

研究生系列教材

Digital image communications and applications

数字图像通信 及其应用

主 编 何小海
副主编 王正勇



四川大学出版社

清华大学出版社

Digital image communications and applications

数字图像通信 及其应用

清华大学出版社

清华大学出版社

研究生系列教材

Digital image communications and applications

数字图像通信 及其应用

主 编 何小海
副主编 王正勇
编 委 何小海 王正勇 余艳梅 吴炜



四川大学出版社

责任编辑:周树琴
责任校对:柴 晟
封面设计:米茄设计工作室
责任印制:杨丽贤

图书在版编目(CIP)数据

数字图像通信及其应用 / 何小海主编. —成都: 四川大学出版社, 2006.7
ISBN 7-5614-3389-1
I. 数... II. 何... III. 数字通信: 图像通信
IV. TN919.85
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 069125 号

书名 数字图像通信及其应用

主 编	何小海
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
印 刷	郫县犀浦印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	25.25
字 数	613 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版
印 次	2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0 001~1 000 册
定 价	48.00 元

◆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

版权所有◆侵权必究

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字图像通信的基本理论和技术,反映了相关领域近年来的最新研究成果。

全书共分为 10 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、二维运动估计、基于内容的视频编码、小波变换编码等;分析了图像压缩编码的相关标准,如 JPEG2000、MPEG-4 和 H. 264 等;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,把握数字图像通信领域目前新的发展方向,理论联系实际,图文并茂,内容丰富新颖。

本书适合作为通信与信息类、计算机类及相关专业研究生专业课教材或教学参考书,也可作为相关专业高年级本科生的教材,同时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。

序

“年年岁岁花相似，岁岁年年人不同。”在世纪之交，经过高教体制改革，又一次强强合并后的新四川大学已成为我国西部地区规模最大、学科门类最齐全的新型综合性研究型大学。校训“海纳百川，有容乃大；严谨勤奋，求是创新”已成为川大人求知治学的座右铭。

作为新世纪的献礼，我校研究生教材建设基金资助的又一批研究生优秀教材相继正式出版了，在此我表示热烈的祝贺。

众所周知，21世纪是知识经济的世纪，国际竞争空前激烈。竞争的焦点是科学技术，竞争的核心是创新型人才，竞争的关键是国民教育。对于四川大学这样的国家重点大学而言，必须注意大力发展研究生教育，扩大规模，注重质量，强调创新。

校长、教师、教材是办学的三大要素，而教材是教学改革与师生智慧的重要结晶。正是基于这种思考，我校建设以学科建设为龙头，作为一项重要的措施就是加强研究生的教材建设，我们通过各种渠道，筹集了专项基金，用以资助研究生优秀教材的编写和出版。我们在1999年首次资助的是有博士学位授权点的学科专业中涉及面大、使用面宽的研究生学位平台课程的优秀教材。而今，我们扩大了教材基金资助的范围，无论文、理、工、管、医，只要是经过专家评审后认定的优秀教材，都可列为资助对象。特别是社会需求量大的应用学科、新兴学科、交叉学科及保护学科的优秀教材，更是优先资助出版。

我们推出的研究生教材的基本特点是：符合该学科教学大纲的基本要求，有较强的理论性和系统性。这些教材既反映了该学科发展的新知识、新动向、新成就，也反映了我校教师在该门学科教学与科研中的新成果与新经验。

前人说得好，古今之成大学问、大事业者，都必须经过三种

境界：“昨日西风凋碧树，独上高楼，望尽天涯路”，此第一境界也；“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴”，此第二境界也；“众里寻他千百度，蓦然回首，那人却在灯火阑珊处”，此第三境界也。研究生优秀教材的建设应该算作一种“大事业”。优秀教材的作者们对于研究生教育改革的执著追求，令人钦佩；他们的无私奉献精神，值得赞扬；他们所取得的教学科研成果应该积极推广，使其产生应有的社会效益，为百年名校增添光彩。我殷切希望在陆续出版的研究生教材中能出现“传诸后世”的佳作，更希望我校有更多教授、名家动手撰写研究生教材，分门别类，出版系列的研究生教材丛书，为建设国内领先、世界一流的新四川大学做出更大的贡献。

四川大学副校长

四川大学研究生院院长 刘应明教授

中国科学院院士

前 言

随着科学技术的发展和社会的进步,人们对于通信系统所传输内容的要求早已从数据、语音到了图像、视频。近年来,与图像、视频相关的应用越来越广泛,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,而这些都与图像通信及其核心内容图像的压缩编码有着密切的联系。目前,图像、视频编码的研究已经从早期的面向存储转为了面向传输,人们所关心的问题不仅限于压缩率、重建质量等指标,还需要研究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。

