



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字图像通信

DIANG TONGXIN

主 编 何小海
副主编 杨晓敏



四川大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字图像通信

SHUZI TUXIANG TONGXIN

主 编 何小海

副主编 杨晓敏



四川大学出版社

责任编辑:周树琴
责任校对:王 平
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

数字图像通信 / 何小海等编著. —成都: 四川大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5614-4976-9

I. ①数… II. ①何… III. ①数字通信: 图像通信
IV. ①TN919. 85

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 166688 号

内容简介

本书系统全面地介绍了数字图像通信领域的基本理论和技术, 在重点把握基本知识的基础上, 同时反映了相关领域近年来的最新研究成果。

全书共分为九章, 涵盖了数字图像压缩编码的基本理论、先进技术, 如: 熵编码、预测编码、变换编码、矢量量化编码、运动估计、基于内容的视频编码、小波变换编码、分形编码等; 分析了图像压缩编码的相关标准, 如: JPEG、JPEG2000、MPEG-1、MPEG-4、H. 264、AVS 等; 还介绍了图像传输相关技术和图像通信应用系统。

本书注重基本理论、基本方法的讲述, 同时把握数字图像通信领域目前新的发展方向。书中图文并茂, 内容丰富新颖。讲述过程中由浅入深逐步展开, 并强调理论联系实际。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 适合作为通信与信息类、计算机类等相关专业本科生教学和研究生教学的教材或参考书, 也可供从事图像处理、图像通信、数字电视、数字通信等领域的科技人员参考。

书名 数字图像通信

编 著	何小海 等
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5614-4976-9
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	23
字 数	560 千字
版 次	2010 年 8 月第 1 版
印 次	2010 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0 001~2 000 册
定 价	42.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。电 话: 85408408/85401670/85408023 邮政编码: 610065

◆本社图书如有印装质量问题, 请寄回出版社调换。

◆网址: www.scupress.com.cn

前 言

近年来,数字图像的压缩编码和通信的应用越来越广泛,如可视电话、VOD、视频会议、基于IP的视频服务、数字图像监控、数字电视等。目前,图像、视频编码的研究已经从早期的重点面向存储转为了更多面向传输,人们所关心的问题不仅限于数据的压缩率、重建质量等指标,还需要研究在嵌入式系统中的实现、传输中的差错控制、各种信道上的特性分析等等。

当前,很多研究机构都在数字图像通信相关方面开展研究和开发工作;许多高校都开设了图像通信方面的课程。为了适应目前理论和技术的发展,需要改进教材的内容。在四川大学和四川大学电子信息学院的大力支持下,我们启动了教材的改进工作。与此同时,该教材选题也入选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在我们多年的教学工作及编写的讲义、教材的基础上,通过参考大量文献、专著,结合我们开展的科研工作,完成了本书的编写。

本书系统地介绍了数字图像通信的基本理论和方法,全书共分九章,主要为数字图像压缩编码理论与技术、数字图像传输及数字图像通信应用系统两个部分。其中重点在于介绍静止图像和序列图像编码的基本原理、算法和相关国际标准。在第一部分中介绍了图像编码的基本理论和技术,包括熵编码、预测编码、变换编码、运动估计、基于内容的编码、小波变换编码、分形编码等内容,并较为详细地讨论了JPEG、JPEG2000、MPEG-1、MPEG-4、H.264等国际编码标准及其实现过程;第二部分介绍了图像的传输信道、图像通信质量控制、基于网络的数字视频传输协议,还介绍了图像通信应用系统,如数字电视、流媒体技术、IPTV、数字监控等。

本书注重基础理论、基本技术的讲述,让读者通过本书的阅读,对数字图像通信中的信源编码、传输信道、应用系统等有全面的了解和把握;但同时又注意选材的深度和广度,还列举了大量的实例,并介绍了目前新的发展方向。

参加本书编写工作的主要人员有何小海、杨晓敏、吴晓红、吴炜、余艳梅、卿粼波、滕奇志等同志,通过大家集体讨论、分工编写、交叉修改后完成。本书分别由何小海、杨晓敏担任主编和副主编,负责大纲拟定、组织编著和统稿工作。另外,王正勇、陶青川等同志参加了前期的工作,研究生侯晨娟、鄢欣萌、徐萍、王林参加了部分文字整理工作,还有多位研究生参加了程序调试、图表制作等工作,在此一并致谢。

四川大学电子信息学院的陶德元教授对本书的写作给予了大力支持,他全面地审阅了本书的初稿,提出了大量的改进意见和建议,在此表示感谢。在本书的出版过程中,得到了四川大学出版社及周树琴等老师的诸多帮助,借本书出版之际,表示衷心的感谢!

