

第一章 绪 论

图像作为一种重要的信息载体,越来越深刻地影响到人们的生活和工作。随着这些影响的发展深化,利用计算机对图像信息进行加工处理的数字图像处理技术也逐渐发展并得到广泛应用,已经成为现代信息处理的关键技术。本章介绍了数字图像处理的基本概念、研究内容和应用,分析了数字图像处理面临的问题,简要介绍了数字图像处理系统结构和常用图像处理仿真工具。

第一节 视觉与图像

视觉是人类观察世界和认知世界的重要手段,人类从外界获得的信息绝大部分是由视觉获取的。人的视觉系统十分完善,灵敏度高,作用距离远,传播速度快,加上大脑的思维和联想能力,使得视觉信息直观形象、信息量大,利用率高。

图像是视觉信息的重要表现方式,是对客观事物相似的、生动的描述,是光能量和人类大脑相结合的产物。从信息论角度来看,图像是一种二维信号,可以定义为二维函数 $f(x,y)$,其中, x,y 是空间坐标, $f(x,y)$ 是点 (x,y) 的幅值。

图像主要有两种类型:模拟图像和数字图像。

模拟图像是指通过客观的物理量表现颜色的图像,如照片、底片、印刷品、画等,空间坐标值 x 和 y 连续,在每个空间点 (x,y) 的光强也连续,无法用计算机处理。对模拟图像进行数字化得到数字图像,才可以用计算机存储和处理。

数字图像是具有离散值的二维矩形阵列,图像空间位置 (x,y) 和强度值 $f(x,y)$ 都被量化成离散的数值,能够存储在计算机存储器中,如图 1-1 所示。

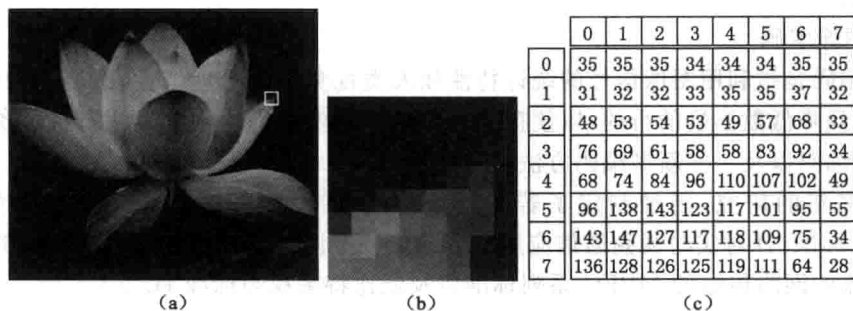


图 1-1 数字图像数据形式示意图

图 1-1(a)中白色方框内有 8 行 8 列 64 个像素点,每一点有不同的颜色值;图 1-1(b)用

8×8 个小方块表示这 64 个像素点,每个方块的颜色和对应像素点颜色一致;图 1-1(c)是对应 64 个像素点的数值(其具体含义见第二章)。可以看出,数字图像就是一个二维的像素矩阵。

第二节 数字图像处理

数字图像处理(Digital Image Processing)是利用计算机对图像进行去除噪声、增强、复原、分割、提取特征等的理论、方法和技术,是信号处理的子类,相关理论涉及通信、计算机、电子、数学、物理等多个方面,已经成为一门发展迅速的综合性学科。

一、数字图像处理的主要内容

(1) 图像获取

图像获取是指通过某些成像设备,将物体表面的反射光或者通过物体的折射光,转换成电压,在成像平面形成图像,通常需要经过模数转换实现数字图像的获取。

(2) 图像变换

图像变换是指对图像进行某种正交变换,将空域中的图像信息转换到如频域、时频域等变换域,并进行相应的处理分析。经过变换后,图像信息的表现形式发生变化,某些特征会突显出来,方便后续处理,如低通高通滤波、变换编码等。图像变换常用的正交变换有:离散傅立叶变换、离散余弦变换、哈达玛变换、离散小波变换等。

(3) 图像增强

图像增强目的是将一幅图像中的有用信息(即感兴趣信息)进行增强,同时将无用信息(即干扰信息或噪声)进行抑制,提高图像的可观察性。图像增强的主要方法有灰度变换、直方图增强、图像平滑等。

(4) 图像复原

图像复原目的是将退化了的图像以及模糊了的图像的原有信息进行复原,达到清晰化目的。图像复原是图像退化的逆过程,是将图像退化的过程加以估计,建立退化的数学模型后,补偿退化过程造成的失真。根据退化模糊产生原因不同,采用不同图像复原方法可使图像变得清晰。

(5) 图像编码

图像编码是指利用图像信号的统计特性和人类视觉生理心理特性,改变图像信号的表示方式,达到降低数据量的目的,以便存储和传输。图像编码的主要方法有统计编码、变换编码、混合编码以及一些新型编码方法。

经过多年的研究,已经制定了若干图像编码标准:如针对静态图像编码的 JPEG、JPEG2000 标准;针对实时视频通信应用的 H. 26x 系列标准;针对视频数据的存储、广播电视和视频流的网络传输的 MPEG 系列标准以及低比特率视频标准 H. 264。

(6) 图像分割

图像分割是指把一幅图像分成不同的区域,以便进一步分析或改变图像的表示方式。如卫星图像中分成工业区、住宅区、森林等;人脸检测中需要分割人脸等。由于图像内容的复杂性,利用计算机实现图像自动分割是图像处理中最困难的问题之一,没有一种分割系统

适用于所有问题,经验表明,实际应用中需要结合众多方法,根据具体的领域知识确定方案。

(7) 图像分析

图像分析是指分割出图像中的感兴趣目标,并提取其中的关键数据,以便计算机对图像进行识别和理解,是数字图像处理系统中不可缺少的环节。

二、数字图像处理技术的分类

数字图像处理技术一般有三个层次:图像处理、图像分析以及图像识别理解。

图像处理是指对输入图像进行变换,改善图像的视觉效果或增强某些特定信息,是从图像到图像的处理过程。这类处理技术有去噪、增强、锐化、色彩处理、复原等。

图像分析是指通过对图像中相关目标、内容进行检测和计算,获取某些客观信息,从而建立对图像的描述,以便对图像内容进行识别理解。图像分析是从图像到非图像(数据或符号)的处理过程,这类的处理技术包括图像分割、图像描述和分析等。

