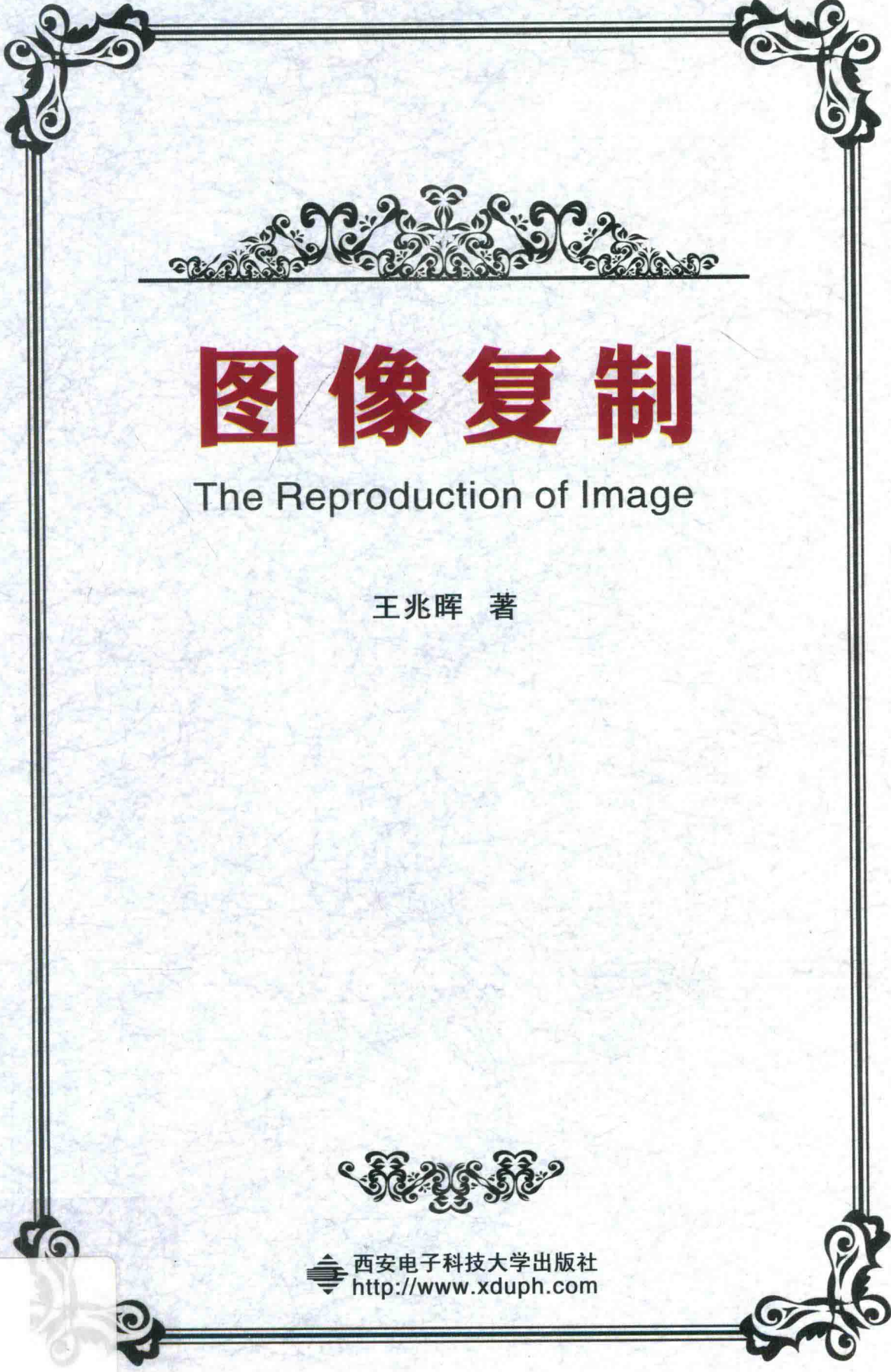




图像复制

The Reproduction of Image

王兆晖 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

图 像 复 制

The Reproduction of Image

王兆晖 著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书在国内外相关研究基础上,结合作者十多年来所取得的研究成果,系统全面地介绍和讨论了跨媒介图像复制过程中的理论与技术。全书共分八章,涉及图像复制过程中的理论基础、关键技术和研究成果。首先,本书对彩色图像复制过程中的理论基础——色度学进行了介绍,在此基础上结合设备的校准与特性化过程,讲解了色彩管理系统的研发。接下来,对复制过程中的色域映射进行了重点介绍,包括算法的研究、实验、性能分析。最后,讨论了复制过程的质量控制,介绍作者在图像差异性评估方面的主观实验和客观算法的研究成果。

本书可供图文、印刷、包装等相关领域的研究人员和技术人员参考,也可作为高等院校相关专业本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

图像复制/王兆晖著. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.10

ISBN 978-7-5606-4643-5

I. ①图… II. ①王… III. ①数字图象处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 214300 号

策 划 毛红兵

责任编辑 万晶晶

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 9.5 彩插 2

字 数 219千字

印 数 1~1000册

定 价 25.00元

ISBN 978-7-5606-4643-5/TN

XDUP 4935001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

图像信息是人类从客观世界获取信息的重要来源。在过去的几十年间,电子、通信、计算机和信息技术取得了长足的进步,图像信息的存储、复制、应用也从黑白世界进入到彩色世界,从静态图像发展到动态视频。在日常的工作生活中,彩色图像(当然也包括彩色视频)已经深入到方方面面,深刻地影响并改变着人们的生活、工作乃至思维和认知方式。尤其是在近年来发展迅速的人工智能领域,模式识别、深度学习、人机交互等技术的研究无不充斥着图像研究的身影。