在本书的编写过程中,我们参考了大量的文献、书籍、资料及相关网站上的信息,在本

书的参考文献中已经尽量列出，但由于写作过程较长，同时有些通过网络上查找的资料和文献，没有详细的原始出处，可能会遗漏一些文献和资料，在此表示歉意。对这些作者、研究人员的辛勤工作致以由衷的敬意，并请直接与我们联系。

我们的编写工作虽数易其稿，但时间还是较为紧张，同时作者学识水平有限，所以书中错漏之处难免，恳请读者不吝指教。作者电子信箱：nic5602@scu.edu.cn。

编 者

2010年5月于四川大学

目 录

第 1 章 图像及图像通信	(1)
1.1 图像信号的基本概念	(1)
1.1.1 图像信号的分类	(1)
1.1.2 彩色基础及模型	(2)
1.1.3 图像信号的表示	(7)
1.2 人眼视觉特性	(8)
1.2.1 相对视敏度	(8)
1.2.2 明暗视觉	(9)
1.2.3 对比灵敏度	(9)
1.2.4 分辨率	(10)
1.2.5 可见度阈值	(10)
1.3 图像质量的评估标准与方法	(11)
1.3.1 主观评价	(11)
1.3.2 客观测量	(12)
1.4 图像通信系统	(13)
1.4.1 模拟图像通信系统	(14)
1.4.2 数字图像通信系统	(14)
习题 1	(14)
第 2 章 图像信号的分析与变换	(15)
2.1 图像信号的数字化	(15)
2.1.1 采样	(16)
2.1.2 量化	(18)
2.1.3 视频信号的数字化表达	(21)
2.2 二维离散傅里叶变换	(24)
2.2.1 二维 DFT 的定义	(25)
2.2.2 二维 DFT 的性质	(25)
2.2.3 二维 DFT 的实现	(26)
2.3 离散余弦变换	(27)
2.3.1 一维 DCT	(27)
2.3.2 二维 DCT	(30)

2.4 离散 K-L 变换	(34)
2.4.1 协方差矩阵	(34)
2.4.2 K-L 变换关系	(35)
2.5 图像的统计特性	(37)
2.5.1 图像的自相关系数	(37)
2.5.2 图像差值信号的统计特性	(38)
2.5.3 图像的变换域统计特性	(39)
习题 2	(40)
第 3 章 数字图像压缩的基本理论	(42)
3.1 图像编码理论基础	(42)
3.1.1 图像压缩编码系统的基本结构	(42)
3.1.2 信源模型及其熵	(43)
3.1.3 无失真编码理论	(45)
3.1.4 有失真编码理论	(47)
3.2 统计编码	(50)
3.2.1 霍夫曼编码	(51)
3.2.2 香农编码	(53)
3.2.3 算术编码	(55)
3.2.4 LZW 编码	(65)
3.3 变换编码	(67)
3.3.1 正交变换编码原理	(68)
3.3.2 K-L 变换	(69)
3.3.3 离散余弦变换 (DCT)	(70)
3.4 线性预测编码	(70)
3.4.1 线性预测原理	(71)
3.4.2 最佳线性预测	(72)
3.5 矢量量化编码	(73)
3.5.1 编码方法	(73)
3.5.2 码书的设计	(74)
3.5.3 初始化码书	(80)
习题 3	(80)
第 4 章 静止图像编码	(83)
4.1 二值图像编码	(83)
4.1.1 行程长度编码	(84)
4.1.2 二值图像的方块编码	(85)
4.1.3 JBIG 标准简介	(86)
4.2 灰度图像编码	(87)

