



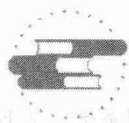
普通高校“十一五”规划教材

刘荣科 编著

现代图像通信



北京航空航天大学出版社



普通高校“十一五”规划教材

中国教育部高等教育出版社

现代图像通信

刘荣科 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是图像通信方面的一本教材,主要介绍图像通信中的基本概念、基本原理以及最新应用系统。全书共分9章,主要包括图像信号的表示、图像通信中的信息论基础、图像编码、图像抗差错传输以及典型的图像通信系统。图像编码部分在介绍常见的静止图像编码和运动图像编码之后,还较系统地介绍了先进的视频编码技术,包括可伸缩视频编码、多描述编码、分布式视频编码和多视点视频编解码。除了介绍常见的图像抗差错机制外,还重点介绍了信源信道联合技术在图像通信中的应用。通过对这些内容的介绍,使读者能更加深入地了解现代图像通信技术,并能应用到科学研究与技术开发中去,推动我国图像通信事业的蓬勃发展。

本书可以作为高等院校相关专业的本科生和研究生教材,也可供通信工程技术人员、科研人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代图像通信 / 刘荣科编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-5124-0192-1

I. ①现… II. ①刘… III. ①图像通信—教材 IV. ①TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 161970 号

版权所有,侵权必究。

现代图像通信

刘荣科 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:21.25 字数:476 千字

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-0192-1 定价:45.00 元

前 言

图像通信是当今通信技术中发展非常迅速的一个分支。宽带通信技术、微电子技术、计算技术和多媒体技术等飞速发展,都有力地推动了这门学科的发展,产生了愈来愈多的新型图像通信方式。图像通信的范围日益扩大,图像传输的有效性、可靠性和安全性不断得到改善。

在我国,图像通信市场呈现出多元化的发展趋势:一方面,视频会议市场正在快速增长;另一方面,图像通信开始不再局限于行业高端视频会议的应用,而是走向“寻常百姓家”。从国内视频通信市场来看,2008年视频通信市场的增幅为40%~50%,视频运营业务收入达到了5亿元人民币,我国视频通信整体市场规模达到了34亿元人民币。2009年,是中国移动、中国联通及中国电信三大通信运营商已经或者正打算推出3G手机的元年,而手机电视、视频通话成为3G业务的重头戏。2010年,视频内容流量的增长将会超越传统的P2P流量。据预测,2008—2013年,全球网络IP流量可能会增加66倍,其中,64%的流量将是视频。到2015年,视频通信流量的增长将会超越传统内容流量。学科发展、市场需求将对图像通信方向的人才提出更多、更高的要求。

作者所在课题组自1998年开始从事图像通信相关的研究工作以来,陆续得到国防预研基金、航空科学基金、航天支撑基金、国家自然科学基金、国家863项目、国家973计划等的大力支持,特别是有幸参与了数字电视地面传输国家标准(GB 20600—2006)的制定和系统研制、×××无人机图像传输系统设计研制、×××高清视频压缩传输系统研制、网络立体电视系统研制等重大项目,对图像通信方向有较系统的理解和较丰富的工程经验。

为了培养图像通信方向的专业人才,作者总结了课题组近年来的研究成果并组织讲稿,于2004年在北京航空航天大学开设了“现代图像通信系统”的研究性课程,其间于2006年受到国家公派出国留学基金资助,到美国师从视频通信与处理国际大师IEEE Fellow、SPIE Fellow、IEEE CSV T主编Chang Wen Chen做访问学者一年,借鉴国外的教学经验和收集到的最新材料进一步完善了讲稿。