现代图像科学的应用领域非常广阔,涵盖了农业、工业、生物医学工程及航空航天工程的各个领域,而本书专注于对彩色图像复制技术的研究。人们通过视觉获取外部信息,将外部信息在人的视觉系统中成像。为了保证对客观事物的正确认识,我们希望获得的信息准确无误。图像是获取和交换信息的主要载体,对于图像而言,我们要求能够达到所见即所得(What you see is what you get, WYSIWYG),因此,图像的复制就成为了图像应用中的一个关键过程。图像系统通常由不同类型或者不同原理的媒介(设备)所构成,图像的信息又相对较为复杂,如何从技术角度控制图像的复制过程使其满足各种应用需求,如何保证图像复制系统的质量,都是本书的研究范畴和待解决的问题。

本书的内容基于作者十多年的科研成果,系统、详细地介绍了图像复制系统的各个环节及其相关技术的研究及发展,注重对理论知识的系统论述,尤其是在理论基础的讲解上,做到事无巨细、悉究本末,同时对关键技术又做到重点突出。由于图像复制研究的特殊性,因此研究过程中的心理物理学实验贯彻全书,从实验设计到实验样本选取,从实验过程到数据整理,从数据分析到结果讨论,本书力求通过对实验环节的细致描述,将图像复制的研究成果完整地呈现在读者面前。

由于作者水平有限,研究的内容时间跨度较大,因此难以做到对主流研究及技术、典型应用合理、科学的编排,所作论述仅代表一家之言,衷心希望读者批评指正和不吝赐教,作者将在后续的科研工作中进一步完善。

本书的出版得到海南省科技合作专项 KJHZ2015-23 的大力支持,在此表示衷心的感谢。

作 者

2016 年 5 月

海口,海南

目 录

第1章 简介	1
1.1 概述	1
1.2 图像复制	2
1.3 章节结构	3
第2章 色彩学导论	4
2.1 概述	4
2.2 CIE 色度学	4
2.2.1 光源和 CIE 标准照明体	4
2.2.2 CIE 标准色度观察者	7
2.2.3 CIE 三刺激值和色度坐标	8
2.2.4 CIE 均匀颜色空间	9
2.2.5 色差公式	11
2.2.6 色貌模型	16
2.3 颜色测量	21
2.3.1 CIE 标准测量几何结构	21
2.3.2 颜色测量仪器	22
2.4 心理物理学实验方法	23
2.4.1 心理物理学理论	23
2.4.2 心理物理量表	26
2.4.3 心理物理学方法	26
2.4.4 统计测量	27
2.5 小结	28
第3章 设备特性	29
3.1 概述	29
3.2 显示器特性模型	29
3.2.1 Gamma 模型	30
3.2.2 GOG 模型	31
3.3 印刷系统特性模型	32
3.3.1 物理模型	32
3.3.2 多项式回归法	32
3.3.3 LUT 与四面体插值法	33
3.4 显示器特性分析	34
3.4.1 显示器特性	34
3.4.2 特性模型	38
3.5 打印系统特性分析	40
3.5.1 测试卡	40

3.5.2	HP 喷墨打印机特性	41
3.5.3	三星照片打印机的特性	44
3.5.4	特性模型	45
3.6	小结	46
第 4 章	色彩管理	47
4.1	概述	47
4.2	ICC 色彩管理	47
4.2.1	ICC 规范	47
4.2.2	特性文件	49
4.2.3	ICC 的发展	50
4.3	系统流程	50
4.4	系统评估	53
4.4.1	实验样本	53
4.4.2	实验 A: 颜色匹配度实验	54
4.4.3	实验 B: 颜色真实度实验	56
4.4.4	实验 C: 颜色偏好度实验	56
4.4.5	实验数据	57
4.4.6	实验结果	57
4.4.7	结果讨论	60
4.5	小结	61
第 5 章	图像分类	62
5.1	概述	62
5.2	图像特征	63
5.2.1	明度特征	64
5.2.2	色度特征	65
5.2.3	频域特征	66
5.3	图像分类算法	67
5.4	分类算法的评估	70
5.5	小结	71
第 6 章	色域映射	72
6.1	概述	72
6.2	色域映射	72
6.2.1	色域边界	74
6.2.2	颜色空间	75
6.2.3	色域映射算法	75
6.2.4	图像特征与色域映射	79
6.3	图像无关的色域映射算法	81
6.3.1	明度的线性映射	81
6.3.2	色度的非线性压缩	82
6.3.3	沿等色度线的明度映射	83
6.3.4	其他颜色的映射	85
6.4	图像相关的色域映射算法	86

6.4.1 图像的 3D 直方图	86
6.4.2 图像自适应色调曲线	88
6.5 色域映射算法的评估	88
6.6 结果与讨论	92
6.6.1 数据分析	92
6.6.2 观测精度	92
6.6.3 颜色匹配实验结果	93
6.6.4 颜色偏好实验结果	96
6.7 小结	98
第 7 章 图像差异性评估——主观实验	99
7.1 概述	99
7.2 图像样本	100
7.3 实验方法	102
7.4 实验结果	103
7.4.1 量值转换	103
7.4.2 观测精度	104
7.4.3 显著性区域	105
7.5 结果分析	107
7.5.1 权重的作用	107
7.5.2 显著性区域的作用	108
7.5.3 复制方法的作用	110
7.6 小结	110
第 8 章 图像差异性评估——客观算法	112
8.1 概述	112
8.2 对比度敏感函数	112
8.3 空域模型	114
8.3.1 S-CIE LAB 模型	114
8.3.2 iCAM 模型	115
8.3.3 空域模型的缺点	117
8.4 自适应双边滤波器	117
8.5 观测距离的适应性	119
8.5.1 图像样本	119
8.5.2 实验方法	121
8.5.3 实验结果	122
8.6 图像内容的适应性	125
8.7 算法性能的测试	125
8.8 结果分析	127
8.9 小结	129
附录 术语中英文对照表	131
参考文献	136