4.2.1 几种典型的灰度图像编码	(87)
4.2.2 渐进编码	(89)
4.3 JPEG 标准	(93)
4.3.1 概述	(93)
4.3.2 JPEG 标准的基本框架	(94)
4.3.3 基于 DCT 的编码过程	(96)
4.3.4 多分量图像	(104)
4.3.5 无损压缩	(105)
4.3.6 DCT 渐进模式	(105)
4.3.7 分级模式	(105)
4.4 基于分形的图像压缩编码	(106)
4.4.1 压缩映射	(107)
4.4.2 仿射变换	(108)
4.4.3 迭代函数系统	(108)
4.4.4 图像的分形编码方法	(109)
习题 4	(113)
第 5 章 图像的小波变换编码及 JPEG2000 标准	(115)
5.1 图像的小波变换	(115)
5.1.1 连续小波变换与反变换	(115)
5.1.2 多分辨率分析	(116)
5.1.3 一维离散小波变换与反变换	(120)
5.1.4 二维离散小波变换与反变换	(123)
5.2 提升小波变换	(126)
5.2.1 提升格式的基本原理	(127)
5.2.2 构造的提升方法	(130)
5.2.3 传统小波变换的提升实现	(131)
5.3 整数小波变换	(138)
5.4 小波变换编码	(142)
5.4.1 编码基本原理	(142)
5.4.2 小波图像系数的特点	(144)
5.4.3 小波变换编码的几个主要问题	(145)
5.5 基于小波变换的零树编码	(146)
5.5.1 嵌入式小波零树编码	(147)
5.5.2 SPIHT 算法	(155)
5.6 EBCOT 编码算法	(157)
5.6.1 概述	(157)
5.6.2 码流的可分级性	(158)
5.6.3 量化和逆量化	(159)

5.6.4	块编码	(162)
5.6.5	率失真优化	(171)
5.6.6	层的格式和表示	(171)
5.7	JPEG2000 标准	(172)
5.7.1	概述	(173)
5.7.2	JPEG2000 的基本框架	(174)
5.7.3	图像预处理	(175)
5.7.4	核心算法	(177)
5.7.5	码流格式	(179)
5.7.6	感兴趣区域	(180)
5.7.7	可伸缩性及容错性	(181)
习题 5		(183)
第 6 章	序列图像编码及运动估计	(185)
6.1	序列图像编码系统	(185)
6.1.1	视频图像压缩的必要性	(186)
6.1.2	视频图像编码系统的一般结构	(186)
6.1.3	视频编码方案分类	(187)
6.2	视频图像帧间预测编码	(189)
6.2.1	帧间图像预测编码的依据	(189)
6.2.2	基于预测的编码方法	(190)
6.2.3	运动补偿帧间预测编码	(191)
6.3	二维运动估计	(194)
6.3.1	二维运动估计的基本概念	(194)
6.3.2	基于块的运动估计——块匹配算法	(200)
6.3.3	基于像素的运动估计——像素递归方法	(211)
6.3.4	基于网格的运动估计	(212)
6.3.5	全局运动估计	(214)
6.3.6	基于区域的运动估计	(215)
6.4	基于波形的视频编码	(217)
6.4.1	三种常用视频帧	(217)
6.4.2	基于块的混合视频编码	(219)
6.4.3	编码参数选择	(221)
6.5	基于内容的视频编码	(222)
6.5.1	基于物体的视频编码	(223)
6.5.2	基于知识的视频编码	(226)
6.5.3	基于语义的视频编码	(227)
6.5.4	分层编码系统	(230)
习题 6		(230)