图像识别理解是指根据从图像中提取出的数据,利用模式识别的方法和理论,理解图像内容。

本书主要讲解图像处理和分析方面的相关技术、原理和方法。

三、数字图像处理的应用

数字图像处理技术诞生于20世纪50年代,随着计算机技术的发展,数字图像处理也逐渐形成了完整的体系,并成为新兴的学科。近几年来,数字图像处理技术在各个领域得到广泛应用,对工业生产、日常生活产生巨大的影响。典型的应用有下列几个方面:

(1) 航空航天

这方面的应用主要是在飞机遥感和卫星遥感技术中,主要用于地形地质、矿藏探查、森林、水利、海洋、农业等资源调查、自然灾害预测预报、环境污染监测、气象卫星云图处理以及地面军事目标的识别等。

(2) 工业生产

图像处理技术在产品检测、工业探伤、自动流水线生产和装配、自动焊接、PCB印制板检查以及各种危险场合的生产自动化得到大量应用,可以加快生产速度、保证质量的一致性,还可以避免因人的疲劳、注意力不集中等带来的误判。

(3) 生物医学

CT、核磁共振断层成像、超声成像、计算机辅助手术、显微医学操作等医学图像处理技术在医疗诊断中发挥了越来越重要的作用。

(4) 军事公安

图像处理技术也应用于巡航导弹制导、无人驾驶飞机飞行、自动行驶车辆、移动机器人、精确制导及自动巡航捕获目标和确定距离等方面,既可避免人的参与及由此带来的危险,也可提高精度和速度。此外,各种侦察照片的判读、公安业务图片的判读分析、指纹识别、人脸鉴别、不完整图片的复原、交通监控、事故分析等领域也利用图像处理技术拓展了刑侦手段。

(5) 文化娱乐

数字图像处理技术在电视、电影画面的数字编辑、动画的制作、电子图像游戏、纺织工艺品设计、服装设计、发型设计、文物资料照片的复制和修复、依据头骨的人像复原等方

面的应用中卓有成效,成为一种独特的美术工具,也给人们的生活带来巨大的视觉享受。

第三节 数字图像处理面临的问题

前面列举了不少图像处理的应用,但是,由于图像信号的特殊性,在实际应用中也面临着许多问题,真正实现起来受到许多的制约,需要我们在学习中加以注意。

(1) 图像的多义性

三维场景被投影为二维图像,深度和不可见部分的信息被丢失,因而会出现不同形状的三维物体投影在图像平面上产生相同图像的问题;同时不同视角获取同一物体的图像也会有很大的差异,导致获取的图像存在多义性。

图 1-2(a)中,B 的尺寸比 A 的尺寸大,但两个球投影到平面后大小相似。图 1-2(b)是很有名的双体女士照片,由于拍摄角度的问题,单从图像中很难判断伯德约翰逊夫人的头属于哪个身体,这些正是图像多义性的表现。

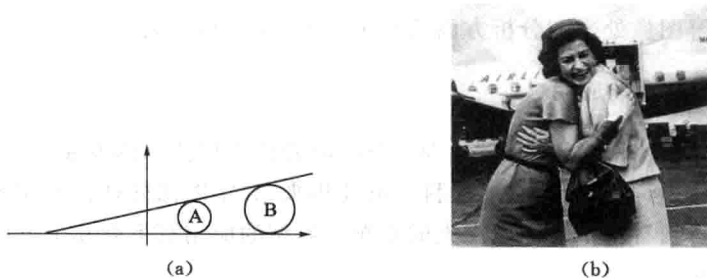


图 1-2 图像多义性示意图

(2) 环境因素的影响

图像受到场景中的诸多因素的影响,如照明、物体形状、表面颜色、摄像机以及空间关系变化等,任何一个因素发生变化时,在人类视觉看来还是同样的场景,但对计算机来讲,数据发生了很大的变化,进而会影响到数字图像处理的各个环节。如图 1-3 所示。



图 1-3 环境因素对图像的影响示意图

(3) 图像数据量大

图像信息数据量大,例如:一幅未压缩的 $1\ 024 \times 768$ 的真彩色 24 位图像,存储每一个像素点需 3 个字节(见第二章),总的大小为: $1\ 024 \times 768 \times 3 \text{ Byte} \approx 2.3 \text{ MB}$;如果处理的是图像序列,则数据量更大。巨大的数据量给存储、处理、传输带来了很大的问题。

研究人员致力于图像压缩技术的研究,目前已有多种很好的压缩方法以及压缩标准,经

过压缩后的图像在保证质量的同时大幅度降低了数据量,同时得益于计算机软硬件技术的发展,保证了图像的存储和传输。但是,随着图像技术应用越来越广泛,信息膨胀以及图像的大数据量对于图像处理的实时性要求依然是巨大的挑战。

第四节 数字图像处理系统

数字图像处理系统主要由三大部分组成:图像输入、图像处理分析和图像输出,如图 1-4 所示。

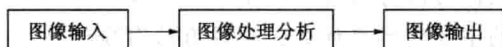


图 1-4 数字图像处理系统

图像输入部分,完成获取图像并进行数字输入功能。相关设备包括数码相机、数码摄像机、扫描仪、带照相和摄像功能的手机等。

图像处理分析模块,包括计算机、DSP 芯片等硬件设备以及通用或专用软件,用来完成各种各样的处理目的。

图像输出部分,包括显示输出、打印输出,也可以输出到 Internet 上的其他设备。

第五节 常用图像处理仿真工具

图像处理之前,先进行计算机模拟或仿真,将其中核心的算法进行验证、调试和优化。在仿真实验以后,将其结果再放到计算机平台或其他硬件平台运行调试。常用的图像处理仿真工具有 Matlab、OpenCV 等。