第1章 简介

1.1 概述

得益于电子、通信、计算机等技术的发展,在图文等相关工业领域,尤其是在图像的感知、传输、复制、处理等技术方面,在过去的一二十年间取得了长足的进步。计算机技术以及电子产品的更新换代,使得图文信息的存储、交换、复制从黑白世界进入到彩色世界,人们更倾向于使用彩色图像来完成信息的存取和交换。彩色图像已经被广泛地应用于教育、娱乐、商业、医疗、科学等广阔的领域。为了更好地满足应用的需求,实现高质量的彩色图像的感知、传输、复制已经成为各类应用中关键的技术保障。

面向的应用不同,使用的设备不同,或者涉及的传输复制媒介不同,为彩色图像的传输复制等工作带来了很大的挑战。由于不同的设备对颜色的复制机理不同,造就了不同的设备对同样的颜色可以产生大相径庭的复制结果。例如,显示器是基于 RGB 三原色的加色原理实现对颜色的输出,而打印机多是根据 CMYK 的减色原理来实现对颜色的复制,因此基于显示器特性而设定的颜色在打印机上输出时,其颜色将与显示器上的表现有所不同。在大多数情况下,不同的设备对于同样的输入颜色,其输出的结果差距还非常大。对于产品的终极用户来说,他(们)关注的只是对同一幅彩色图像在不同设备上的一致性输出或者是赏心悦目的感受。对于产品的设计生产人员,他(们)希望能够预测不同设备上颜色的输出,从而可以找到方法来至少能够保证同一种设备上颜色输出的一致性。

无论是设备制造厂商,还是科研机构,他们均进行了大量的尝试,试图从技术上克服这一挑战。其中的一种技术方案,色彩管理,获得了相当多的关注与研究,尤其是近些年,国际色彩协会(ICC)在基于主流设备厂商的协商论证基础上提出的色彩管理规范,已经逐步在各类设备系统中应用起来。色彩管理的核心目的是实现不同设备系统间的色彩输出的一致性,其关键是解决不同的设备复制颜色的能力上的差异。由于不同的设备具有不同的色域导致了其对颜色复制的不同,因此,色彩管理中往往会采用色域映射算法以尽可能实现色彩输出的一致性。

到目前为止,出现在文献中的色域映射算法有数十种之多,这其中大多数算法的目标是在不同设备之间可以较好地实现任何图像的颜色复制。然而现实中很难实现适用于任何图像及任何应用的色域映射算法,或者说到目前为止还没有一种算法具备普遍适用性。比如,家庭娱乐系统对图像复制的要求与商业活动中对图像复制的要求会有很大不同,服装生产和电子设备生产中对颜色的复制也有不同的要求,我们没有必要花费高昂的代价去研究一种适用于任何情况的算法,因此,色域映射算法的研究目前普遍专注于面向图像特征,或者说针对图像中的共性特征。基于图像特征信息实现在不同设备间的颜色转换,常被称做是图像相关型色域映射算法。该种算法被普遍认为可以改善彩色图像复制后的图像

质量，然而这一类的色域映射算法，需要对图像进行预处理，即能够预先百分之百地将图像根据特征成功分类。

图像复制中另外一个重要的技术环节是针对复制的图像所进行的质量评估，由于人的视觉系统对于颜色变化的敏感性，在对复制的彩色图像质量进行的评估过程中，颜色的差异(色差)占据了至关重要的角色。对于色差的研究已经进行了数十年，相关人员已经研究出或者陆续开发了面向不同应用的各种色差算法，并且有众多国际组织推荐的色差算法作为行业标准被广泛使用。然而色差算法的研究是基于人的视觉系统对于均匀着色的色块的主观色差评估，从彩色图像本身来讲，其复杂程度远非均匀着色的色块可比，对于彩色图像复制的质量评估主要是以人的视觉系统的主观评价为主要方法。显而易见的是，该方法将会耗费大量时间与人力，并不适合于现代化的大生产，无法适用于更广阔的应用中。实际应用中需要能够更加高效、便捷、可靠地进行图像质量评估的客观算法，以取代主观视觉评价。

1.2 图 像 复 制

跨媒介的彩色图像复制(也称做跨媒介的彩色图像再现)，目的是能够准确地将原始景物按照预设的目标复制到不同的媒介上，比如自然风景在照相机、显示器或者打印机等媒介系统的再现。其中的颜色再现是颜色信息从源媒介传输到目标媒介并实现了二者之间预定义的转换关系的过程。Morovic^[1]根据 MacDonald^[2]的颜色复制五步法理论提出了可用于彩色图像复制的六步法流程。如图 1.2.1 所示，该图像复制流程中包括了六个核心转换过程，即正向设备特性模型、正向色貌模型、图像增强算法、色域映射算法、逆向色貌模型及逆向设备特性模型。