第7章 视频图像编码标准	(233)
7.1 视频编码标准简介	(234)
7.1.1 MPEG-x 系列标准	(234)
7.1.2 H.26x 系列标准概述	(237)
7.1.3 AVS 标准	(239)
7.1.4 视频编码标准的应用和性能比较	(241)
7.2 MPEG-1 视频编码和解码	(243)
7.2.1 MPEG-1 的系统结构	(243)
7.2.2 系统层	(244)
7.2.3 音频层	(244)
7.2.4 视频层	(245)
7.3 基于对象的视频编码标准 MPEG-4	(260)
7.3.1 MPEG-4 标准构成	(261)
7.3.2 MPEG-4 视频编码中的分层描述	(263)
7.3.3 MPEG-4 视频编码原理	(264)
7.3.4 应用情况	(271)
7.4 H.264/AVC 视频编码新技术	(272)
7.4.1 概述	(272)
7.4.2 H.264 的总体结构	(273)
7.4.3 H.264/AVC 视频编解码器结构	(276)
7.4.4 帧内预测编码	(277)
7.4.5 帧间预测	(280)
7.4.6 整数变换及量化	(282)
7.4.7 变换系数的扫描	(290)
7.4.8 环路滤波	(291)
7.4.9 熵编码	(292)
7.4.10 H.264 应用	(295)
习题 7	(296)
第8章 图像的传输技术	(297)
8.1 视频传输中的差错控制	(298)
8.1.1 概述	(298)
8.1.2 容错编码	(300)
8.1.3 信道传输层的差错控制	(305)
8.1.4 解码端的差错掩盖	(306)
8.1.5 编码器—解码器交互式差错控制	(307)
8.2 视频传输中的码率控制	(308)
8.2.1 码率控制概述	(308)
8.2.2 码率控制的实现	(309)

8.2.3 码率控制的模式	(310)
8.3 视频的网络传输	(312)
8.3.1 视频的传输模式	(312)
8.3.2 视频的传输网络	(313)
8.3.3 因特网上的数字视频传输协议	(314)
习题 8	(317)
第 9 章 数字图像通信应用系统	(318)
9.1 数字电视	(318)
9.1.1 数字电视概述	(318)
9.1.2 数字电视传输标准	(319)
9.1.3 数字电视系统组成及关键技术	(321)
9.1.4 数字电视的常见分类	(323)
9.1.5 数字电视的应用	(324)
9.2 流媒体	(325)
9.2.1 流媒体概述	(325)
9.2.2 流媒体工作原理及系统组成	(326)
9.2.3 流媒体的主要解决方案	(328)
9.2.4 流媒体的应用	(330)
9.3 IPTV	(331)
9.3.1 IPTV 概念及特点	(331)
9.3.2 IPTV 的系统架构及关键技术	(332)
9.3.3 IPTV 与有线数字电视的异同	(333)
9.4 视频监控	(334)
9.4.1 视频监控概述	(334)
9.4.2 视频监控的发展演变	(334)
习题 9	(337)
附录 A QM 编码器概率估计数据	(338)
附录 B JPEG 标准编码数据	(340)
参考文献	(345)

第1章 图像及图像通信

随着社会的发展,图像通信技术已经应用于我们生活和工作的各个方面,在其理论研究和应用技术方面都取得了很大的进展,特别是近20年来的成果尤其令人瞩目。从20世纪90年代起,ITU-T和ISO制定了一系列图像编码标准,如JPEG、JPEG2000、H.261、MPEG-1、MPEG-4、H.264等等。这些标准的制定推动了图像压缩、图像通信技术的实用化和产业化,迎来了数字图像通信的新时代。随之而诞生或实用化的可视电话、会议电视、数字监控、数字电视(DTV)、VCD、DVD等已经获得了相当大的成功,极大地丰富了人们的生活,促进了社会的发展。

1.1 图像信号的基本概念

图像是指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光的能量,在人的视觉器官中所重现出的物体的信息。大多数的图像源于自然景物,其原始的形态是连续变换的模拟信息。与文字、语音信息相比较,图像信息主要具有信息量大、直观性强、易于理解等特点。

在高度文明、高度发展的现代社会,随着计算机技术、现代通信技术、微电子技术、网络技术和信息处理技术的发展,人类社会已经进入到了信息化时代,图像信息的处理、存储和传输在社会生活中的作用将越来越突出,人们对图像信息的要求也越来越高。当图像以数字形式处理和传输时,具有质量好、抗噪性强、设备实现成本低、易于网络传输等优点。数字图像通信将是通信事业发展中面临的最大挑战和机遇,也是未来通信领域的研究热点之一。

1.1.1 图像信号的分类

视觉是人类获取信息的主要来源。据统计,人类从外界获取的信息中,70%以上来自视觉。由视觉系统所获得到的图像与其他的信息形式相比,具有直观、具体、生动等诸多显著的优点。我们可以按照图像的表现形式、生成方法等对其做出不同的划分。