本书引入了作者收集整理的一部分最新研究资料以及作者所在课题组的部分



最新研究成果,以期能适应我国高等教育发展的需求,同时尽可能反映出本学科的最新研究动态。

全书共9章。第1章介绍了图像的基本概念和图像信号的表示;第2章介绍了图像通信中的信息论基础,用信息论分析描述图像通信中的科学问题;第3章和第4章分别介绍了静止图像编码和运动图像编码;第5章在前面章节的基础上较系统地介绍了可伸缩视频编码、多描述编码、分布式视频编码和多视点视频编解码等先进视频编码技术;第6章介绍了图像通信中的抗差错机制;第7章从信源信道联合的角度介绍了当前基于信源信道联合的图像通信技术的研究成果;第8章和第9章以网络流媒体和数字电视为例,介绍了典型的图像通信系统。

借本书出版之际,向多年来一直关心我、培养我的国家教学名师张晓林教授致以衷心的感谢,他的指点和鼓励是我成长的力量源泉。感谢曾经在北京航空航天大学通信测控研究所图像通信组一起工作的张学武、姚远、廖小涛、聂振钢、王哲、房林堂、赵岭、孔亚萍、陈超、高小强、刁为民、李群迎、朱曼洁、孙新梅、高洁、卢小娜、薛志超、何杰、戚达平、张磊、赖大彧、蔡海涛、林鑫、于澎、李洋、王岩、岳志、刘庸民、王萧、王健蓉、高杨、周游、胡伟等同志,感谢参与本书文字整理和插图绘制工作的段瑞枫、李君烨、时琳等同志。感谢我年迈的母亲帮我精心照顾不足一岁的女儿,感谢我的妻子在繁忙的工作之余料理家务,帮我分忧,使我能全身心地投入本书的编写。

本书的出版列入了北京航空航天大学教材建设规划,编写过程中得到了北京航空航天大学电子信息工程学院王祖林院长和苏东林副院长等领导的大力支持和帮助,也得到了北京航空航天大学研究生院、教务处和出版社等单位领导的大力支持与帮助,作者在此对他们也表示衷心的感谢。

由于时间和作者学识水平的限制,书中难免存在不完善之处,敬请专家和读者不吝指正。

作者

2009年11月

于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 图像信号分析	1
1.1 图像信号及其分类	1
1.2 颜色和颜色模型	2
1.3 模拟视频信号	6
1.4 数字视频信号	9
1.4.1 数字视频信号的采样与量化	9
1.4.2 视频信号的表示	10
1.4.3 视频信号的相关函数	13
1.4.4 数字视频格式	14
1.5 立体视频	16
1.6 小 结	18
习题一	18
参考文献	19
第 2 章 图像传输的信息论基础	20
2.1 信息论概述	20
2.1.1 随机过程及信源模型	20
2.1.2 信息量和信息熵	22
2.2 图像的统计特性	27
2.2.1 空间统计特性	28
2.2.2 时间统计特性	32
2.2.3 变换域统计特性	33
2.3 图像的率失真特性	34
2.3.1 图像压缩的率失真函数及其性质	34
2.3.2 编码过程的率失真计算与比特平面编码的率失真分析	39
2.4 图像压缩极限计算	43
2.4.1 基于条件熵的估计方法	43
2.4.2 基于成像噪声模型的估计方法	43
2.4.3 利用多尺度条件熵和记忆度量估计法	45
2.5 图像变换编码的信息论基础	46



2.5.1	变换前后信息熵的变化规律	47
2.5.2	变换的去相关率和能量集中率	47
2.5.3	变换编码的增益	48
2.6	相关信源编码的信息论基础	50
2.6.1	相关信源独立编码	50
2.6.2	相关信源协同编码	51
2.7	信源信道联合编码的理论基础	53
2.7.1	信道编码简介	53
2.7.2	信源信道联合编码的理论基础	54
2.8	小 结	56
	习题二	56
	参考文献	59
第3章	静止图像编码	60
3.1	静止图像的无损编码	60
3.1.1	编码原理	60
3.1.2	编码标准	74
3.2	静止图像的有损编码	77
3.2.1	编码原理	77
3.2.2	常见的有损编码方法	79
3.2.3	编码标准	94
3.3	小 结	100
	习题三	100
	参考文献	102
第4章	运动图像编码	103
4.1	运动图像编解码原理	103
4.1.1	基于运动估计的编码原理	104
4.1.2	基于三维小波变换的编码原理	105
4.2	运动估计与运动补偿	105
4.2.1	运动估计与运动补偿的基本概念	105
4.2.2	基于像素的运动估计	106
4.2.3	基于块的运动估计	107
4.2.4	基于网格的运动估计	121
4.2.5	基于区域的运动估计	123
4.2.6	运动估计与补偿在运动图像编码中的应用	123