(1) Matlab

Matlab(Matrix Laboratory,矩阵实验室)是美国 Mathworks 公司于 1984 年推出的一套主要面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。具有编程简单直观、绘图功能强、用户界面友好、开放性等优点,配备功能强大、专业函数丰富的各类工具箱,如信号处理、小波、神经网络、控制系统工具箱等,在多个科学领域获得广泛应用。

Matlab 实现的是基于矩阵计算,适合作为二维矩阵的数字图像处理;认可当今常用的多种图像文件格式,提供图像处理工具箱,实现了图像运算、变换、增强、分析、复原、形态学等方面的图像处理运算,是一款优秀的仿真软件。

(2) OpenCV

OpenCV(Open Source Computer Vision Library)于 1999 年由 Intel 建立,如今由 Willow Garage 提供支持,是一个基于 BSD 许可证授权(开源)发行的跨平台计算机视觉库,可以运行在 Linux、Windows 和 Mac OS 操作系统上。它由一系列 C 函数和少量 C++类构成,同时提供了 Python、Ruby、Matlab 等语言的接口,实现了图像处理和计算机视觉方面的很多通用算法。

OpenCV 拥有包括 300 多个 C 函数的跨平台的中、高层 API。它不依赖于其他的外部

库——尽管也可以使用某些外部库。OpenCV 提供的视觉处理算法非常丰富,并且它部分以 C 语言编写,加上其开源的特性,处理得当,不需要添加新的外部支持也可以完整地编译链接生成执行程序,所以很多人用它来做算法的移植,OpenCV 的代码经过适当改写可以正常地运行在 DSP 系统和单片机系统中,这种移植在大学中经常作为相关专业本科生毕业设计或者研究生课题的选题。

习 题

- 1-1 什么是图像? 图像可以分成哪些类别? 有哪些特点?
- 1-2 数字图像处理的主要内容是什么? 主要方法有哪些?
- 1-3 分析数字图像处理系统的结构及其功能。
- 1-4 了解数字图像处理系统输入输出设备及其原理。
- 1-5 观看一个视频游戏、电视或电影片断,思考数字图像技术如何用于产生特殊视觉效果。

第二章 数字图像处理基础

数字图像处理是一门综合性的学科,相关知识牵涉到物理、数学、电子、信息处理等多个方面。因此,本章讲解与数字图像处理密切相关的基本概念、基础知识,主要包括人眼视觉特性、色度学基础、数字图像的生成与表示、数字图像的数值描述以及图像处理中常见的概念,以便更好地学习各种图像处理算法。

第一节 人眼视觉系统

许多图像处理技术的目的是改善图像的视觉质量,这常常需要利用人眼视觉系统的特性;而人眼视觉系统特点也往往给图像处理技术以启发,所以学习数字图像处理技术,首先需要对人眼视觉系统有一定的了解。本节对人眼视觉系统的基本构造、视觉过程和视觉特性进行介绍,为后续学习做必要的准备。

一、人眼基本构造

人的视觉系统由眼球、神经系统和大脑的视觉中枢构成,人的眼球的断面图如图 2-1 所示。

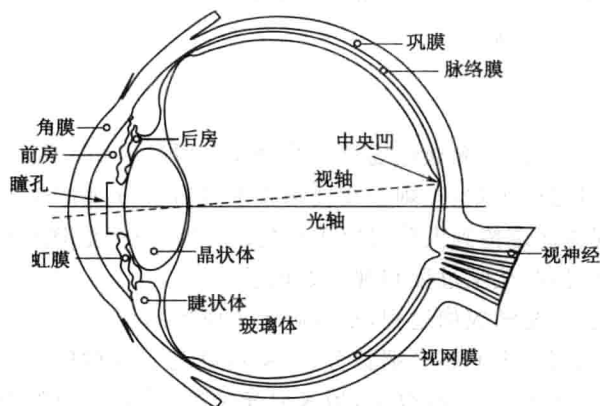


图 2-1 人眼断面图

眼睛直径约 24 mm,大部分眼球壁由三层膜组成,外层保护着眼的内部,前部称为角膜,后部称为巩膜;中层包括虹膜,睫状体和脉络膜,内层为视网膜。眼球内部主要有晶状体和玻璃体。虹膜中央的圆孔是瞳孔,控制进入眼睛内部的光通量。睫状体位于虹膜后,其内部有睫状肌,可以调节晶状体曲率。角膜和虹膜之间、虹膜和晶状体之间充满水样透明液

体,由睫状体产生,称为房水。

角膜、房水、晶状体、玻璃体是折射率不同的光学介质,属于屈光系统,作用是将不同远近的物体清晰地成像在视网膜上。

视网膜是人眼的感光系统,将光能转换并加工成神经冲动,经视神经传入大脑中的视觉中枢,从而产生视觉。视网膜由三层细胞组成,由外到内依此为感受细胞、双极细胞和神经节细胞,三层的每一层,均包含不止一类细胞。

视网膜第一层为感光细胞层,距离玻璃体最远,包括两种视细胞:锥体细胞和杆体细胞,是以它们的形状命名的。锥体细胞感光灵敏度低,分为三种,对入射的辐射有不同的频谱响应,是颜色视觉的基础。杆体细胞感光灵敏度高,分辨细节能力低,不感受颜色,仅提供视野的整体视像。

视网膜第二层为双极细胞层。双极细胞一端与视细胞连接,另一端与神经节细胞连接。一般情况下,每一个锥体细胞都与一个双极细胞连接,因此,在光亮条件下,每一锥体细胞能够清晰地分辨外界对象的细节。而几个杆体细胞只连接一个双极细胞,因此在黑暗条件下通过几个杆体细胞对外界微弱刺激起总和作用,能得到高的感光灵敏度。