目前,很多科研院所都针对图像通信相关问题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。四川大学在本科生、研究生中开设这方面的课程已有十多年的历史,为了适应目前理论和技术的发展,需要改进研究生的教材。在四川大学研究生教材建设专项基金的资助下,我们启动了教材的编写工作。在我们的教学工作及讲义的基础上,通过参考大量文献、专著,结合我们开展的科研工作,历时两年,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,主要为图像压缩编码、图像传输、图像通信应用系统三个部分。本书重点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等内容;第三部分介绍了图像通信应用系统,如数字电视、流媒体技术、IPTV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,并介绍了国内外目前新的发展方向。

参加本书编写工作的主要人员有何小海、王正勇、余艳梅、吴炜、滕奇

志、陶青川、吴晓红、吴小强等同志，通过集体讨论、分工编写、交叉修改后完成。另外，李滔、王姝、秦琴、罗鸣等参加了部分程序调试、文字整理等工作。本书由何小海、王正勇担任主编，负责大纲拟定、组织编著和统稿工作。

四川大学电子信息学院的陶德元教授、罗代升教授、龙建忠教授对本书的写作给予了大力支持，陶德元教授全面地审阅了本书的初稿，提出了大量的改进意见和建议，在此向他们表示感谢。

在本书的出版过程中，得到了四川大学出版社及周树琴老师的诸多帮助，借本书出版之际，表示衷心的感谢！

感谢四川大学研究生院对本书编写工作的支持和指导，四川大学研究生教材建设专项基金的资助对本书的编写和出版起到了极大的促进作用。

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。

我们的编写工作是在承担着繁忙的科研和教学工作的情况下进行的，时间较为紧张，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。作者电子信箱为：nic5602@scu.edu.cn。

编 者

2006 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	(8)
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	(11)
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	(14)
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	(15)
第 2 章 图像信号的分析与变换	(16)
2.1 图像信号的数字化	(16)
2.1.1 图像的采样	(16)
2.1.2 量化	(19)
2.1.3 视频信号的数字化	(20)
2.2 二维离散傅里叶变换 (DFT)	(24)
2.2.1 二维 DFT 的定义	(24)
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	(26)
2.3.1 一维 DCT	(26)
2.3.2 二维 DCT	(29)
2.3.3 二维 DCT 的快速计算	(32)
2.4 离散 K-L 变换	(36)
2.5 图像的统计特性	(38)
2.5.1 图像的自相关系数	(38)

2.5.2 图像差值信号的统计特性·····	(39)
2.5.3 图像的变换域统计特性·····	(40)
习题2 ·····	(41)
第3章 数字图像压缩的基本理论 ·····	(43)
3.1 图像编码理论基础·····	(43)
3.1.1 图像压缩编码系统的基本结构·····	(43)
3.1.2 信源模型及其熵·····	(44)
3.1.3 无失真编码理论·····	(46)
3.1.4 有失真编码理论·····	(48)
3.2 统计编码·····	(51)
3.2.1 基本理论·····	(51)
3.2.2 霍夫曼编码·····	(53)
3.2.3 香农编码·····	(55)
3.2.4 算术编码·····	(56)
3.2.5 LZW 编码 ·····	(65)
3.3 变换编码·····	(67)
3.4 线性预测编码·····	(70)
3.5 矢量量化编码·····	(73)
习题3 ·····	(80)
第4章 静止图像编码 ·····	(82)
4.1 概述·····	(82)
4.2 二值图像编码·····	(83)
4.2.1 行程长度编码·····	(83)
4.2.2 二值图像的方块编码·····	(84)
4.2.3 JBIG 标准简介 ·····	(86)
4.3 灰度图像编码·····	(86)
4.3.1 几种典型的灰度图像编码·····	(86)
4.3.2 渐进编码·····	(87)
4.4 JPEG 标准 ·····	(92)
4.4.1 概述·····	(92)
4.4.2 JPEG 标准的基本框架 ·····	(93)
4.4.3 基于 DCT 的编码过程 ·····	(95)
4.4.4 多分量图像 ·····	(102)
4.4.5 无损压缩 ·····	(103)
4.4.6 DCT 渐进模式 ·····	(104)
4.4.7 分级模式 ·····	(104)
习题4 ·····	(105)
第5章 图像的小波变换编码及 JPEG2000 标准 ·····	(106)
5.1 图像的小波变换 ·····	(106)
5.1.1 连续小波变换与反变换 ·····	(106)