4.3 码率控制	125
4.3.1 码率控制的原理	126
4.3.2 码率控制的典型方法	126
4.4 运动图像编码标准	132
4.4.1 MPEG-1	133
4.4.2 MPEG-2	133
4.4.3 MPEG-4	134
4.4.4 H.264	135
4.4.5 AVS	137
4.4.6 VC-1	139
4.5 运动图像编码系统设计与实现	139
4.5.1 基于 DSP 的运动图像编码系统的设计与实现	140
4.5.2 基于 FPGA 的运动图像编码系统的设计与实现	146
4.6 小 结	153
习题四	153
参考文献	154
第 5 章 新型视频编码	155
5.1 可伸缩视频编码	155
5.1.1 可伸缩视频编码简介	155
5.1.2 基本精细粒度可伸缩编码	156
5.1.3 渐进精细粒度可伸缩视频编码	159
5.1.4 基于宏块的渐进精细可伸缩视频编码	163
5.2 多描述编码	164
5.2.1 多描述编码简介	164
5.2.2 多描述量化编码	166
5.2.3 多描述变换编码	167
5.2.4 基于 FEC 的多描述编码	170
5.2.5 基于框架扩展的多描述编码	170
5.2.6 多描述分级编码	171
5.3 分布式视频编码	171
5.3.1 分布式编码的基本原理	172
5.3.2 分布式视频编码系统	175
5.3.3 分布式视频编码的研究展望	177
5.4 多视点视频编码	178



5.4.1	多视点视频简介	178
5.4.2	多视点视频编码的原理	179
5.4.3	基于传统框架的多视点视频编码	181
5.4.4	基于 DVC 的多视点视频编码	184
5.5	小 结	185
	习题五	185
	参考文献	185
第 6 章	图像通信质量分析与抗差错传输	187
6.1	图像通信质量评估	187
6.1.1	图像压缩质量评估	187
6.1.2	图像传输质量评估	189
6.1.3	端到端的质量评估	190
6.2	图像传输信道的特点	190
6.2.1	图像传输对网络的要求	190
6.2.2	图像通信的互联网信道	191
6.2.3	图像通信的无线信道	193
6.3	误码对运动图像解码码流的影响	194
6.3.1	错误传播	195
6.3.2	不同编码字段的误码影响	196
6.4	错误控制和错误隐藏技术	197
6.4.1	编码端错误控制技术	198
6.4.2	解码端错误隐藏	202
6.4.3	编码端和解码端交互式差错控制	207
6.5	运动图像编码标准中的抗误码策略	209
6.5.1	MPEG-4 的抗误码策略	209
6.5.2	H.264 的抗误码策略	210
6.6	小 结	214
	习题六	214
	参考文献	215
第 7 章	信源信道联合编码在图像通信中的应用	216
7.1	信源信道联合编译码基础	216
7.1.1	信源信道分离编码	216
7.1.2	信源信道联合编码	217
7.2	信源信道联合编码技术	220