视网膜第三层是神经节细胞层,距离玻璃体最近,主要含有神经节细胞,与视神经连接,视神经穿过眼球后壁进入脑内的视觉中枢。

光线由角膜进入眼球到达视网膜,先通过视网膜的第三层和第二层,最后才到达锥体细胞和杆体细胞。

位于视网膜中央部位,有一个呈黄色的锥体细胞密集区,直径约 $2\sim 3$ mm,称为黄斑。黄斑中央有一凹窝,称为中央凹,是视觉最敏锐的地方,锥体细胞的密度在中央凹处最大。在视网膜中央的黄斑部位和中央凹大约 3° 视角范围内主要是锥体细胞,几乎没有杆体细胞;由里向外锥体细胞急剧减少,而杆体细胞逐渐增多。在距离中央凹 20° 的地方,杆体细胞的数量最大。在距中央凹约4 mm的鼻侧,为视神经纤维以及视网膜中央动、静脉所通过,此处没有视细胞,称为盲点。

二、视觉过程

视觉过程从光源发光开始,光通过场景中的物体反射进入作为视觉感官的左右眼睛,并同时作用在视网膜上引起视感觉,光刺激在视网膜上经神经处理产生的神经冲动沿视神经纤维传出眼睛,通过视觉通道传到大脑皮层进行处理,并最终引起视知觉。整个视觉过程可以分为三个过程:光学过程、化学过程和神经处理过程。

光学过程由人眼实现光学成像过程,基本确定了成像的尺寸。

化学过程与人眼视网膜中的感光细胞有关,基本确定了成像的亮度或颜色。锥体细胞和杆体细胞均由色素分子组成,可吸收光,当入射光增加,受到照射的视网膜细胞数量也增加,色素的化学反应增强,从而产生更强的神经元信号。

神经处理过程是在大脑神经系统里进行的转换过程。每个视网膜接受单元都与一个神经元细胞借助突触相连,每个神经元细胞借助于其他的突触与其他细胞连接,从而构成光神经网络。光神经进一步与大脑中的侧区域连接,并到达大脑中的纹状皮层,在那里,对光刺激产生的响应经过一系列处理,最终形成关于场景的表象,进而将对光的感觉转化为对景物的知觉。

人眼在观察景物时,从物体反射光到光信号传入大脑神经,经过屈光、感光、传输、处理

等一系列过程,从而产生物体大小、形状、亮度、颜色、运动、立体等感觉。

三、明暗视觉

(1) 人眼的亮度适应

亮度是视觉中最基本的信息。人的视觉系统有很大的亮度适应范围,在照度为 10^5 lx 的直射日光下和照度为 0.000 3 lx 的夜晚都能看到物体[lux,勒克司,法定符号 lx,照度单位,为距离一个光强为 1 cd(坎德拉)的光源,在 1 m 处接受的照明强度]。但人眼并不能同时在这么大范围内工作,是靠改变它的具体敏感度来实现亮度适应的:一是通过改变瞳孔大小来调节光量,调节范围 10~20 倍;二是通过明暗视觉转换来适应。

在光亮条件下,即亮度 3 cd/m^2 以上时(亮度分界点有不同说法,此处不做详细讨论),人眼的锥体细胞起作用,称为明视觉。当亮度达到 10 cd/m^2 以上时可以认为完全是锥体细胞起作用。在暗条件下,亮度达到 0.001 cd/m^2 以下时,人眼的杆体细胞起作用,称为暗视觉。杆体细胞能感受微光的刺激,但不能分辨颜色和细节。在明视觉和暗视觉之间的亮度水平下,称为中间视觉,锥体细胞和杆体细胞共同起作用。

亮度适应包括暗适应和明适应,使得眼能够在极宽的光照范围内(10^{10} 量级)工作。暗适应是指眼睛从亮处进入暗处时,一开始几乎看不见任何物体,一段时间内逐渐恢复视觉的现象。暗适应过程中人眼瞳孔放大,以增加射入眼内的光能;人眼由锥体细胞起作用转变成杆体细胞起作用。明适应则是指从暗处进入亮处,感觉光线刺眼,一段时间后恢复正常的现象。在明适应时间段内,瞳孔缩小,以减少射入眼内的光能;同时人眼由杆体细胞起作用转变为锥体细胞起作用。如夜晚在室内突然开关灯,眼睛要经过调节才能适应。

(2) 马赫带效应和同时对比度

亮度是一种外界辐射的物理量在视觉中反映出来的心理物理量,感觉亮度(主观亮度)与实际亮度之间呈非线性关系。这种非线性关系在马赫效应和同时对比度中有所体现。

马赫带效应:如图 2-2 所示,左边最上面的图是两块亮度不同的区域,实际亮度如中间图所示,在两块区域边界处亮度突变,但感觉在亮度变化的边界附近的暗区和亮区中分别存在一条更黑和更亮的条带,称为马赫(Mach)带。右边是多个不同亮度块,每个边界处都有很明显的马赫效应。