1.1.1.1 按照图像的存在形式划分

①实际图像:通常为二维分布,又可分为自然图像和生成图像。

自然图像: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。

生成图像:如温度、压力、高度和人口密度分布图等生成的图像。

②抽象图像:如数学函数图像,包括连续函数和离散函数。

1.1.1.2 按照图像的亮度等级划分

①二值图像:只有黑白两种亮度等级。

②灰度图像:有多种亮度等级。

1.1.1.3 按照图像的光谱特性划分

①彩色图像:图像上的每个点有多于一个的局部性质,如在彩色摄影和彩色电视中重现的所谓三基色(红、绿、蓝)图像,每个像素就分别对应三个基色的三个亮度值。

②黑白图像:每个像素只有一个亮度值分量,如黑白照片、黑白电视画面等。

1.1.1.4 按照图像是否随时间而变化划分

①静止图像:不随时间而变化的图像,如各类图片等。

②活动图像:随时间而变化的图像,如电影和电视画面等。

1.1.1.5 按照图像所占空间的维数划分

①平面的二维图像,即平面图像,如照片等。

②空间的三维图像,即在三维空间中分布的图像,一般使用两个或者多个摄像头来成像。

1.1.2 彩色基础及模型

1.1.2.1 光和彩色

光和各种射线都属于电磁波,电磁波的波谱范围很广,包括无线电波、红外线、可见光谱、紫外线、X射线、宇宙射线等,如图 1.1 所示。其中,只有人的眼睛能看到的那一部分叫可见光,可见光是携带能量的电磁辐射中的很小一部分,它兼有波动特性和微粒特性。

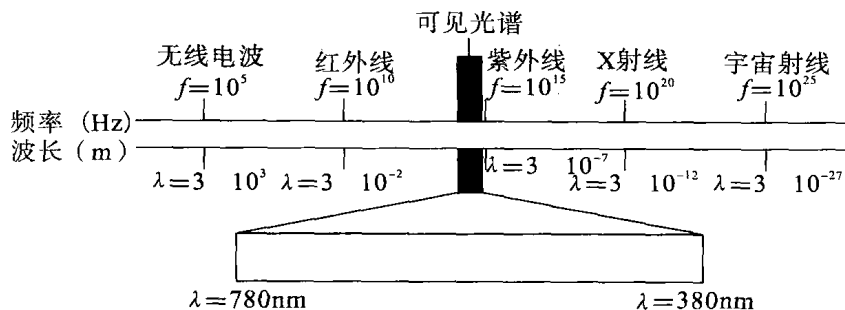


图 1.1 可见光谱的波长范围

可见光是由波长在 380 nm~780 nm 范围内的电磁波组成的。光源通常能发射某一波长范围内的能量,并且其强度可以在时间、空间上变化。光的彩色感觉决定于光谱成分(即它的波长组成)。

人的眼睛能够接收到两种类型的颜色,自己发光的物体的颜色叫做自己发光的颜色,被照射后物体的颜色叫做物体颜色。

自己发光的物体可能是天然的,如太阳;或人造的物体,如计算机的显示器、白炽灯、水银灯和其他类似的物体。物体颜色是被照射的物体反射的颜色,它由从物体表面反射的光线,即反射光和从物体表面底层散射的光线合成。

自己发光的物体的彩色感觉取决于它所发射能量的波长范围。照明光源遵循相加原则:几个混合的照明光源的彩色感觉取决于所有光源光谱的总和。

被照射物体的彩色感觉决定于入射光的光谱成分和被吸收的波长的范围。反射光源遵循相减原则:几种混合的反射光源的彩色感觉取决于剩余的未被吸收的波长。

1.1.2.2 色度原理

人类彩色感觉具有两个属性:亮度和色度。亮度指被感知的光的明亮度,它是与可视频带中的总能量成正比的。色度指被感知的光的颜色和深浅,它是由光的波长成分决定的。色度又有两个属性特征:色调和饱和度。色调指彩色的类别(即颜色),它是由光的峰值波长决定的。饱和度指颜色有多纯,它是由光谱的范围或带宽决定的。

(1)亮度(Intensity)

照射的光越强,反射光也越强,看起来也越亮。显然,如果彩色光的强度降到使人看不到了,在亮度标尺上它应与黑色对应。同样,如果其强度变得很大,那么亮度等级应与白色对应。亮度是非彩色属性,彩色图像中的亮度对应于黑白图像中的灰度。需要注意的是,不同颜色的光,强度相同时照射同一物体也会产生不同的亮度感觉。