7.2.1	数字系统的信源信道联合编码技术	220
7.2.2	混合数字-模拟系统(HDA)的信源信道联合编码技术	223
7.2.3	近似模拟系统的信源信道联合编码技术	224
7.3	信源信道联合译码技术	226
7.3.1	信源信道联合译码基础	226
7.3.2	融合隐马尔科夫模型的信源信道联合译码	227
7.3.3	基于信源反馈信息的信源信道联合编译码	229
7.4	信源信道联合编码的新发展	234
7.4.1	网络跨层优化设计基本原理	234
7.4.2	基于跨层优化设计的信源信道联合编码	236
7.5	小 结	237
	习题七	237
	参考文献	238
第8章	网络流媒体	240
8.1	网络流媒体概述	240
8.2	流式传输的基本原理和实现方式	242
8.2.1	流式传输的基本原理	242
8.2.2	流媒体传输的实现方式	243
8.3	网络流媒体的系统组成	244
8.4	流式传输协议	246
8.4.1	实时传输协议(RTP)	246
8.4.2	实时传输控制协议(RTCP)	248
8.4.3	实时流协议(RTSP)	249
8.4.4	资源预留协议(RSVP)	250
8.5	流媒体的网络播放技术	253
8.6	流媒体的服务方式	255
8.6.1	C/S 模式概述	255
8.6.2	P2P 模式概述	255
8.6.3	P2P 模式与 C/S 模式的比较	256
8.7	P2P 流媒体网络电视	257
8.7.1	PPlive 协议	258
8.7.2	PPstream 协议	259
8.7.3	QQlive 协议	260
8.7.4	P2P 流媒体协议框架	260



8.8 流媒体的应用	262
8.9 小 结	265
习题八	266
参考文献	266
第9章 数字电视	268
9.1 数字电视概述	268
9.2 数字电视传输标准	269
9.2.1 ATSC 标准	269
9.2.2 DVB 标准概述	276
9.2.3 ISDB-T 标准	288
9.2.4 中国数字电视地面传输标准	293
9.3 移动电视	301
9.3.1 移动电视系统简介	301
9.3.2 移动电视标准	305
9.3.3 移动电视的网络内容及广播网络的安全性	315
9.4 小 结	318
习题九	318
参考文献	320
缩略语表	321

第 1 章 图像信号分析

这是个人的一小步,却是人类的一大步。

——阿姆斯特朗

人类通过视觉获取的信息量是非常巨大的。统计表明,视觉信息约占人类感觉所获取总信息的 60 %,而且图像信号比其他形式的信号更易被大脑理解和记忆。日常接触到的照片、图画、电视画面等都属于图像范畴。可见,研究图像信号具有非常重要的意义。

1.1 图像信号及其分类

图像是光辐射能量经过物体的反射,或由物体本身发出的光能量在人的视觉器官中的反映。另外,为了形象地表示一些本身并不可见的信息,常常对其进行可视化处理(通过传感器和显示设备),使其转变为可以被视觉直接接受的形式,例如红外图像、遥感图像、超声图像等,如图 1.1 所示。

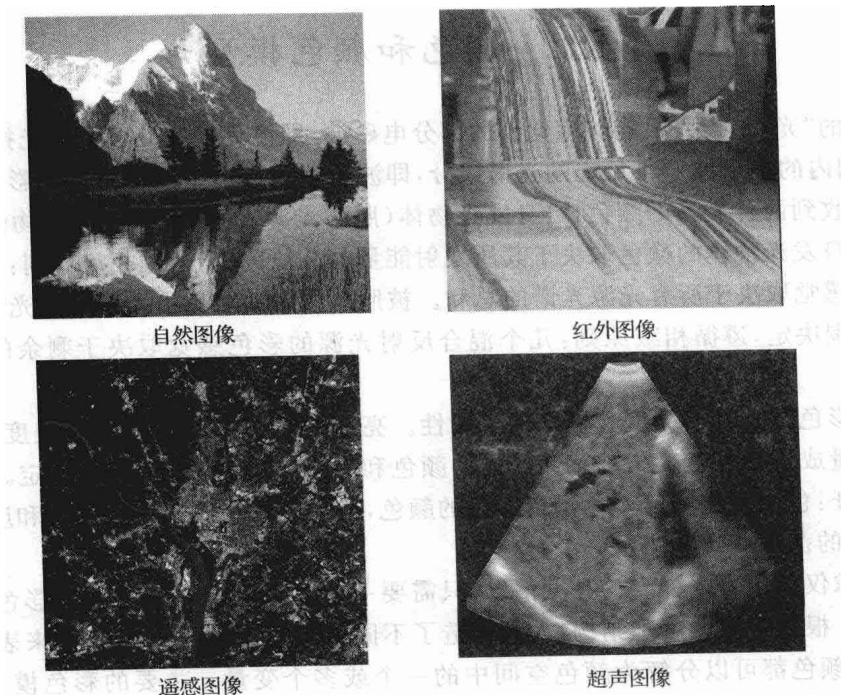


图 1.1 几幅图像实例



图像信息较语音、文字等其他形式的信息具有以下特点:

- ① 图像直观性强,不需要思维转换,可以直接理解;
- ② 图像的信息量大;
- ③ 图像信息的理解具有主观性,不同的观察者对同一幅图像会有不同的理解和感受;
- ④ 不同种类的图像在复杂度和统计特性上有较大的差异,处理方法也有较大的差异。

图像的分类方式很多,常见的有以下几种:

① 根据图像所表现的空间维数,可以分为二维图像和三维图像。二维图像就是目前最为常见的平面图像(如照片等)。三维图像是能够给人立体视觉感受的空间分布的图像,通常由两个或多个图像采集设备成像得到。

② 根据图像的光谱特性,可以分为单色(灰度)图像和彩色图像。二维的数字灰度图像可以用一个由灰度值构成的二维数组表示,即单分量表示;而彩色图像则由多个彩色分量组成,每个分量都是一个二维数组,如显示器显示出的 RGB 三基色彩色图像。

③ 根据图像中每个分量像素值的幅度,可以分为二值图像和多值图像。二值图像的分量只有两种幅度等级(如黑白图像);而多值图像的分量可以有多个幅度。通常情况下,多值数字图像每个分量的电平幅度有 2^P 种, P 称做比特深度,通常取 $P=8$ 。

④ 根据图像是否随时间变化,可以分为静止图像和运动图像。静止图像在时间维度上内容保持不变;而运动图像是在某一段时间段内按时间顺序排列的一组图像序列。

1.2 颜色和颜色模型

通常说的“光”是指人眼能够感觉到的部分电磁波,即可见光。一般可见光指波长在 380~780 nm 范围内的电磁波。可见光的光谱成分,即波长组成决定了人眼对其的彩色感觉。人类视觉能够接收到两种类型的颜色:自身发光物体(照明光源)的颜色和被照射物体(反射光源)的颜色。自身发光物体的颜色取决于其所发射能量的波长范围,遵循相加原则:几个混合照明光源的彩色感觉取决于所有光源光谱的总和。被照射物体的颜色由入射光的光谱成分和被吸收的波长范围决定,遵循相减原则:几个混合反射光源的彩色感觉取决于剩余的未被吸收的波长。

人类的彩色感觉具有亮度和色度两个属性。亮度指被感知的光的明亮程度,它与可视频带中的总能量成正比。色度指被感知的光的颜色和深浅,由光的波长成分决定。色度又包含两个属性特征:色调和饱和度。色调指彩色的颜色,由光的峰值波长决定。饱和度是指颜色的纯度,由光谱的范围或带宽决定。

灰度图像仅仅包含采样点的亮度信息,只需要一个数值就可以表示。而彩色图像的表示则较为复杂。根据人眼的生理结构,人们构造了不同的颜色模型或颜色空间来表示图像的颜色,任何一种颜色都可以分解为颜色空间中的一个或多个变量。主要的彩色模型有 RGB 模