5.1.2	多分辨率分析	(108)
5.1.3	一维离散小波变换与反变换	(112)
5.1.4	二维离散小波变换与反变换	(114)
5.2	提升小波变换	(118)
5.2.1	提升小波变换的基本步骤	(118)
5.2.2	构造小波基的提升方法	(121)
5.2.3	传统小波变换的提升实现	(124)
5.3	整数小波变换	(129)
5.4	小波变换编码	(130)
5.4.1	编码基本原理	(131)
5.4.2	小波图像系数的特点	(132)
5.5.3	小波变换编码的几个主要问题	(133)
5.5	基于小波变换的零树编码	(135)
5.5.1	嵌入式小波零树编码	(136)
5.5.2	SPIHT 算法	(143)
5.6	EBCOT 编码算法	(147)
5.6.1	概述	(147)
5.6.2	码流的可分级性	(147)
5.6.3	量化和逆量化	(149)
5.6.4	块编码	(152)
5.6.5	率失真优化	(160)
5.6.6	层的格式和表示	(162)
5.7	JPEG2000 标准	(163)
5.7.1	概述	(163)
5.7.2	JPEG2000 的基本框架	(164)
5.7.3	图像预处理	(167)
5.7.4	核心算法	(169)
5.7.5	码流格式	(172)
5.7.6	感兴趣区域	(175)
5.7.7	可伸缩性及容错性	(180)
习题 5		(181)
第 6 章	序列图像编码及运动估计	(183)
6.1	序列图像编码系统	(183)
6.1.1	视频图像压缩的必要性	(184)
6.1.2	视频图像编码系统的一般结构	(184)
6.1.3	视频编码方案分类	(185)
6.2	二维运动估计	(186)
6.2.1	二维运动估计的基本概念	(187)
6.2.2	使用光流方程的估计方法	(189)
6.2.3	基于块的运动估计——块匹配算法	(193)

6.2.4	像素递归方法	(203)
6.2.5	贝叶斯估计法	(205)
6.2.6	基于网格的运动估计	(209)
6.2.7	全局运动估计	(210)
6.2.8	基于区域的运动估计	(211)
6.2.9	三维运动估计介绍	(213)
6.3	采用时间预测和变换编码的视频编码	(217)
6.3.1	三种常用视频帧	(218)
6.3.2	基于块的混合视频编码	(219)
6.3.3	编码参数选择	(221)
6.4	MPEG-1 视频编码和解码	(223)
6.4.1	MPEG-1 介绍	(223)
6.4.2	输入图像格式与图像类型	(224)
6.4.3	视频编码与解码具体过程	(226)
6.4.4	视频语法	(231)
6.4.5	系统层简介	(233)
6.5	视频图像编码标准	(234)
6.5.1	MPEG 系列标准	(235)
6.5.2	H.26x 系列标准概述	(238)
6.5.3	视频编码国际标准的应用和性能比较	(239)
习题 6		(241)
第 7 章	基于内容的视频编码及 MPEG-4 标准	(243)
7.1	基于物体的视频编码	(243)
7.1.1	物体基编码模型	(244)
7.1.2	基于物体的 OBASC 算法原理	(245)
7.2	基于知识的视频编码	(247)
7.3	语义视频编码	(248)
7.4	分层编码系统	(251)
7.5	基于对象的视频编码标准 MPEG-4	(252)
7.5.1	AV 对象	(252)
7.5.2	MPEG-4 标准构成	(254)
7.5.3	MPEG-4 的结构与语法	(256)
7.5.4	形状编码	(257)
7.5.5	运动信息编码	(257)
7.5.6	纹理编码	(258)
7.5.7	可分级扩展编码	(261)
7.5.8	Sprite 编码	(264)
7.5.9	应用情况	(265)
习题 7		(266)