(2)色调(Hue)

色调是一种或多种波长的光作用于人眼所引起的彩色感觉。它描述纯色的属性(如纯黄色、橘色或红色)。

(3)饱和度(Saturation)

饱和度是指颜色的纯度即掺入白光的程度,或者是指颜色的深浅程度。饱和度的深浅与色光中白光的成分的多少有关。一种纯彩色光中加入的白光成分越少,该彩色的饱和度越高;反之,白光成分越多,饱和度就越低。饱和度反映了某种色光被白光冲淡的程度。对于同一色调的彩色光,饱和度越深,则颜色越鲜明或说越纯;相反则越淡。

饱和度与亮度有一定的关系,在饱和的彩色光中增加白光的成分,相当于增加了光能,因而变得更亮了,但是它的饱和度却降低了。若增加黑色光的成分,相当于降低了光能,因而变得更暗,其饱和度也降低了。

饱和度越高,色彩越艳丽、越鲜明突出,越能发挥其色彩的固有特性。但饱和度高的色彩容易让人感到单调刺眼。饱和度低,色感比较柔和协调,但若混色太杂容易让人感觉浑浊,色调显得灰暗。

1.1.2.3 彩色混合的三基色原理

(1)图像的三基色

所谓三基色原理就是自然界常见的各种颜色光,都可由红(Red)、绿(Green)、蓝(Blue)三种色光按照不同比例相配而成,同样绝大多数颜色也可以分解成红、绿、蓝三种色光,这就是色度学中的最基本原理。混色模式有两种:增色模式(相加混色)和减色模式(相减混色)。

照明光源的基色系通常包括红色、绿色和蓝色,称为 RGB 基色,其应用在相加混色中。反射光源的基色系通常包括青色(Cyan)、深红色(也称紫色 Magenta)和黄色(Yellow),称为 CMY 基色,其应用在相减混色中。实际中,RGB 基色和 CMY 基色是互补的,也就是说,混合一个色系中的两种彩色会产生另外一个色系中的一种彩色。如:红色和绿色混合会产生黄色。图 1.2 表示了这种关系。上述原理构成了彩色摄取和显示的基础。

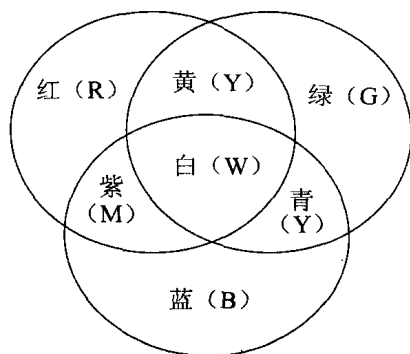


图 1.2 RGB 三原色叠加效果示意图

(2) 图像的彩色模型

彩色模型(彩色空间或彩色系统)的用途是在某些标准下用通常可接受的方式简化彩色规范。常常涉及用几种不同的色彩空间表示图形和图像的颜色,以对应于不同的场合和应用。因此,数字图像的生成、存贮、处理及显示时对应不同的色彩空间需要作不同的处理和转换。现在主要的彩色模型有:RGB 模型、CMY 模型、YUV 模型、YIQ 模型、YCbCr 模型、HSI 模型等。

① RGB——加色混合色彩模型。RGB 色彩模型就是模型中的各种颜色都是由红、绿、蓝三基色以不同的比例相加混合而产生的,即

$$C = aR + bG + cB$$

其中, C 为任意彩色光, a, b, c 为三基色 R, G, B 的权值。

在 CRT 显示中,将 R, G, B 的亮度值限定在一定范围内,如 $0 \sim 1$ 。每个像素的颜色都用三维空间的一个点来表示,就成为一个三维彩色模型,如图 1.3 所示。在 RGB 彩色空间的原点上,任一基色均没有亮度,即原点为黑色,坐标为 $(0, 0, 0)$ 。当三基色都达到最高亮度时,则为白色,坐标为 $(1, 1, 1)$ 。彩色立方体的三个角对应于 R, G, B 三基色,剩下的三个角对应于 C, M, Y 色。任何其他颜色对应于彩色立方体中相应的一点。目前所有的显示系统都选用 RGB 基色。计算机彩色显示器是典型的 RGB 色彩模型,也就是使用三种颜色基色红(R)绿(G)蓝(B)在视频监视器上混合产生一幅合成的彩色图像。RGB 色彩框架是一个加色模型。