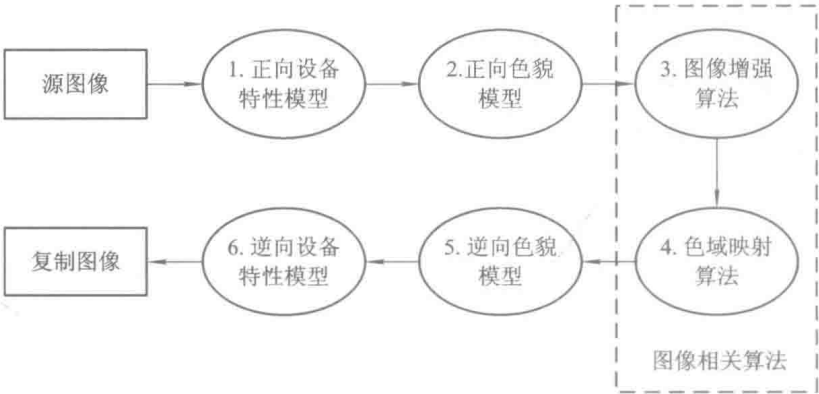


图 1.2.1 跨媒介彩色图像复制六步法

在上述的六步法彩色图像复制流程中，来自于输入设备(即源媒介)的源图像，是以该设备的颜色机制表示，比如表现在显示器上的源图像通常是以 RGB 的形态存在，因此源图像常被称做设备相关型。当对该源图像使用不同设备(如打印机)进行再现时，首先需要将设备相关型图像信息转换为设备无关型图像信息。图 1.2.1 所示的第一步，即正向设备特性模型可用于完成该转换，这里所谓的正向指的是由设备相关型向设备无关型的转化，该模型提供了在观测感知条件受控的状况下，设备间图像颜色信息的可靠转换。然而，彩

色图像的复制并不总是在简单受控的条件下完成,很多时候,源场景和目标场景的观测条件并不相同,因此在步骤二需要引入正向色貌模型以实现图像的颜色感知属性在不同观测感知条件下的转化。由于不同设备具有不同的颜色再现能力,在图像复制流程中通常需要引入色域映射算法处理源图像中不能被目标设备再现的颜色。另一方面,由于图像复制的目标不同,或者说复制后的图像的用途不同,所以在复制过程中,也会涉及对图像的视觉可感知信息的增强或者是对某类特定信息的增强,而这些均需要在色域映射算法之前实现。最后,为了在目标设备上再现出源图像,在上述流程中还需要逆向色貌模型以及最后的逆向设备特性模型将设备无关型图像信息转换为目标设备相关型图像信息。

1.3 章节结构

关于颜色再现或者彩色图像复制,国内外有大量的研究论文进行了广泛讨论,而系统性的专著并不多见,反而是与之相关的色彩管理方面的文章与书籍出版了很多。本书内容的不同之处在于它完整地介绍了彩色图像复制流程中的关键技术,尤其是与颜色再现相关的理论、算法等相关研究内容,并结合大量实验来测试理论及算法的有效性。

书中内容及章节安排如下,首先在第2章介绍了本书涉及的一些基础知识,尤其是色彩学相关的基础知识,主要包括CIE色度学的基本内容,CIE标准体系、颜色测量、色差、色貌模型以及实验心理物理学等。

根据1.2节中关于图像复制过程的阐述,我们可以看到在流程中,设备特征模型是不可或缺的内容,该模型将设备相关型图像表述信息转化为设备无关型表述信息,从而可以进行后续统一处理,因此,在第3章,针对图像的复制过程中使用到的显示器和打印机的系统校准以及特征模型的构建进行了较为细致的介绍。第4章描述了基于图像的色彩管理系统的基本构成及对该系统中核心算法的实验验证。

彩色图像复制的核心流程之一是能够将源图像按照使用需求复制到目标设备上,而实现这一过程需要引入色域映射算法,即对颜色进行再现。本书提出的色域映射算法是基于图像特征的算法,需要对图像进行分类预处理,因此,在第5章对图像分类算法进行了描述,该算法将图像根据其内容分为自然图像(Pictorial Image)与商业图表(Business Graphics),这两种图像也是图像复制应用中最常用到的两类图像。在成功地将图像分为自然图像与商业图表的基础上,针对这两种图像应用了不同的色域映射算法。第6章针对设备的色域、色域边界的计算及色域映射的基本原理与算法进行了详细介绍。

复制后的图像是否能够满足应用要求,如何对复制后的图像质量进行评价,如何比较复制后的图像与源图像之间的差异,是图像复制等应用中的关键环节。正如前文所述,人的主观视觉判断仍然是目前主要的评判手段,而对于图像质量或者是图像差异性的客观评估算法的研究与开发一直是相关科研人员的主要努力方向,也是相关产业的迫切需求。本书第7章对图像差异性主观评估实验进行了深入的探索,针对主观实验中对图像差异性判断的视觉关注度,即视觉感兴趣部分在主观判断中所起到的作用进行了深入的调查。第8章根据对图像差异性的主观视觉评价实验的研究,建立了对图像观测感知条件和图像特征能够自适应的图像差异客观评价算法,该算法的性能与图像复制中广泛讨论与使用的色差公式、S-CIE LAB、iCAM等算法的性能相比具备一定的优势。

第2章 色彩学导论

2.1 概 述

色彩学顾名思义就是研究颜色的科学,本章将从以下几个方面对色彩学的基础内容进行逐一介绍,包括色度学、色彩测量和心理物理学方法。

虽然我们对于颜色的感知很直接,也可以毫不费力地进行识别,然而到目前为止,从科学角度仍然不能对人类是如何实现色彩感知做出精确的解释。我们建立的对颜色的认知,大多是基于实验上的认知,虽然它并不精确,但是基于大量的实验观测,我们还是建立起了色度学的理论基础。色度学是一门研究颜色测量的科学,虽然在几十年的发展过程中,也出现了各种色度体系,但是发展到今天,CIE色度体系得到了广泛的接受和使用。CIE色度体系为本书所研究的内容提供了最基本的科学定义,因此在本章节将首先针对CIE在表色体系、三刺激值的计算、色度坐标系和均匀颜色空间等方面的规范或者建议做系统介绍。其中,由于色貌模型CIECAM02在本书涉及范围较广,将对它的计算进行细致的描述。针对图像色彩差异中广泛使用的色差公式在本章也给出了相应的讲解。