型、CMYK 模型、YUV 模型、 $YCbCr$ 模型、HSI 模型等。

1. RGB 加色混合颜色模型

RGB 模型中的各种颜色都是由红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色以不同的比例相加混合而成的,即 $W = aR + bG + cB$, 其中, W 为任意彩色光, a 、 b 、 c 为三基色 R、G、B 的权值。RGB 模型是记录和显示彩色图像时最常见的一种模型,在彩色阴极射线管显示器(CRT)和液晶显示屏(LCD)中采取的都是 RGB 方案。实际应用中常将 R、G、B 的亮度限定在一定的范围内,如 0~1。每种颜色都可以用三维空间中的一个点来表示,如图 1.2 所示。在该颜色空间的原点,三基色达到最低亮度,即为黑色,坐标为(0,0,0);当三基色都达到最高亮度时,即为白色,坐标为(1,1,1)。彩色立方体的剩余六个角分别对应于 R、G、B 三基色和青色(C)、深红色(M)和黄色(Y)。青色、深红色和黄色分别是由红、绿、蓝三色中的两种混合得到的,如图 1.3 所示。一幅彩色图像分解为 R、G、B 三个分量后的结果如图 1.4(a)所示(分解后的各颜色分量以灰度图像表示)。

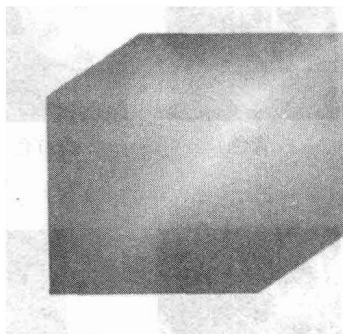
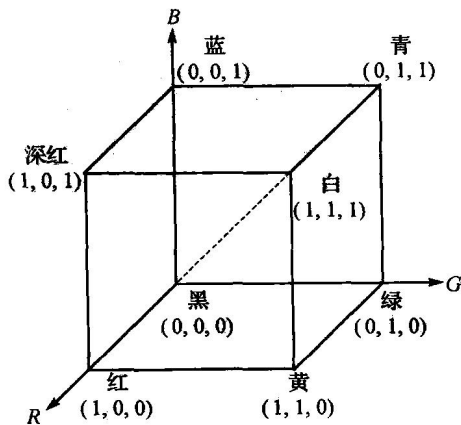


图 1.2 RGB 立方体

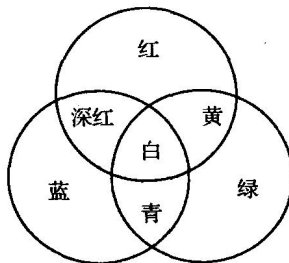


图 1.3 RGB 三色叠加效果



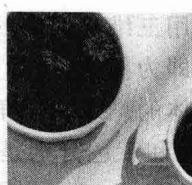
原图像



红色



绿色

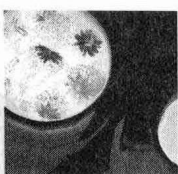


蓝色

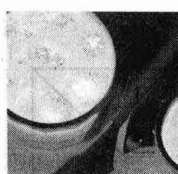
(a) RGB



青色



深红色

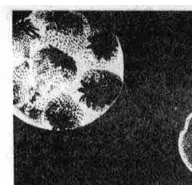


黄色



黑色

(b) CMYK



色调



饱和度



亮度

(c) HSI

图 1.4 一幅彩色图像在不同颜色空间分解的实例

2. CMYK 减色混合颜色模型

CMYK 模型利用青色(C)、深红色(M)和黄色(Y)按照一定比例组成其他颜色。图 1.5 是 CMY 三色的叠加效果。C、M、Y 是 R、G、B 三基色的补色,与 R、G、B 存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.2.1)$$

CMYK 颜色模型主要应用于彩色印刷领域,K 表示黑色。图 1.4(b)是一个彩色图像按照 CMYK 模型分解的实例(分解后的各颜色分量以灰度图像表示)。

3. YUV 模型和 YC_bC_r 模型

为了减少带宽并与单色电视系统兼容,国际照明协会(CIE)于 1931 年规定了 XYZ 颜色模型。在 XYZ 模型中实现了亮度和色度信息的分离:Y 表示亮度,X、Z 两分量共同表示色度和饱和度。XYZ 坐标系与 RGB 坐标系的关系如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.2.2)$$

