\ 0 & 0 & 240 \\ 255 & 255 & 255 \end{pmatrix} \quad (1.3.7)$$

表 1.1 给出了各类图像的表达形式。

表 1.1 不同类别的图像的表达形式

| 类别 | 形式 | 备注 |
|-------|---------------------------------------|----------------------|
| 二值图像 | $f(x, y) = 0, 1$ | 文字、线图形、指纹等 |
| 灰度图像 | $0 \leq f(x, y) \leq 2^n - 1$ | 普通照片, $n = 6 \sim 8$ |
| 彩色图像 | $\{f_i(x, y)\}, i = R, G, B$ | 用彩色 3 基色表示 |
| 多光谱图像 | $\{f_i(x, y)\}, i = 1, 2, \dots, m$ | 用于遥感 |
| 立体图像 | f_L, f_R | 用于摄影测量, 计算机视觉 |
| 运动图像 | $f_i(x, y), t = t_1, t_2, \dots, t_n$ | 动态分析, 视频影像制作 |

1.4 人类的视觉

为了有效地设计图像系统,尤其是输出供人们观察的照片或屏幕显示这样一些图像系统,必须充分研究人的视觉系统,因为人的视觉系统才是这类图像系统的最后终端,即图像信息的信宿,而且此类系统输出图像最终总是由人的视觉系统评价。另一方面,从某种意义上讲,人的视觉系统本身就是一个结构复杂、性能优越的图像系统。从仿生学角度出发,视觉原理、视觉特性以及视觉模型的研究,对于图像工程技术人员来讲,是很有启发性和吸引力的。

视觉研究可分为视觉生理、视觉特性、视觉模型 3 个方面。

1.4.1 人眼构造和视觉现象

图 1.3 为人眼的横截面的简单示意图。前部为一圆球,其平均直径约为 20 mm 左右,由 3 层薄膜包着,即角膜和巩膜外壳、脉络膜和视网膜。角膜是一种硬而透明的组织,盖着眼睛的前表面;巩膜与角膜连在一起,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,这层膜包含有血管网,它是眼睛的重要滋养源,脉络膜外壳着色很重,因此有

助于减少进入眼内的外来光和眼球内的回射。脉络膜的最前面又分为睫状体和虹膜。睫状体的收缩和扩张控制着允许进入眼内的光亮。虹膜的中间开口处是瞳孔,它的直径是可变的,大约可由 2 mm 变到 8 mm,用以控制进入眼球内部的光通量;虹膜的前部含有明显的色素,而后部则含有黑色素。

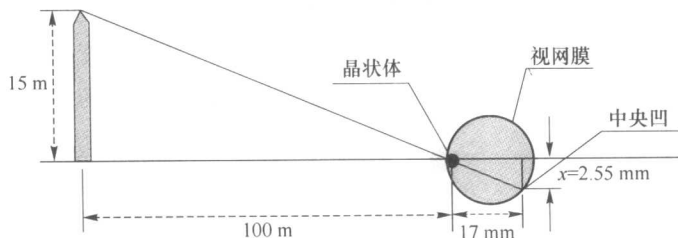


图 1.3 人眼截面示意图

眼睛最里层的膜是视网膜,布满在整个眼球后部的内壁上,当眼球适当聚焦,从眼睛的外部物体来的光就在视网膜上成像。整个视网膜表面上分布的分离的光接收器造成了图案视觉。这种光接收器可分为 2 类:锥状体和杆状体。每只眼睛中锥状体的数目在 600~700 万之间,主要位于视网膜的中间部分,叫做中央凹,它对颜色很敏感。人们用这些锥状体能充分地识别图像的细节,因为每个锥状体都被接到其本身的神经的一端,控制眼睛的肌肉使眼球转动,从而使人所感兴趣物体的像落在视网膜的中央凹上。锥状视觉又叫做白昼视觉。

杆状体数目更多,约有 7 500 万到 1.5 亿个,分布在视网膜表面上,因为分布面积较大,并且几个杆状体接到一根神经的末端上,因此使接收器能够识别细节的量减少。杆状体用来给出视野中大体的图像,它没有色彩的感觉但对照明度的景物比较敏感。例如,在白天呈现鲜明颜色的物体,在月光之下却没有颜色,这是因为只有杆状体受到了刺激,而杆状体没有色彩的感觉,杆状视觉因此又叫做夜视觉。

眼睛中的晶状体与普通的光学透镜之间的主要区别在于前者的适应性强,如图 1.3 所示,晶状体前面的曲率半径大于后表面的曲率半径。晶状体的形状由睫状体韧带的张力控制。为了对远方的物体聚集,肌肉就使晶状体变得较厚。