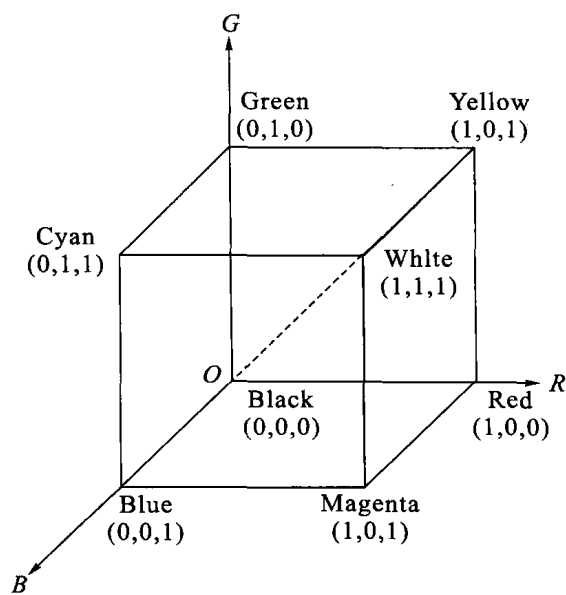


图 1.3 RGB 立方体

② CMY——减色混合色彩模型。CMY 色彩模型就是利用青色(Cyan)、深红色(Magenta)、黄色(Yellow)这三种彩色按照一定比例来产生想要的彩色。CMY 是 RGB 三基色的补色,所以存在如下的关系:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.1-1)$$

CMY 色彩一般应用于硬拷贝设备。如彩色打印机可以通过适当的比例混合具有所选基色的三种颜料来产生不同的彩色。多数打印机采用 CMY 基色,它们与荧光粉组合光颜色的显示器不同,是通过打印彩墨、彩色涂料的反射光来显现颜色的,是一种减色组合。由青、品红和黄三色组成的色彩模型,使用时相当于从白色光中减去某种颜色,因此又叫减色系统。例如:青色就是从白光中减去红色。由于彩色墨水、油墨的化学特性,以及色光反射和纸张对颜料的吸附程度等因素,用等量的 CMY 三色得不到真正的黑色,所以在 CMY 色彩中需要另加

一个黑色(Black 用 K 表示),才能弥补这三个颜色混合不够黑的问题。这就是所谓的 CMYK 基色,它能更真实地再现黑色。在实际应用中,CMY 色彩模式也可称为 CMYK 色彩模型。

③YUV 模型和 YIQ 模型——应用于电视传播系统的色彩模型。对于视频信号的传输,为了减少所需的带宽并与单色电视系统兼容,采用亮度/色度坐标系模型。但通常用于彩色显示的 RGB 基色混合了光的亮度和色度属性。1931 年,国际照明协会(CIE)规定了 XYZ 彩色坐标,但 XYZ 基色不能直接用于产生彩色,它主要用于定义其他的基色和彩色的数字说明。如用于传输彩色电视信号的 YIQ 和 YUV 彩色坐标。

在 XYZ 模型中,Y 表示亮度(强度),另外两个分量共同表示色度和饱和度。除了能分离亮度和色度信息,XYZ 另一个优点是几乎所有的可见彩色都能由非负的激励值规定。XYZ 坐标系中(X,Y,Z)与 RGB 坐标系中(R,G,B)的关系如下式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.1-2)$$

目前,世界上主要有三种不同的电视系统:PAL 系统用于大多数西欧国家和包括中国以及中东的亚洲国家;NTSC 系统用于北美和包括日本在内的部分亚洲国家和地区;SECAM 系统用于前苏联国家、东欧、法国以及一些中东国家。

在 PAL 制中就是采用的 YUV 彩色模型,而 YUV 就来源于 XYZ 彩色模型。根据 RGB 基色与 YUV 基色之间的关系,我们把由摄像机等输入设备得到的彩色图像信号,经分色、分别放大校正得到 RGB,再经过矩阵变换电路得到亮度信号 Y 和两个色差信号 U、V,最后在发送端将亮度和色度三个信号分别进行编码,用同一信道发送出去,这就是我们常用的 YUV 色彩模型。