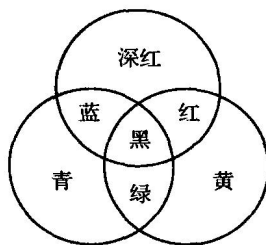


图 1.5 CMY 三色叠加效果

XYZ 模型主要用于定义其他基色和彩色的数字说明,彩色电视信号的传输实际上主要应用 YUV 模型。YUV 模型的亮度信号 Y 和色差信号 U、V 是分离的,解决了彩色电视与黑白电视兼容的问题。YUV 颜色空间与 RGB 颜色空间的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.2.3)$$

YC_bC_r 颜色空间是由 YUV 颜色空间派生出来的,主要用于数字电视系统以及图像、视频压缩标准中。Y、 C_b 、 C_r 三个颜色分量在 0~255 的范围内取值,是 Y、U、V 分量的伸缩和移位形式。在 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 颜色空间与 RGB 颜色空间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.500 \\ 0.500 & -0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (1.2.4)$$

4. HSI 模型

HSI 颜色模型与人的彩色感觉的三个属性——色调(Hue)、饱和度(Saturation)、亮度(Intensity)相匹配。

HSI 颜色模型如图 1.6 所示。色调 H 和饱和度 S 都可表示在图中的色度圆上。色调 H 由角度表示,0°表示红色,120°表示绿色,240°表示蓝色。0°~360°覆盖了所有可见光谱的颜色。饱和度 S 是色度圆圆心到所表示彩色点的半径的长度。色度圆的最外围饱和度 S=1,是纯色,圆心处是灰色,即饱和度 S=0。亮度是经过色度圆圆心的垂线,底部表示黑,顶部表示白。从 RGB 颜色空间到 HSI 颜色空间的转换关系如下:

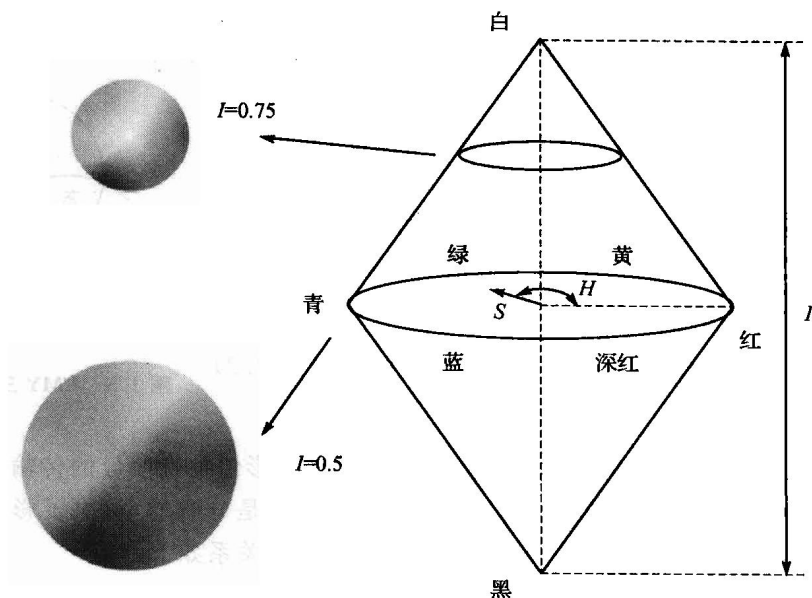


图 1.6 HSI 颜色模型

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 360^\circ - \theta, & B > G \end{cases} \quad (1.2.5)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (1.2.6)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (1.2.7)$$

$$\text{其中, } \theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{\frac{1}{2}}} \right\}.$$

图 1.4(c)是彩色图像在 HSI 颜色空间分解后得到的各颜色分量(分解后的各颜色分量以灰度图像表示)。

1.3 模拟视频信号

视频实质上是在时间坐标上排列的一组图像序列。由于人眼不能区别场景的快速变化,即视觉暂留特性,所以以一定的速率显示的一系列内容逐渐变化的图像(其中每一幅图像称做一帧),在观看者看来是连续运动的。