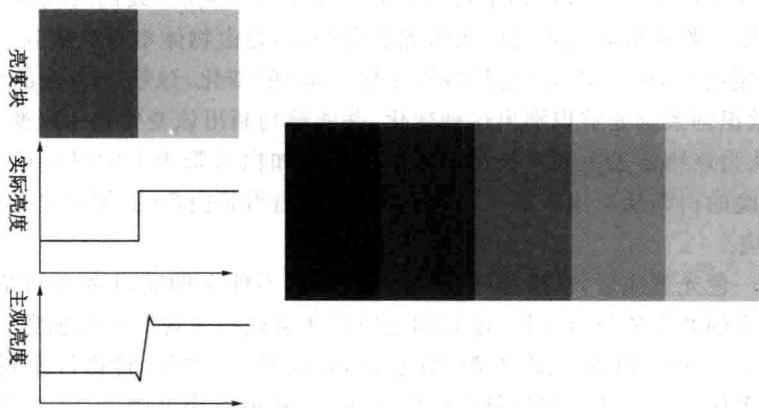


图 2-2 马赫带效应

同时对比度:如图 2-3 所示,四个相同亮度的小方块,放在不同亮度的背景下,感觉小方块亮度不一样,暗背景下的小方块要亮一些,亮背景下的小方块反而要暗一些。

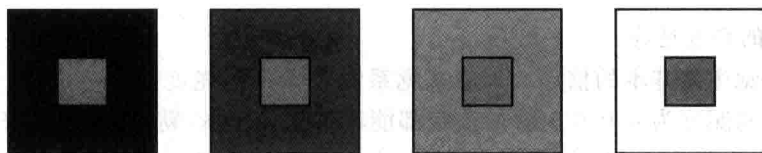


图 2-3 同时对比度

四、颜色视觉

(1) 光感受细胞与颜色

人眼除了对光有明暗亮度的分辨力外,还能分辨颜色。实验证明,人眼视网膜上含有三种不同类型的锥体细胞,三种锥体细胞中分别含有三种不同的视色素,具有不同的光谱敏感性。实验测得三种视色素的光谱吸收峰值分别在 440~450 nm、530~540 nm、560~570 nm 处,称这三种视色素为亲蓝、亲绿和亲红视色素。外界光辐射进入人眼时被三种锥体细胞按它们各自的吸收特性所吸收,细胞色素吸收光子后引起光化学反应,视色素被分解漂白,同时触发生物能,引起视神经活动。视色素的漂白程度以及产生的生物能的大小与此类锥体细胞吸收的光子数量有关,光子数越多,则漂白程度越高。人体对不同色彩的感觉,就是不同的光辐射对三种视色素不同程度的漂白的综合结果。人眼的明亮感觉是三种锥体细胞提供的亮度之和。实验证明杆体细胞只有一种,它含有视紫红色素,其光谱吸收峰值在 500 nm 左右,暗视觉条件下只有杆体细胞起作用,仅由视紫红色素吸收光子,所以暗视觉时不能分辨颜色,只有明亮感觉。杆体细胞中视紫红色素的合成需要维生素 A 的参与,所以缺乏维生素 A 的人常有夜盲症。

视网膜中央凹部位与边缘部位锥体细胞和杆体细胞的分布不同,由中央向边缘过渡,锥体细胞减少,杆体细胞增多,对颜色的分辨能力逐渐减弱,直到对颜色感觉消失。

(2) 颜色恒常性

颜色恒常性(Color Constancy)是指当外界条件发生变化后,人们对物体表面颜色的知觉仍然保持不变。物体的颜色不是由入射光决定的,而是由物体本身的吸收、反射属性决定的。某一个特定物体,由于环境(尤其特指光照环境)的变化,该物体表面的反射谱会有不同,人类的视觉识别系统能够识别出这种变化,并能够判断出该变化是由光照环境的变化而产生的,从而认为该物体表面颜色是恒定不变的。例如白天阳光下的煤块反射出来的光亮的绝对值比夜晚的白雪反射出来的还大,但仍然感觉白雪是白色的,煤块是黑色的。

(3) 色适应

人眼对某一色光适应后,观察另一物体的颜色时,不能立即获得客观的颜色印象,而是带有原适应色光的补色成分,经过一段时间适应后才会获得客观的颜色感觉,这就是色适应的过程。如图 2-4 所示:盯着左图中间的深色点,持续约 10 多秒,转移目光到白色背景,则看到右图所示图像。这一诱导出的补色时隐时现,直到最后完全消失,这就是色适应现象,其生理过程和亮度适应类似,当外界环境变化时,三种锥体细胞各自调节其灵敏度导致。

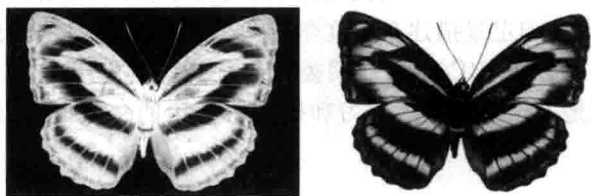


图 2-4 色适应示例

五、立体视觉

立体视觉是指从二维视网膜像中获得三维视觉空间,也就是获得物体的深度距离等信息。人类并没有专门用来感知距离的器官,对空间的感知一是依靠视力,二是借助于一些外部客观条件和自身机体内部条件。

人对空间场景的深度感知主要依靠双目视觉实现,每只眼睛的视网膜上各自形成一个独立的视像,由于双眼相距约 65 mm,两个视像相当于从不同角度观察,因而两眼视像不同,即双眼视差。双眼视差和物体的深度之间存在有一定的关系,从而可以感知距离,产生立体视觉。单目视觉也可以提供深度距离信息,刺激物本身的一些物理条件,通过观察者的经验和学习,在一定条件下也可以成为感知深度和距离的线索,如物体大小、照明变化、物体的遮挡等。

机体自身也可以提供一些感知深度信息的线索,如通过眼肌调节晶状体以在视网膜上获得清晰视像,这种调节活动提供了有关物体距离的信息;观看远近不同的物体时,两眼视轴要完成一定的辐合运动,将各自的中央凹对准物体,将物体映射到视网膜感受性最高的区域,控制视轴辐合的眼肌运动也能给大脑提供关于物体距离的信息。

立体视觉是数字图像处理的一个研究方面——机器视觉的重要研究内容,核心的研究思路就是仿照人类利用双目线索感知距离的方法实现对三维信息的感知,在实现上采用基于三角测量的方法,运用两个或多个摄像机对同一景物从不同位置成像,并进而从视差中恢复距离。

六、视觉暂留

人眼在观察景物时,光信号传入大脑神经,需经过一段短暂的时间,光的作用结束后,视觉形象并不立即消失,这种残留的视觉称“后像”,视觉的这一现象则被称为“视觉暂留”。

人眼对于不同频率的光有不同的暂留时间,主要是感光细胞中的色素反应需要一定时间导致的。视觉暂留是动态图像产生的原因,其具体应用是电影的拍摄和放映。

人眼视觉系统是一个很复杂的系统,除了能够产生明暗、颜色、立体等视觉信息,还可以感知形状、运动信息,甚至是产生视错觉,本节只是介绍了跟后续图像处理技术结合比较紧密的相关知识,要对人眼视觉系统更进一步的了解请参阅相关参考资料。