色度学是建立在实验及主观观测基础上的科学,实验及实验分析方法对于本书中涉及的研究至关重要,它直接决定了实验结果的可信度。心理物理学方法是色度学研究领域主要使用的实验方法,为了便于理解相关的实验,因此有必要在本章对心理物理学理论及其测定方法进行介绍,并对配对比较法(Paired Comparison)和分类判断法(Categorical Judgement)进行细致阐述。毋庸置疑,实验结果的统计分析对于研究具有重要作用,本章最后对广为接受的统计学方法进行了具体介绍。

2.2 CIE色度学

CIE色度学,或者说CIE的色度规范(本书基于CIE 2004规范展开讨论),是由国际照明协会(Commission International de l'Eclairage)对在受控的观测条件下表示色刺激所提供的标准方法学。现代色度学采用了CIE所推荐的颜色测量原理与实验观测条件等计量方法,CIE推荐了两套体系,分别是CIE1931标准色度系统和CIE1964标准色度系统。在本节将针对CIE色度学的标准光源、标准色度观察者、均匀颜色空间、色差公式及色貌模型展开介绍。

2.2.1 光源和CIE标准照明体

宇宙间的物体有的是发光的(在此指可见光),有的是不发光的,凡物体本身能发光的则称做光源。光产生于光源,有光才会有颜色。在物理学上,照明体(Illuminant)是指物理

的辐射源(比如蜡烛、灯泡或者太阳),其特性可以由功率随波长变化的曲线,即光谱功率分布(Spectral Power Distribution, SPD)曲线进行数值表述。光谱功率分布曲线是按照辐射功率给出,它描述了一个发光体在单位面积单位波长上的功率,因此也被称做是相对光谱功率分布曲线。对于色度相关的计算,不必使用绝对光谱功率分布曲线^[3]。CIE 及国际标准化组织(ISO)为了方便计算色度值,提供了标准照明体的相对光谱功率分布曲线数据。CIE 的标准照明体只是根据理论统计值计算得出的光谱功率分布而定义,因此在现实中,某一 CIE 标准照明体并不一定会存在着相对应的物理光源。

对于光源和标准照明体通常使用色温值来度量。色温是光学中用于定义光源颜色的一个物理量,即一个理想黑体的温度。该理想黑体发射的光的颜色与该光源所发射的光的颜色相同时,这个理想黑体的温度称之为该光源的颜色温度,简称色温,其单位用 K(开尔文)表示。所谓黑体,即完全辐射体,也称做普朗克辐射体,是一个理想的物理体,它可以吸收所有的入射的电磁辐射,无论其波长和入射角是多少。

下面着重对常用的 CIE 标准照明体加以介绍。

1. CIE 标准照明体——D 系列

标准 D 系列照明体对应着日光(Daylight),也就是太阳光,由日间所有直接或间接照射的阳光所构成,它包括了直接的阳光、漫射的空间辐射以及那些来自于地球及地面物体的反射。由于日间的阳光随太阳高度的变化而变化,随着气候条件的不同而不同,因此日光的相对光谱功率分布是非常易变的。CIE 由此推荐了几个不同的标准照明体来对应于一天中不同状况下的日光的色温变化^[4]。

标准照明体 D50 代表了温暖的室内日光(色温:5003K),它被广泛地用于印刷相关行业或者平面艺术产业。标准照明体 D55 表示了太阳光与天空光的混合体(色温:5504K),通常用于日光型胶片。标准照明体 D65 是色度学上使用最普遍的光源,它表示平均的室内日光(色温:6504K),有时也称做人工日光。在本书中,它也被用于判定图像色差的心理物理实验中。标准照明体 D75 定义了偏冷的室内日光(色温:7504K),通常用于对黄色的关键性检查中。CIE 定义的 D 系列标准照明体的缺陷是,现实中对应的物理光源不能精确地再现它们的光谱功率分布曲线。图 2.2.1 给出了以上 CIE 标准 D 系列照明体的相对光谱功率分布曲线。

2. CIE 标准照明体 A

CIE 标准照明体 A 代表了典型的家用的钨丝灯光,它的相对光谱功率分布与色温大约为 2856K 的普朗克辐射体的相对光谱功率分布相当。该标准照明体被 CIE 推荐用于任何使用白炽光的应用场合,除非有特殊的原因一定要使用其他某种特定照明体。图 2.2.1 中也示出了标准照明体 A 的相对光谱功率分布曲线。

3. CIE 荧光照明体

对于荧光灯,CIE 也推荐了相应的标准照明体及其相对光谱功率分布曲线,并推荐其中的四个——F2、F7、F8 以及 F11 作为一般用途上的照明使用。照明体 F2 代表典型的冷白色荧光灯(Cool White Fluorescent, CWF),为北美的办公场所或商场照明所使用。照明体 F7 表示宽波带荧光灯,经常用做标准照明体 D65 的替代光源。照明体 F8 代表宽波带荧光灯,经常用做标准照明体 D50 的替代品。照明体 F11(TL84)表示窄的三波段荧光灯,通