第 8 章 H. 264/AVC 视频编码标准	(267)
8.1 概述	(267)
8.2 H. 264 标准的分层	(269)
8.3 H. 264/AVC 视频编码器	(270)
8.4 帧内预测编码	(272)
8.4.1 4×4 亮度信号帧内预测	(273)
8.4.2 16×16 亮度信号预测	(275)
8.4.3 8×8 色度信号帧内预测	(276)
8.4.4 帧内预测模式的选择	(277)
8.5 帧间预测	(277)
8.5.1 可变尺寸块运动补偿	(278)
8.5.2 多参考帧运动补偿	(279)
8.5.3 四分之一像素运动估计	(279)
8.5.4 运动矢量预测	(282)
8.6 十字优先菱形搜索	(283)
8.7 整数变换及量化	(289)
8.7.1 4×4 整数离散余弦变换	(289)
8.7.2 量化和反量化	(292)
8.7.3 4×4 亮度直流系数的变换及量化	(294)
8.7.4 2×2 色度直流系数的变换及量化	(295)
8.7.5 变换系数的扫描	(296)
8.8 环路滤波	(296)
8.8.1 环路滤波顺序	(297)
8.8.2 滤波强度	(297)
8.8.3 环路滤波过程	(298)
8.9 熵编码	(301)
8.9.1 基于指数哥伦布 (Exp Golomb) 的统一变长编码 (UVLC)	(302)
8.9.2 基于上下文的自适应变长编码	(303)
8.9.3 基于上下文的自适应二进制算术编码	(306)
8.10 H. 264 的优化	(313)
8.10.1 MMX/SSE2 及对内存的操作	(313)
8.10.2 对主要运算的优化	(314)
8.10.3 优化结果比较	(315)
8.11 数字音视频编解码技术标准简介	(317)
8.11.1 AVS 标准进展概况	(317)
8.11.2 AVS 标准的优势与特点	(318)
习题 8	(318)
第 9 章 图像的传输技术	(320)
9.1 图像的传输信道	(320)
9.1.1 微波通信	(320)

9.1.2 卫星通信	(322)
9.1.3 光纤通信	(323)
9.2 图像的传输网络	(324)
9.2.1 SDH 传输技术	(325)
9.2.2 ATM 交换技术	(326)
9.2.3 宽带接入技术	(328)
9.3 图像通信质量控制	(330)
9.3.1 图像通信中的差错控制	(331)
9.3.2 图像通信中的码率控制	(343)
9.4 基于网络的数字视频传输协议	(347)
9.4.1 实时传输协议 RTP 与传输控制协议 RTCP	(347)
9.4.2 实时流协议 RTSP (Real-Time Streaming Protocol)	(354)
9.4.3 资源预留协议 RSVP (Resource Reservation Protocol)	(358)
习题 9	(361)
第 10 章 数字图像通信应用系统	(362)
10.1 数字电视系统	(362)
10.2 流媒体原理及应用	(365)
10.2.1 流媒体概述	(365)
10.2.2 流媒体的优点	(366)
10.2.3 流媒体工作原理及系统组成	(366)
10.3 IPTV	(370)
10.3.1 IPTV 技术	(371)
10.3.2 IPTV 与数字电视的异同	(373)
习题 10	(374)
附录 A QM 编码器概率估计数据	(376)
附录 B JPEG 标准编码数据	(377)
附录 C CAVLC 相关码表	(382)
参考文献	(386)

第1章 图像及图像通信

目前图像通信在理论和技术方面都取得了令人瞩目的进展,特别是近20年来大量的应用成果不断涌现。20世纪90年代以后,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编码、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,经过物体的反射或透射,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视觉信息。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量。与文字、语音信息相比较,图像信息主要具有信息量大、直观性强以及模糊性、实体化和形象化等特点。

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,人类社会进入信息化时代的今天,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,人们对接受图像信息的要求也越来越迫切。当图像以数字形式处理和传输时,具有质量好、成本低、小型化和易于实现等优点。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热点之所在。

1.1.1 图像信号的分类

视觉是人类最重要的感觉,也是人类获取信息的主要来源。据统计,人类从外界获取的信息中,70%以上来自视觉。图像与其他的信息形式相比,具有直观、具体、生动等諸多显著的优点。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。

按照图像的存在形式分:

(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: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。

按照图像的亮度等级分:

(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。

按照图像的光谱特性分:

(1) 彩色图像：图像上的每个点有多个分量。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。

按照图像是否随时间而变化分：

(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。

按照图像所占空间的维数分：

(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：即空间分布的图像，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。

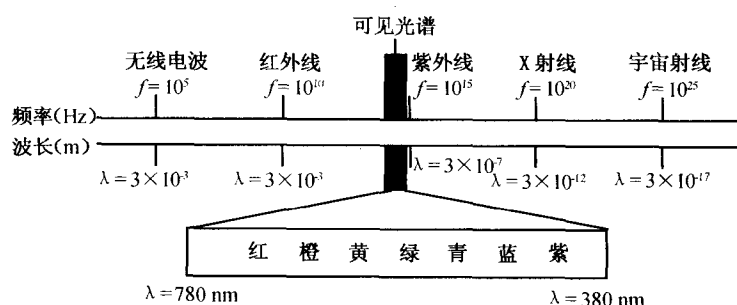


图 1.1 可见光谱的波长的范围

可见光是由波长在 380nm~780nm 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。自身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。

自身发光的物体可能是天然的，例如：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。

自身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