当晶状体的折射能力由最小变到最大时,晶状体的聚集中心与视网膜之间的距离由 17 mm 缩小到 14 mm,当眼睛聚焦到远于 3 m 的物体时,晶状体的折射能力最弱;当聚焦到非常近的物体时,其折射能力最强。利用这一数据,将易于计算出任何物体在视网膜上形成的图像大小。

1.4.2 人类视觉特性

人眼除了处理一般的视觉功能外,还具有一些其他特性,了解这些特性,对图像信号的处理是很有用处的。

1. 亮度适应能力

当一个人从一个明亮的大厅步入一个较黑暗的房间后,开始感到一片漆黑,什么也看不清,但经过一段时间的适应就逐渐能够看清物体,这种适应能力称为暗光适应。同样,当从暗

的房屋步入明亮的大厅时,开始也是什么都看不清,但渐渐地又能分辨物体,这种适应能力称为亮光适应。亮光适应所需时间比暗光适应短的多,它仅需要 1~2 s,而暗光适应需 10~30 s。

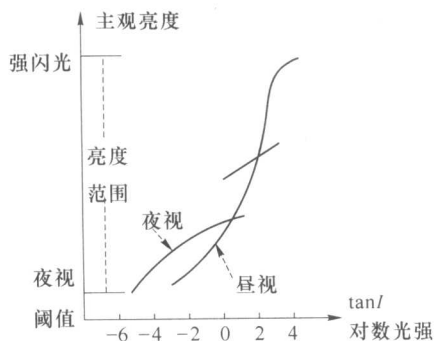


图 1.4 眼睛亮度的适应能力

人能适应亮度的范围是很宽的,由暗视阈值到强闪光之间的光强度差别约为 10^{10} 级。当然人的眼睛并不能同时适应这样宽的光强范围。一个人适应某一平均亮度时,能够同时鉴别出光强变化的范围要比这窄的多。图1.4中短交叉线说明了这种情况,在交叉点以上,主观感觉亮度与进入眼内的外界刺激光强并非成线性关系。图中还表明,在很大范围内,主观亮度与光强度的对数成线性关系。图中曲线的下部表明了白昼视觉的暗视觉的不同。

2. 同时对比度

由于人眼对亮度有很强的适应性,因此很难精确判断刺激的绝对亮度。即使有相同亮度的刺激,由于其背景亮度不同,人眼所感受的主观亮度是不一样的。图 1.5 可用来证明同时对比的刺激,图中小方块实际上有着相同的物理亮度,但因为与它们的背景强度相关很大,故它们的主观亮度显得大不一样,这种效应就叫做同时对比度。同时对比效应随着背景面积增大而显著,这种效应与后面要讨论的 Mach 带现象相类似,但是 Mach 带现象是对亮暗分界部分而言的,同时对比是由面积上亮度差产生的现象。

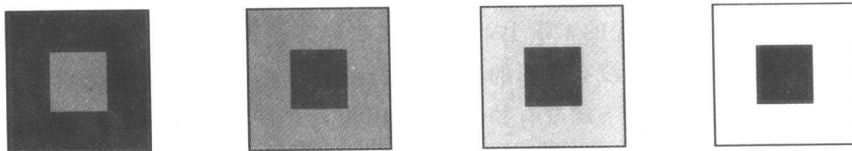


图 1.5 同时对比度示例

由于同时对比是由亮度差别引起,所以也可称为亮度对比。相应的还有色度对比,例如同样的灰色物体,背景为红时看起来带绿色;反过来,绿背景时看起来带红色。

3. 对比灵敏度

眼睛的对比灵敏度可以由实验测得。在均匀照度背景 I 上设有一照度为 $\Delta I + I$ 的光斑,如图 1.6 所示,眼睛刚能分辨出的照度差 ΔI 是 I 的函数,当背景照度 I 增大时,能够分辨出光斑的 ΔI 也需要增大,在相当宽的强度范围内 $\Delta I/I$ 的数值为一常数,约等于 0.02。这个比值称为韦伯(Weber)比。但是在亮度很强或很弱时,这个比值就不再保持为常数。

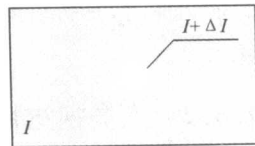


图 1.6 对比灵敏度的测定

4. 分辨率

对于空间上或者时间上两相邻的视觉信号,人们刚能鉴别出二者存在的能力称为视觉系统的分辨率。这一特性显然与视网膜上单位面积内分布的视细胞数有关。如果把视网膜看成由许多感光单元镶嵌在其上的视细胞镶嵌板,则单位面积内感光单元的减少,对图像的