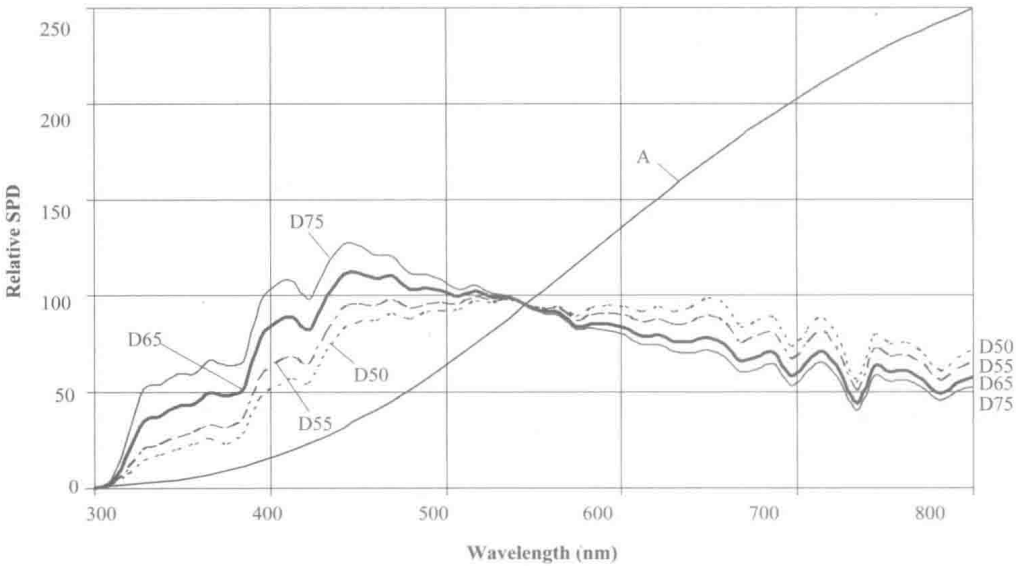


图 2.2.1 CIE 标准照明体 D50、D55、D65、D75 与 A 的相对光谱功率分布
常用于欧洲或东亚等区域办公场所的照明。图 2.2.2 中标示出了以上四种荧光照明体的相
对光谱功率分布曲线。

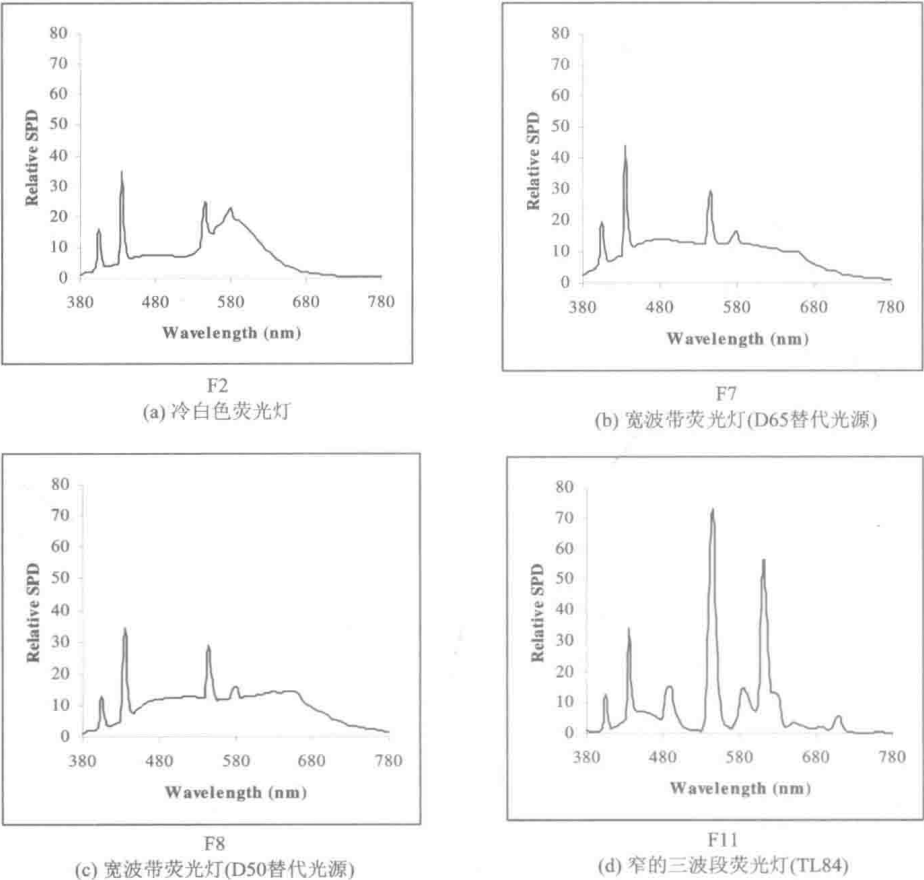


图 2.2.2 CIE 标准荧光照明体 F2、F7、F8、与 F11 的相对光谱分布曲线

2.2.2 CIE 标准色度观察者

无论是对颜色的表述,还是对颜色的测量与标定,均需要与人的视觉系统的主观观察结果一致才具备实际使用意义。CIE 表色系统中一个重要的要素是 CIE 标准色度观察者。CIE 标准色度观察者的设定可以追溯到 20 世纪 20 年代, W. D. Wright^[5] 和 J. Guild^[6] 分别在 1928 年和 1931 年独立地进行了一系列有关人的色彩视觉的实验,即颜色匹配实验 (Color Matching Experiment)。在他们所进行的这些实验的过程中均分别使用了视场角为 2° 的圆分割屏幕,之所以使用该视场角是因为它是人眼视网膜上的黄斑中心凹的角度大小。基于这些实验得到的结果, CIE 推荐了 CIE1931 标准色度观察者 (2° 观察者) 用于视野大小在 1° 到 4° 之间的颜色匹配。CIE1931 标准色度观察者实质上是一组 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 和 $\bar{b}(\lambda)$ 的函数,分别标定了波长为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm 的红色、绿色和蓝色的三原色,并将三原色的单位调整为三者等量相加合成的等能量白光。该函数组中横坐标表示光谱波长,纵坐标表示用以匹配各光谱色所需要的光谱三刺激值,这些值是以等能量白光为标准的系数,是上述实验结果的平均值。该函数组为了匹配在波长为 435.8 nm 和 546.1 nm 之间的光谱色,出现了负值,这就意味着匹配这个区间中的光谱色时,混合颜色需要使用补色才能匹配,这给使用上带来了不便。为了避免该色度观察者方程式中的负数, CIE 通过非线性数学变换得到了一套新的函数组,即 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$,分别对应着三种想象出的基色 X、Y 和 Z,即 CIEXYZ 系统。图 2.2.3 中的实线部分表示 CIE1931 标准色度观察者。