第二节 色度学基础与颜色模型

将颜色转变为数字量,必须解决它的定量度量问题,但是,颜色是光作用于人眼引起的

视觉特性,不是纯物理量,涉及观察者的视觉生理、视觉心理、照明条件、观察条件等许多问题。如何进行颜色的测量和定量描述是色度学的研究对象。学习图像处理,首先要了解颜色的相关知识,本节主要介绍 CIE(国际照明委员会)色度学的基础知识,主要包括颜色的表示和相关计算,较详细地介绍了在以后学习和研究中常用的一些概念、模型,为以后的图像处理打下基础。

一、颜色匹配

颜色匹配是指把两种颜色调节到视觉上相同或相等的过程,将观察者的颜色感觉数字化。在颜色匹配中,用于颜色混合以产生任意颜色的三种颜色叫做三原色,三原色中任何一种颜色不能由其余两种原色相加混合得到。通常相加混色中用红、绿、蓝三种颜色为三原色。

(1) 颜色匹配实验

颜色匹配实验是色度学中最基本的心理物理学实验。实验方法如图 2-5 所示。图的左方是一块白色屏幕,上下用一黑挡屏隔开,红、绿、蓝三原色光照射白色屏幕的上半部,待测色光照射白色屏幕的下半部,并通过小孔观察上下两种颜色。调节上方三原色光的强度,使混合色和待测色在视觉上相同,这种方法称为颜色匹配。所看到的视场如图 2-5 右下方所示。

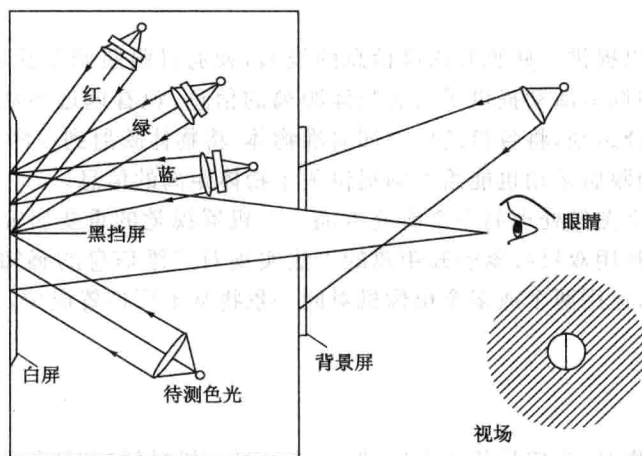


图 2-5 颜色匹配实验

视场的小孔内的颜色称为孔色,中间有分界线。当视场两部分光颜色相同时,分界线消失,认为待测光的光色与三原色的混合光色达到色匹配。视场外周一圈色光是背景,在视场两部分光色达到匹配后,改变背景光,两个颜色始终保持匹配(颜色匹配恒常律)。

(2) 三刺激值和色品图

颜色匹配实验中,当颜色匹配时,可用式(2-1)表示:

$$C(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (2-1)$$

式中,“ \equiv ”代表视觉上相等,即颜色相互匹配;(C)代表被匹配颜色单位,(R)、(G)、(B)代表产生混合色的红、绿、蓝三原色单位。C 代表被匹配色数量,R、G、B 分别代表三原色红、绿、

蓝数量,称为“三刺激值”。一种颜色与一组 RGB 值相对应,两种颜色只要 RGB 数值相同,颜色感觉就相同。

三原色各自在 $R+G+B$ 总量中的相对比例叫做色品坐标,用符号 r, g, b 来表示。

$$\begin{cases} r=R/(R+G+B) \\ g=G/(R+G+B) \\ b=B/(R+G+B) \end{cases} \quad (2-2)$$

由于 $r+g+b=1$,实质上只有两个独立量, $b=1-r-g$ 。

以色品坐标 r, g, b 表示的平面图称为色品图,如图 2-6 所示。三角形三个顶点对应于三原色(R)、(G)、(B),横坐标为 r ,纵坐标为 g 。标准白光(W)的三刺激值为 $R=G=B=1$,所以,它的色品坐标为 $r=g=1/3$ 。

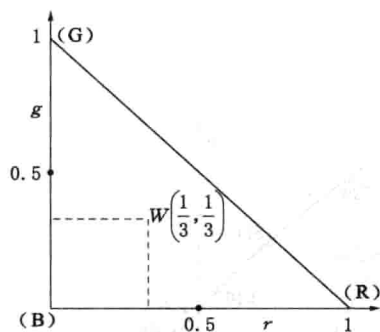


图 2-6 色品图

(3) 光谱三刺激值

在颜色匹配实验中,将待测色光设为某一种波长的单色光(亦称为光谱色),可得到对应于各种单色光的三刺激值。将各单色光的辐射能量值都保持为相同(称为等能光谱),所得到的三刺激值称为“光谱三刺激值”,即匹配等能光谱色的三原色数量,用符号 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 表示。光谱三刺激值又称为颜色匹配函数,其数值只决定于人眼的视觉特性。

任何颜色的光都可以看成是不同单色光混合而组成的,所以光谱三刺激值能作为颜色色度计算的基础。

二、CIE 1931- RGB 系统

颜色匹配方程和计算任一颜色三刺激值必须测得人眼的光谱三刺激值,将辐射光谱与人眼颜色特性相联。实验证明不同观察者视觉特性有差异,但对正常颜色视觉的人差异不大,故可根据一些观察者的颜色匹配实验,确定一组匹配等能光谱色的三原色数据——“标准色度观察三刺激值”。

由于选用的三原色不同及确定三刺激值单位的方法不一致,因而数据无法统一。

CIE 综合了莱特(W. D. Wright)和吉尔德(J. Guild)颜色匹配实验结果,选择波长为 700 nm(R)、546.1 nm(G)、435.8 nm(B)的三种单色光作为三原色,以相等数量的三原色刺激值匹配出等能白光(E 光源),来确定三刺激值单位。700 nm 是可见光谱的红色末端,546.1 nm 和 435.8 nm 为明显的汞谱线,三者都能比较精确地产生出来。经实验和计算确

定,匹配等能白光的(R)、(G)、(B)三原色单位的亮度比率为 1.000 0 : 4.590 7 : 0.060 1, 辐亮度比率为 72.096 2 : 1.379 1 : 1.000 0。