分辨能力也随之减少。

分辨率可用视觉锐度或调制传递函数表示,前者表示能够鉴别最小空间模式的一种测度,后者表示视觉对不同频率的正弦光栅刚能鉴别所要求的信号对比度。这两种测度实际上是相互补充的。第①种定义在空间域,第②种则定义在相应的频率域。

最为常见的是1种由①组黑白相间的线条组成的测试卡。其中1条白线和1条同样宽度的黑线组成1线对,当线对的宽度越来越窄,直到眼睛不能区分黑白线时,就用1mm内的线对数定义分辨率。当然也可用刚能辨别出的试验模式视角的倒数 $1/\alpha$ 定义锐度,这里 α 以分为单位。

当照度太低时,只有杆状细胞起作用,故分辨率很低。当照度增加时分辨率增加。但当照度太强时,背景亮度和物体亮度相接近。此时,受抑制作用,分辨率反而又降低。分辨率还与刺激位置有关。当刺激落在中央凹时分辨率最高,在中央凹的四周分辨率迅速下降,在这之外则缓慢减小。而在视网膜的四周分辨率最低。

调制传递函数(MTF)是另一种表示分辨率的测度,它是导出单色视觉模型的依据。如果把人眼看成一个精密的光学系统,那么可用分析光学系统的方法研究人的视觉特性。令输入图像的强度是沿水平方向按正弦方式变化的线栅。测试视觉MTF的过程是给观察者在一定距离处观看2张变化的正弦光栅,一张图片作为参考图,其对比度和空间频率是固定的;另一张是测试图片,它的对比度和空间频率是可变的。测试图片在一定的空间频率下改变其对比度,直到观察者对2张图片的亮度感觉相同为止,然后测试图换一频率,重复以上步骤。这样就得到视觉的MTF。采用其他试验方法也可得到类似的结果,如图1.7所示。从图中可以看出,MTF具有带通滤波特性,它的最灵敏空间频率在2~5 Hz的范围内。

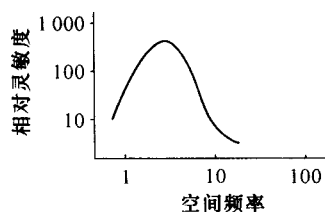


图 1.7 调制传递函数 MTF 的特性

实验还发现,当输入信号的对比度改变时,系统的 MTF 也会变化。而且当输入光栅相对于人眼的光轴旋转后,系统的 MTF 也有所变化。因此可以断言,人的视觉系统是非线性和各向异性的。

5. Mach 带

人们在观察一条由均匀黑和均匀白的区域形成的边界时,可能会认为人的主观感受是与任一点的强度有关的。但实际情况并不是这样,人感觉到的是在亮度变化部位附近的暗区和亮区中分别存在一条更黑和更亮的条带,这就是所谓的 Mach 带,如图 1.8 所示。Mach 在 1865 年观察并讨论了这种现象。当亮度为阶跃变化时,图像中显示出竖条灰度梯级图像。主观亮度中增加了一个分量,它相当于对原图进行了二阶导数的操作。这是因为在阶跃边界处主观的反差显著地增强了。

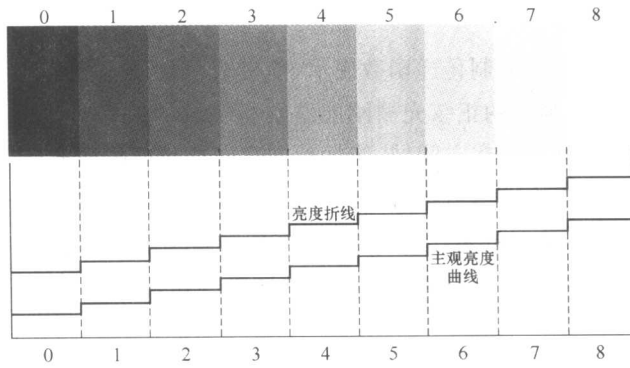


图 1.8 Mach 带效应示意图

1.5 图像质量的评价方法

图像质量的评价研究是图像信息学科的基础研究之一。对于图像处理或者图像通信系统,其信息的主体是图像,衡量这个系统的重要指标,就是图像的质量。例如在图像编码中,就是在保持被编码图像一定质量的前提下,以尽量少的码字表示图像,以便节省信道和存储容量。而图像增强就是为了改善图像的主体视觉显示质量。再如图像复原,则用于补偿图像的降质,使复原后的图像尽可能接近原始图像质量。所有这些都要求有一个合理的图像质量评价方法。