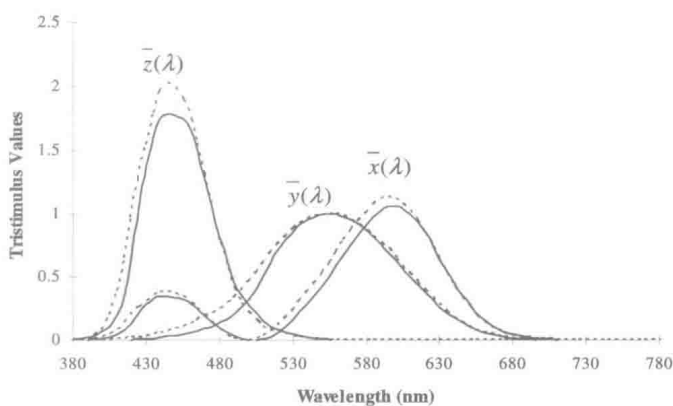


图 2.2.3 CIE1931(实线部分)和 CIE1964 (虚线部分)标准色度观测者

当视野大于 4° 时,由于视网膜中杆体细胞 (rods) 的大量参与以及黄斑中心凹的影响,因此色视觉会发生变化。1958 年, W. S. Stiles 和 J. M. Burch^[7] 在颜色匹配实验中使用亮度非常高的照明体以降低人眼视网膜中杆体细胞的干扰,并且通过计算方法去除几乎可以忽略不计的杆体细胞的作用。1959 年, N. I. Speranskaya^[8] 在相对较低的照明度条件下使用 10° 视野测量了颜色匹配函数。CIE 通过去除后一个实验中的杆体细胞的影响,并在上述两个实验结果的基础上取平均值,推导出了 CIE1964 标准色度观察者 (即 10° 观察者) 作为 CIE1931 标准色度观察者的补充,推荐用于要求精确计算的相对较大视野的视觉颜色匹配的实验中。图 2.2.3 中的虚线表示 CIE1964 标准色度观测者。

2.2.3 CIE 三刺激值和色度坐标

CIE 表色系统通过 CIE 三刺激值——X、Y、Z，为颜色和光提供了数值描述。CIE 三刺激值可以通过式(2.2.1)计算得到，即

$$\begin{cases} X = k \sum S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda) \\ Y = k \sum S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda) \\ Z = k \sum S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda) \end{cases}$$

(2.2.1)

其中， $k = \frac{100}{\sum S(\lambda)\bar{y}(\lambda)}$ 。

式(2.2.1)中， $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 即是图 2.2.3 中的 CIE 标准色度观察者， $S(\lambda)$ 表示刺激色的光谱功率分布， $R(\lambda)$ 对应着某一波长的光反射值。通过引入常数 k ，将 $Y=100$ 作为近似的参照白色。CIE 定义的所有其他颜色空间都可以由公式(2.2.1)推导得出。

根据 CIE 表色系统，在同样的观测条件下，如果两个颜色的色度刺激值相等，则这两个颜色匹配。CIE 使用 CIE XYZ 导出的色度坐标系来定位每一个独立的颜色。该坐标系可使用式(2.2.2)计算得到，即

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad x+y+z = 1$$

(2.2.2)

在图 2.2.4 中，所有可被人的视觉系统感知的颜色都在马蹄形轨迹所圈定的范围内，该马蹄形轨迹由纯粹的单色调光谱色描绘而成，即不同的点代表不同波长的光谱色，也是饱和度最高的颜色，其中底部的直线将极值红色与极值蓝色的色度坐标连接起来。必须指出的是，在色度图中，不同的标准观测者可能会略有差别。从图中可以粗略地看出，某一种颜色的刺激纯度越靠近马蹄形的边缘，该颜色的刺激纯度越高，越靠近色度中心的白点，即坐标点(1/3, 1/3)，颜色越接近中性灰色。

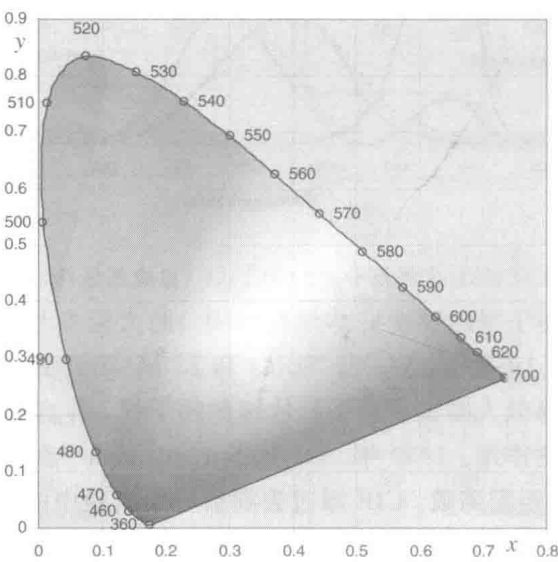


图 2.2.4 CIE_{xy} 色度坐标系

尽管 CIE XYZ 颜色空间成功地解决了颜色的量化表示与计算,但是它的视觉感知均匀性很差。也就是说,在该颜色空间内同样的空间距离在不同的区域表示的色差不同,这一点可由 Wright 和 MacAdam^[9] 分别做的视觉观测实验所证明。