1931年,CIE定出匹配等能光谱色的RGB三刺激值,用 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$ 表示,称为“CIE 1931—RGB系统标准色度观察者光谱三刺激值”,简称“CIE 1931—RGB系统标准色度观察者”,代表人眼 2° 视场的平均颜色视觉特性,这一系统称为“CIE 1931—RGB色度系统”,如图2-7所示。在色品图中偏马蹄形曲线是所有光谱色色品点连接起来的轨迹,称为光谱轨迹。

光谱三刺激值与光谱色色品坐标的关系为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \\ g &= \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \end{aligned} \quad (2-3)$$

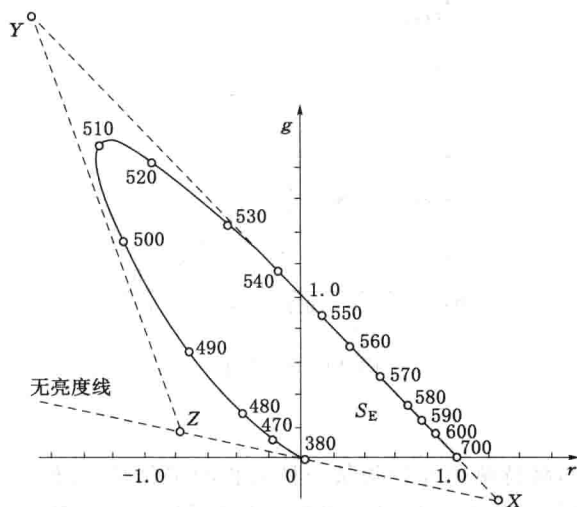


图 2-7 CIE 1931—RGB 系统色品图及(R)、(G)、(B)向(X)、(Y)、(Z)的转换

从图 2-7 可以看出,光谱三刺激值和光谱轨迹的色品坐标有很大一部分出现负值。其物理意义可从匹配实验的过程中来理解。当投射到半视场的某些光谱色,用另一半视场的三原色来匹配时,不管三原色如何调节都不能使两视场颜色达到匹配,只有在光谱色半视场内加入适量的原色之一才能达到匹配,加在光谱色半视场的原色用负值表示,于是出现负色品坐标值。色品图的三角形顶点表示红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色;负值的色品坐标落在原色三角形之外;在原色三角形以内的各色品点的坐标为正值。

三、CIE 1931 标准色度系统

CIE 1931—RGB 系统是从实验得出的,可用于色度学计算,但计算中会出现负值,用起来不方便,又不易理解,故 1931 年 CIE 推荐了一个新的国际通用的色度系统:CIE 1931—XYZ 系统,由 CIE 1931—RGB 系统推导来,其匹配等能光谱的三刺激值定名为“CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值”,简称为“CIE 1931 标准色度观察者”。

CIE 1931—XYZ 系统用三个假想的原色(X)、(Y)、(Z)建立了一个新的色度系统,系统

中光谱三刺激值全为正值。因此选择三原色时,必须使三原色所形成的颜色三角形能包括整个光谱轨迹。即整个光谱轨迹完全落在 X, Y, Z 所形成的虚线三角形内。

CIE1931 标准色度观察者的色品图是马蹄形的,假想的三原色(X)为红原色,(Y)为绿原色,(Z)为蓝原色。它们都落在光谱轨迹的外面,在光谱外面的所有颜色都是物理上不能实现的。光谱轨迹曲线以及连接光谱两端点的直线所构成的马蹄形内包括了一切物理上能实现的颜色。

RGB 系统向 XYZ 系统推导的过程就是假想三角形 XYZ 三条边 XY、XZ、YZ 方程确定的过程。如图 2-7 所示。

(1) XZ 线方程

规定 X, Z 两原色只代表色度,没有亮度,光度量只与三刺激值 Y 成比例。 XZ 线称为无亮度线,它在 $r-g$ 色品图上的方程应满足零亮度线的条件。

(R)、(G)、(B)三原色的相对亮度比为 $1.000\ 0 : 4.590\ 7 : 0.060\ 1$,假设在色品图上某一颜色的色品坐标为 r, g, b ,则它的亮度方程可写成:

$$l(C) = r + 4.590\ 7g + 0.060\ 1b \quad \text{且 } r + g + b = 1$$

如果颜色在无亮度线上 XZ 上,则 $l(C) = 0$,整理后得 XZ 线的方程为:

$$0.939\ 9r + 4.530\ 6g + 0.060\ 1 = 0 \quad (2-4)$$

(2) XY 线方程

光谱轨迹从 $540\ \text{nm}$ 附近至 $700\ \text{nm}$,在 RGB 色品图上基本是一段直线,用这段线上的两个颜色可混合得到两色之间的各种光谱色,新的 XYZ 三角形的 XY 边应与这段直线重合,在这段线上光谱轨迹只涉及(X)原色和(Y)原色的变化,不涉及(Z)原色。XY 边的方程为:

$$r + 0.99g - 1 = 0 \quad (2-5)$$

(3) YZ 线方程

YZ 边取与光谱轨迹波长 $503\ \text{nm}$ 点相切的直线,其方程为

$$1.45r + 0.55g + 1 = 0 \quad (2-6)$$

(4) 三原色 X, Y, Z 在 RGB 系统中的坐标

求 XY、YZ、XZ 三条直线的交点,得到三原色 X, Y, Z 在 RGB 色品系统中的坐标:

$$(X): r = 1.275\ 0, g = -0.277\ 8, b = 0.002\ 8$$

$$(Y): r = -1.739\ 2, g = 2.767\ 1, b = -0.027\ 9$$

$$(Z): r = -0.743\ 1, g = 0.140\ 9, b = 1.602\ 2$$

在 $x-y$ 图中的坐标是:

$$(X): x = 1, y = 0, z = 0$$

$$(Y): x = 0, y = 1, z = 0$$

$$(Z): x = 0, y = 0, z = 1$$

(5) 标准白点

等能白点 E 在 $r-g$ 坐标系统内为: $r = g = 1/3$

在 $x-y$ 坐标系统内为: $x = y = 1/3$

(6) XYZ 系统和 RGB 系统三刺激值间的关系

通过两个色度系统的坐标转换可以得到任意一种颜色新旧三刺激值之间的关系,如式

(2-7)所示:

$$\begin{cases} X=2.7689R+1.7517G+1.1302B \\ Y=1.0000R+4.5907G+0.0601B \\ Z=0+0.0565G+5.5943B \end{cases} \quad (2-7)$$

颜色的色品坐标:

$$\begin{cases} x=X/(X+Y+Z) \\ y=Y/(X+Y+Z) \\ z=Z/(X+Y+Z) \end{cases} \quad (2-8)$$

CIE1931 $x-y$ 色品图如图2-8所示。色品图中心为白点(非彩色点),光谱轨迹上的点代表不同波长的光谱色,是饱和度最高的颜色,越接近色品图中心(白点),颜色的饱和度越低。围绕色品图中心不同的角度,颜色的色调不同。

图上的C和E代表的是CIE标准光源C和等能白光E,等能白光E点位于XYZ颜色三角形的中心处。图上越靠近C或E点的颜色饱和度越低。

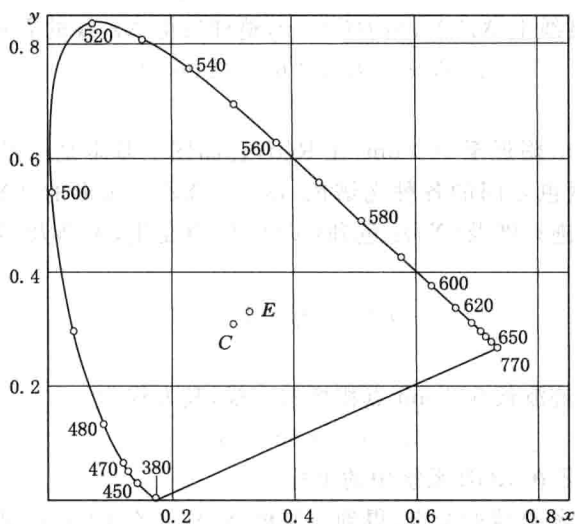


图 2-8 CIE 1931 $x-y$ 色品图

CIE 1931 标准色度观察者的数据适用于 2° 视场的中央视觉观察条件(视场在 $1^\circ\sim 4^\circ$ 范围内),主要是中央凹锥体细胞起作用。对极小面积的颜色观察不再有效;对于大于 4° 视场的观察面积,另有 10° 视场的“CIE 1964 补充标准色度观察者数据”,可参看相关资料。

四、CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 均匀颜色空间

标准色度系统解决了用数量来描述颜色的问题,但不能解决色差判别的问题,因此,CIE做了大量的工作,对人眼的辨色能力进行了研究,寻找到不同的均匀颜色空间。所谓均匀颜色空间,指的是一个三维空间,每个点代表一种颜色,空间中两点之间的距离代表两种颜色的色差,相等的距离代表相同的色差。

经过多年的研究和修改,1976年CIE推荐了两个色空间及有关的色差公式,分别称为

CIE 1976 $L^* u^* v^*$ 色空间和 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 色空间。CIE LUV 均匀色空间及色差公式主要应用于照明、CRT 和电视工业以及那些采用加法混合产生色彩的行业；CIE LAB 主要应用于颜料和图像艺术工业，近代的颜色数码成像标准和实际应用也是用 CIE LAB，因此，本小节主要介绍 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 均匀色空间及色差公式。

(1) CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 均匀色空间

CIE $L^* a^* b^*$ 均匀色空间示意如图 2-9 所示，其三维坐标如式(2-9)所示：

$$\begin{cases} L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{cases} \quad (2-9)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} f(\alpha) = (\alpha)^{\frac{1}{3}} & \alpha > \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\ f(\alpha) = \frac{841}{108}(\alpha) + \frac{16}{116} & \alpha \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \end{cases} \quad \alpha = \frac{X}{X_n}, \frac{Y}{Y_n}, \frac{Z}{Z_n}$$

其中，XYZ 为颜色的三刺激值； X_n, Y_n, Z_n 为指定的白色刺激的三刺激值，多数情况下为 CIE 标准照明体照射在完全漫反射体上，再经过完全漫反射面反射至观察者眼中的白色刺激的三刺激值，其中 $Y_n = 100$ 。

式(2-9)的逆运算如下：

$$\begin{cases} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \frac{L^* + 16}{116} \\ f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \frac{a^*}{500} + f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \\ f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \frac{b^*}{200} \end{cases} \quad (2-10)$$

$$\text{式中, } \begin{cases} \beta = \beta_n \left[f\left(\frac{\beta}{\beta_n}\right) \right]^3 & f\left(\frac{\beta}{\beta_n}\right) > \frac{24}{116} \\ \beta = \beta_n \left[f\left(\frac{\beta}{\beta_n}\right) - \frac{16}{116} \right] \cdot \frac{108}{841} & f\left(\frac{\beta}{\beta_n}\right) \leq \frac{24}{116} \end{cases} \quad \beta = X, Z$$

$$\begin{cases} Y = Y_n \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]^3 & f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) > \frac{24}{116} \quad \text{or} \quad L^* > 8 \\ Y = Y_n \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \frac{16}{116} \right] \cdot \frac{108}{841} & f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq \frac{24}{116} \quad \text{or} \quad L^* \leq 8 \end{cases}$$

(2) CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 色差公式

$$\begin{aligned} \Delta E_{ab}^* &= \left[(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (2-11)$$

式中， ΔE_{ab}^* 是两个颜色的色差， ΔL^* 称为明度差； Δa^* 称为红绿色品差（ a^* 轴为红绿轴）， Δb^* 称为黄蓝色品差（ b^* 轴为黄蓝轴）。

CIE 又定义了心理彩度 C^* 和心理色相角 H^* ，它们与心理明度 L^* 共同构成了与孟塞尔圆柱坐标相对应的心理明度（ L^* ）彩度（ C^* ）和色相角（ H^* ）圆柱坐标体系。计算方法