图像质量的含义包括 2 方面,一个是图像的逼真度,即被评价图像与原标准图像的偏离程度;另一个是图像的可懂度,是指图像能向人或机器提供信息的能力。尽管最理想的情况是能够找出图像逼真度和图像可懂度的定量描述方法,以作为评价图像和设计图像系统的依据。但是由于目前对人的视觉系统性质还没有充分理解,对人的心理因素还找不出定量描述方法,因而用得较多、最具权威性的还是所谓主观评价方法。

1. 图像的主观评价

图像的主观评价就是通过人来观察图像,对图像的优劣作主观评定,然后对评分进行统计平均,得出评价的结果。这时评价出的图像质量与观察者的特性及观察条件等因素有关。为保证主观评价在统计上有意义,选择观察者时既要考虑有未受过训练的“外行”观察者,又要考虑有对图像技术有一定经验的“内行”观察者。另外,参加评分的观察者至少要 20 名,测试条件应尽可能使用条件相匹配。表 1.2 是几个国家和地区所采用过的对电视图像评价的观察条件。

表 1.2 图像质量主观评价的观察条件

| 观察条件 | 英国 | 欧洲 | 德国 | 日本 | 美国 | 推荐值 |
|---------------------------|------|-------|------|--------|--------------------|-------------------|
| 最高亮度/(cd/m ²) | 50 | 41~54 | 50 | 400 | 70 | 50 ^[注] |
| 管面亮度/(cd/m ²) | <0.5 | 0.5 | <0.5 | 5 | 2 | <0.5 |
| 背景亮度/(cd/m ²) | 1 | / | 2.5 | / | / | / |
| 室内照度/lx | 3 | / | / | 30~100 | 6.5 ^[注] | / |
| 对比度 | / | / | / | 30 | / | / |
| 视距/画面高 | 6 | 4~6 | 6 | 8 | 6~8 | 6 |

注:只对 50 场/s 而言。

在图像质量的主观评价方法中又分为2种评价计分方法,就是国际上通行的5级评分的质量尺度和妨碍尺度,如表1.3所示。它是由观察者根据自己的经验,对被评价图像作出质量判断。在有些情况下,也可以提供一组标准图像作为参考,帮助观察者对图像质量作出适合的评价。一般来说,对非专业人员多采用质量尺度,对专业人员则使用妨碍尺度为宜。

表 1.3 2种尺度的图像5级评分

| 尺度 | | 得分 | 尺度 | | 得分 |
|------|--------|----|------|-----|----|
| 妨碍尺度 | 无觉察 | 5 | 质量尺度 | 非常好 | 5 |
| | 刚觉察 | 4 | | 好 | 4 |
| | 觉察但不讨厌 | 3 | | 一般 | 3 |
| | 讨厌 | 2 | | 差 | 2 |
| | 难以观看 | 1 | | 非常差 | 1 |

2. 图像的客观评价

尽管主观质量的评价是最权威的方式,但是在一些研究场合,或者由于试验条件的限制,也希望对图像质量有一个定量的客观描述。图像质量的客观评价由于着眼点不同而有多重方法,这里介绍的是一种经常使用的所谓的逼真度测量。对于彩色图像逼真度的定量表示是一个十分复杂的问题。目前应用得较多的是对黑白图像逼真度的定量表示。合理的测量方法应与主观实验结果一致,而且要求简单易行。

对于连续图像场合,设 $f(x, y)$ 为一定义在矩形区域 $-L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq L_y$ 的连续图像,其降质图像为 $\hat{f}(x, y)$,它们之间的逼真度可用归一化的互相关函数 K 来表示

$$K = \frac{\int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x, y) \hat{f}(x, y) dx dy}{\int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f^2(x, y) dx dy} \quad (1.5.1)$$

对于数字图像场合,设 $f(j, k)$ 为原参考图像, $\hat{f}(j, k)$ 为其降质图像,逼真度可定义为归一化的均方误差值(NMSE) N 为

$$N = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \{Q[f(j, k)] - Q[\hat{f}(j, k)]\}^2}{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \{Q[f(j, k)]\}^2} \quad (1.5.2)$$

式中,运算符 $Q[\cdot]$ 表示在计算逼真度前,为使测量值与主观评价的结果一致而进行的某种预处理,如对数处理、幂处理等,常用的 $Q[\cdot] = K_1 \log_b [K_2 + K_3 f(j, k)]$,其中 K_1 、 K_2 、 K_3 、 b 均为常数。

另外一种常用的为峰值均方误差(PMSE) P 为

$$P = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} \{Q[f(j, k)] - Q[\hat{f}(j, k)]\}^2}{MNA^2} \quad (1.5.3)$$

式中, A 为 $Q[f(j, k)]$ 的最大值。实用中还常采用简单的形式 $Q[f] = f$ 。此时,对于 8 bit