为了改善 CIE XYZ 颜色空间的视觉感知均匀性, CIE 在 1976 年,推荐了一个新的坐标系。CIE 通过使用式(2.2.3)的线性变换得到了 CIE $u'v'$ 坐标系,也被称做 CIE 1976 均匀颜色坐标系(或称做 CIE 1976 UCS)。图 2.2.5 示出了该坐标系,该系统在视觉感知上比 CIE 的 xy 坐标系均匀性要更好。

$$\begin{cases} u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{cases} \quad (2.2.3)$$

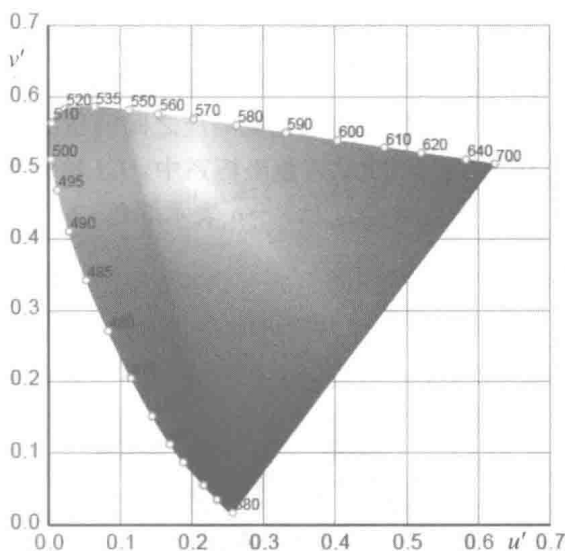


图 2.2.5 CIE $u'v'$ 色度坐标系

2.2.4 CIE 均匀颜色空间

虽然 CIE $u'v'$ 坐标系的视觉均匀性要好于 CIE xy 坐标系,但是两者的共同缺陷是只有色度信息而缺少明度(Lightness)信息,因此,建立一个新的坐标体系很有必要,从而引入明度信息。CIE 于 1976 年推荐了两个视觉感知均匀性更好的颜色空间: CIE $L^*a^*b^*$ (或 CIE LAB) 和 CIE $L^*u^*v^*$ (或 CIE LUV)。在这两个体系中,颜色被定义在了三维空间,空间中的坐标点可用于表示一个颜色的三个视觉感知属性:明度、色相及色度。CIE 给出了这三个视觉感知属性的精确定义:

明度 (Lightness)——被判断区域的亮度 (Brightness) 与另一个参照区域的亮度 (Brightness) 的比值,该参照区域必须表现为白色或者是高度透光的。

色度 (Chroma)——被判断区域的色彩度 (Colorfulness) 与另一个参照区域的亮度 (Brightness) 的比值,该参照区域必须表现为白色或者是高度透光的。

色相 (Hue)——视觉感知属性,某一区域表现为可视觉感知的颜色,红色、黄色、绿色

和蓝色中的一个或者两个的混合。

CIE LAB 颜色空间来源于对 ANLAB 颜色空间的简化, 是对三刺激值 CIE XYZ 颜色空间的非线性变换, 即

$$\begin{cases} L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b^* = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \\ f(I) = \begin{cases} (I)^{1/3} & I > 0.008\,856 \\ 7.787(I) + 16/116 & I \leq 0.008\,856 \end{cases} \end{cases} \quad (2.2.4)$$

式中, X 、 Y 、 Z 表示颜色样品的三刺激值, X_n 、 Y_n 、 Z_n 表示同样照明条件下一个完全漫反射体表面的三刺激值。首先通过将三刺激值做归一化处理(即 X/X_n 、 Y/Y_n 、 Z/Z_n), 使用 vonkries^[11] 色适应变换函数, 然后再通过 CIE LAB 公式中的立方根函数进行非线性压缩。这个非线性变换被设计用来为物理量测量与视觉响应之间的压缩响应建模。

在图 2.2.6 所示的 CIE $L^* a^* b^*$ 三维直角坐标系中, L^* 轴为明度轴, 表示明度变化从 0 到 100; a^* 轴表示红绿色轴, $+a$ 表示红色, $-a$ 表示绿色; b^* 轴表示黄蓝色轴, $+b$ 表示黄色, $-b$ 表示蓝色。

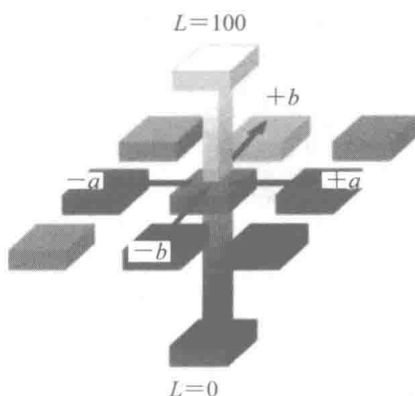


图 2.2.6 CIE1976 $L^* a^* b^*$ 均匀颜色空间

CIE LUV 颜色空间始自 CIE 1964 $U^* V^* W^*$ 颜色空间, 后者是由 Wyszecki^[12] 在 1963 年提出并且在 1964 年被 CIE 所采纳。CIE LUV 可由式(2.2.5)计算得到。

$$\begin{cases} L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ u^* = 13L^* (u' - u'_n) \\ v^* = 13L^* (v' - v'_n) \\ f(I) = \begin{cases} (I)^{1/3} & I > 0.008\,856 \\ 7.787(I) + 16/116 & I \leq 0.008\,856 \end{cases} \end{cases} \quad (2.2.5)$$

式中, Y 表示颜色样品的三刺激值中的 Y 值, u' 和 v' 对应式(2.2.3)中获得的色度坐标, Y_n 、 u'_n 、 v'_n 分别表示同样照明条件下一个完全漫反射体表面的三刺激值中的 Y 值和其色度