采用 YUV 色彩空间的重要性在于它的亮度信号 Y 和色度信号 U、V 是分离的。如果只有 Y 信号分量而没有 U、V 分量,那么这样表示的图就是黑白灰度图。彩色电视采用 YUV 空间正是为了用亮度信号 Y 解决彩色电视机与黑白电视机的兼容问题,使黑白电视机也能接收彩色信号。

根据美国国家电视制式委员会规定,当白光的亮度用 Y 来表示时,它和红、绿、蓝三色光的关系可用如下方程式描述:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1.1-3)$$

这就是常用的亮度公式。

色差 U、V 是由 $B - Y$ 、 $R - Y$ 按不同比例压缩而成的,即

$$\begin{cases} U = \alpha(B - Y) \\ V = \gamma(R - Y) \end{cases} \quad (1.1-4)$$

其中, α 、 γ 为压缩系数。

YUV 色彩空间与 RGB 色彩空间的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.1-5)$$

如果要由 YUV 空间转化成 RGB 空间,只要进行相反的逆运算即可。

在 NTSC 制中采用的是 YIQ 彩色模型。Y 仍是表示亮度, I 和 Q 分量是 U 和 V 分量旋转 33° 后的结果,即

$$\begin{cases} I = V\cos 33^\circ - U\sin 33^\circ \\ Q = V\sin 33^\circ + U\cos 33^\circ \end{cases} \quad (1.1-6)$$

对 U 和 V 分量进行旋转后使得 I 对应橙色到青色范围的彩色, Q 对应绿色到紫色的范围。因为人眼对绿色到紫色的范围内的变化与橙色到青色范围内的变化相比不敏感,因此 Q 分量可以采用比 I 分量更小的带宽传输。YIQ 值与 RGB 的关系是:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.1-7)$$

在 YIQ 彩色模型中, $\arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$ 近似于色调,而 $\frac{\sqrt{I^2+Q^2}}{Y}$ 反映饱和度。在 NTSC 复合视频中, I 和 Q 分量被复用成一个信号,使得被调制信号的相位是 $\arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$, 而它的幅度为 $\frac{\sqrt{I^2+Q^2}}{Y}$ 。由于传输误差对幅度的影响比对相位的影响大,而人眼对彩色的色调更敏感,因此在广播电视信号中色调信息比饱和度信息能更好地保持。以上的结果正是人们所希望的。

④ YC_bC_r 颜色空间——由 YUV 颜色空间派生的一种颜色空间。它主要用于数字电视系统,以及图像、视频压缩标准,如: JPEG、MPEG 系列、H. 26x 系列。从 RGB 到 YC_bC_r 的转换中,输入、输出都是 8 位二进制格式。 YC_bC_r 与 RGB 的关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.500 \\ 0.500 & -0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (1.1-8)$$

⑤ HSI——视觉彩色模型。前面讨论的几种彩色模型不是从硬件的角度就是从色度学的角度提出的,但都不能很好地与肉眼的视觉特性相匹配。根据人眼的色彩视觉三要素:色调(Hue)、饱和度(Saturation)、亮度(Intensity)提出了 HSI 彩色模型。用这种描述 HSI 色彩空间的模型能把色调、饱和度和亮度的变化情形表现得很清楚。

彩色信息中的色调 H 和饱和度 S 可用图 1.4 所示的光环来表示。饱和度是色环的原点(圆心)到彩色点的半径的长度。在环的外围圆周是纯(饱和度为 1)的颜色,在中心是中性型(灰色)影调,即饱和度为 0。色调由角度表示。假设色环的 0° 表示彩色为红色, 120° 为绿色, 240° 为蓝色。色调从 0°~360° 覆盖了所有可见的光谱的彩色。假设光的强度 I 作为色环的垂线,则 H、S、I 坐标将构成一个彩色三维空间。灰度色调沿着轴线从底部的黑变到顶部的白。所以,最大亮度、最大饱和度的颜色位于圆柱的顶面的圆周上。从 RGB 到 HSI 模型的转变关系是: