

色彩管理的体系机理与模型分析^{*}

柴啸龙^{1,2} 罗笑南¹

(中山大学计算机应用研究所 广州 510275)¹ (广东商学院数学与计算科学系 广州 510320)²

摘要 彩色图像在不同 I/O 设备中的色彩表达基于不同色域机制,即使基于相同色域的不同设备常常又有较大的特性差异,因此在不同图像设备和系统平台间提供高品质的色彩再现一直困扰着工业界。该文对目前各种色彩管理体系机理及模型进行了系统的分析,评价和总结,对典型方法分析归纳了主要思想和机理。对研究和应用现状进行了系统总结。最后通过对目前存在问题的分析,指出今后研究出路及应用趋势。

关键词 色彩管理,色彩再现,色域匹配,设备特性

The Analysis of Mechanism and Model of Color Management

CHAI Xiao-Long^{1,2} LUO Xiao-Nan¹

(Computer Application Institute, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510275)¹

(Mathematic and Computing Science Department, Guangdong Commercial College, Guangzhou 510320)²

Abstract Color images showed by different devices are based on various systems of color gamut, yet even given the devices based on the same gamut we also cannot get the very reproduction of the original one because of the character distinctness among devices, so the problem of getting high quality of color reproduction by the other services is always puzzling the industries. With our analysis, appraises and the summaries, the popular methods for the color management study also some of the technical models are exposed in this paper, after summarizing, we get the main idea and the mechanism of the popular ones based which we show the current state of the studies and the applications of color management. The further step of the study in this area and the ways of future application are also given in this paper.

Keywords Color management, Color reproduction, Gamut mapping, Device character

1 引言

色彩管理(Color Management, CM)是对色彩技术研究和应用的集成体系。CM 是图像处理领域中新兴但发展迅猛的前沿学科,1998 年, SIGGRAPH 将 CM 正式纳入计算机图形学领域,这标志着 CM 开始成为图形图像学界又一重要研究内容。CM 是综合性很高的交叉学科,它涉及了色度学、计算机图形学、光学、计算数学、视觉生理学及印前科学等多个领域。CM 是对色彩的准确度量、色彩校验、色彩调适和在不同设备上不同观察条件下保真再现等课题进行研究的一门综合学科。目前 CM 已逐渐成为热门研究领域。

为便于研究 CM 和统一其技术的规范标准,国际上成立了专业组织国际色彩联盟 ICC(International Color Consortium)和国际照明委员会 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)。ICC 定义了设备色彩特性的标准描述,制订了一整套面向设备和操作的色彩标准规范,并试图提供一套贯穿整个色彩再现过程的标准机制。CIE 虽致力于光科学和照明科学,但它长期以来制订发布的 RGB, XYZ, LAB, LUV 等列表色体系奠定了色科学理论基石,其中 LAB 和 LUV 等设备无关表色体系完全涵盖且大大超出目前所有基于设备体系的色域, CIE 的标准设备无关空间不仅为设备相关色域间提供中间转换平台,更为设备的色彩表达特性提供了标准描述。另外 CIE 从 1996 年开始研究的色彩外观模型(Color Appearance Model, CAM)对不同观察条件和不同光源下的色彩

调适(Chromatic Adaptation)和色彩再现(Color Reproduction)都取得了开拓性进展。

在不同图像 I/O 设备上实现色彩再现是 CM 研究的重点和难点。不同设备表达色彩基于不同色域机制,显示器基于 RGB 色域,印刷机基于 CMYK 四色空间,打印机色域最复杂,从简单 CMY 三色域,常用的 CMYK 四色域,到复杂的 CMYKcm 六色域,甚至 CMYKcmk 七色域等。即使基于相同色域的不同设备又有较大设备特性和色彩表达能力差异^[1]。另外度量色彩有不同表达体系,如设备无关表色体系的 CIELab, CIE Luv 等,虚设备相关空间 Munsell 体系, HSV, HLS, HSB 和 HIS 等体系。要在不同色域体系下,不同 I/O 设备间实现高品质色彩再现必须由相应 CM 模块处理,如图 1 所示, CM 已成为色彩处理及图像设备不可或缺的一部分。

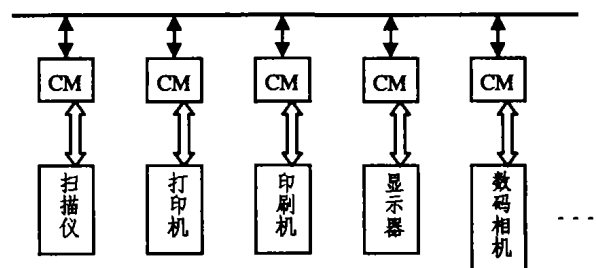


图 1 色彩管理应用图

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(69933030, 60273063);国家 863 高科技发展计划资助项目(863-317-01-04-99, 863-306-ZT06-07-02);国家“九五”重点科技攻关项目(98-780-01-07-03)。柴啸龙 硕士,助教,主要研究领域为图像处理。罗笑南 博士,教授,博士生导师,主要研究领域为三维 CAD,信息安全系统,多媒体技术。

目前,由于认识到CM在图像处理、色彩再现与色彩调适等领域巨大的应用前景,CM的研究愈加被许多大学、研究机构和工业界重视,其中著名的有美国RIT的The Munsell Color Science Lab,美国UC Irvine的The Vision Research Group和英国Color and Imaging Institute of Derby University等。本文以CM主要机理框架为线索,对CM主要研究进行了系统综述和分析,随后对CM典型应用模型分类加以细致讨论。最后通过对CM特性和存在问题的分析,指出了今后研究重点和应用趋势。

2 CM机理及色彩再现

从处理范围和功能看,CM有调适性、移植性、开放性和实时性等显著特性,要达到这些特性就需要不断从色彩特性中探索有用的隐喻机制,从而获得解决色彩再现等问题的有效途径。为了便于刻画CM研究范畴中主要机理的相互层次关系,在图2中我们以金字塔的形式对CM主要机理进行了展示。下面对CM中各典型隐喻机制进行讨论。

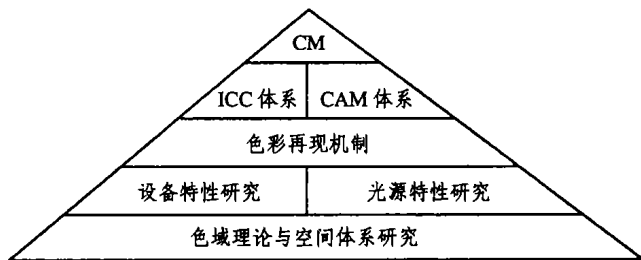


图2 CM机理层次图

2.1 色域空间理论

色彩有连续变化特性,基于此特性可用色域空间方式量化描述色彩表达及范围。从不同量化方法和角度目前已构造出很多色域空间,对其拓扑同构性的研究是目前的重点和难点。下面就从色彩设备表达特性角度对不同色域空间进行讨论。

2.1.1 设备相关色空间 设备相关色空间(Device Dependent Color Space, DDCS)是基于设备实际表达方式的色空间,主要有RGB空间及CMYK空间。

RGB体系是CIE基于W. D. Wright和J. Guild颜色匹配视觉实验^[2]制订的表色系统。主要由显示器、扫描仪、数码相机等电子图像设备使用。它利用不同强度红、绿、蓝来复合各色彩。RGB体系优点是精度和广度非常高,在物理设备上就可表达超过1667万种不同色彩,它对色彩色度、亮度、饱和度都有非常好的展现。基于RGB体系的图像设备能进行很细微调校。RGB体系缺点是对设备依赖性较大,这在伽玛校正上能充分体现^[3],这是再现中重要考虑因素。另外RGB体系在Euclid拓扑空间下的色度图会出现负值域,这对研究计算和推广理解都带来不便。

输出物理图像的印刷机、打印机等设备主要使用CMYK体系。该体系原理是利用油墨对光线的吸收特性。当复合光射到油墨上时,部分光谱被吸收,未被吸收的光谱重新复合射入眼睛。CMYK体系有很多局限。理论上,CMY三颜料通过不同调配能吸收各种光谱的光,可产生纯黑。由于杂质,CMY三墨实际调不出纯黑。黑墨(K)的参与不仅能给出像样黑色,而且用一定黑墨取代部分CMY复合墨的灰成分替代技术(GCR)不仅省墨^[4],主要能降低图像色偏,图像整体稳定性提高很多,但它也使CMYK体系的标准化更困难。使用不同种

类油墨不仅影响图像表达,还会影响对CMYK的转换算法和调配策略^[5]。依赖纸张和油墨特性的CMYK体系传统久,现在依然是解决图像物理化问题的唯一现实方法。

2.1.2 设备无关色空间 设备无关色空间(Device Independent Color Space, DICS)是不依赖于具体设备的标准色空间,它是理论研究与应用转化的重要工具。

CIE1931XYZ体系是CIE在RGB体系基础上为便于计算和理解,利用假想三原色XYZ建立的色系统。理论上,XYZ系统有RGB系统所有优点,也避免了RGB体系在Euclid拓扑空间下色度图负值域现象。但由D. L. Macadam色度标准差体系验算发现它有一定局部不均匀性,为了克服色域的不均匀性,CIE发布了CIE1976L*a*b*和CIE1976L*u*v*两个均匀表色系统。

CIE1976L*a*b*系统基于G. Wyszecki提出的均匀色空间体系制订。该空间色彩表达范围很广,完全涵盖了RGB和CMYK色域空间(见图3)。分析表明,该空间不仅有很好色彩均匀性,而且当色彩色差大于视觉识别阈限而又小于Munsell系统中相邻两级色差值时,能较好反映物体色心理感受效果。缺点是蓝色附近色域色调稳定性差^[6]。不过最近的研究发现借助近似圆锥体空间可以改进^[7]。

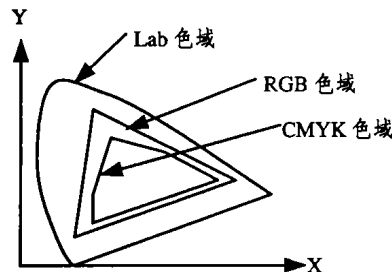


图3 CIElab, RGB和CMYK色域基本范围

CIE1976L*u*v*是CIE同期发布的另一匀色空间^[8],其突出优点是u*v*色度图仍有马蹄形光谱轨迹,这比较适于光源色研究,但L*u*v*系统负转换局部效果不好。L*u*v*和L*a*b*在视觉上均匀度基本相同,总体性能也难分伯仲,由于工业部门最先选用L*a*b*系统,近些年国际上发表论文也多采用L*a*b*系统,为便于统一度量和方法,国际上开始赞成采用L*a*b*系统。

2.1.3 虚设备依赖色空间 虚设备依赖色空间(Pseudo-Device Dependent Color Spaces, PDDCS)是表达色彩具体物理特性的色系统^[9],但又不像CMYK和RGB直接表达物理设备工作方式。PDDCS主要通过色的三个基本特性:色相、明度和饱和度表达(见图4)。可同DDCS进行色域匹配,因此也可作为DDCS间的中间转换平台。PDDCS主要有Munsell系统,HSV, HLS, HSB, HIS及sRGB等表色系统。PDDCS优点是符合人眼视觉特性,可用来评价DDCS及DICS,但PDDCS同DDCS或DICS进行体系转化不方便。

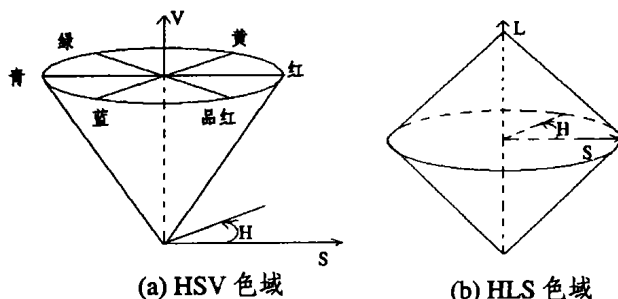


图4 HSV和HLS色域图

2.2 色彩再现

色彩再现是在不同设备上能输出得到一致色彩的技术^[10],由于不同设备基于不同色域表达机制,即使基于相同色域的不同设备又有设备特性差异,因此色彩再现是CM研究重点。评价色彩再现成效可通过L*a*b*系统的色差公式

衡量:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

ΔE_{ab}^* 能反映色彩差异,因此可通过测算平均 ΔE_{ab}^* 来评定图像再现效果(见表1)。

表1 不同平均色差导致的再现效果

平均色差	0.0-0.2	0.2-0.5	0.5-1.5	1.5-3.0	3.0-6.0	6.0及以上
正常感觉	观察不到	极微	轻微	有点明显	非常明显	走色强烈
工业评价	完美	极棒	很好	一般	勉强	失败

在不同设备上实现图像的色彩再现需要依据设备特性,并通过ICC Profile来表达。另外色彩再现效果受光源等观察环境影响,下面分别对它们进行讨论。

2.2.1 设备特性 设备特性是具体设备表达色彩的方式、能力及范围。色彩再现是面向设备的,因此必须测定设备特性。测定和表达设备特性的原理是让设备输入或输出IT8标准色块,然后对输入或输出的各色块测其光谱,并同原先标准色块对比处理。汇总处理后得到设备特性。引入设备特性优点是把现实表达量化展现出来,这为色彩再现提供了实现工具和理论体系。

2.2.2 ICC Profile 为统一CM标准,ICC定义了一系列标准描述格式^[11],进而提供了一套贯穿色彩再现全过程的机制。ICC Profile是ICC定义的在图像传输、转换、显示和输出时描述色彩特性各必要数据和关键机制的规范。实现色彩再现时,首先要取得设备特性,将其放入ICC定制的设备特性Profile中,ICC通过CIELab空间提供两步转化机制:首先将源设备设备特性转化到CIELAB空间,然后依据目的设备设备特性再由标准空间转化到目的设备上。每个ICC设备特性文件(Device Profiles)生成过程中,都会有特定转化模型和算法实现设备特性同标准空间的转化。这些特性描述文档可嵌入图像本身^[11],也可由应用系统或平台统一管理。

ICC Profile最大贡献是为跨设备和操作系统的色彩再现提供统一转换机制和平台标准。它的制订大大增强了CM移植性。使CM开始具有开放性,不再受具体设备限制。具有在多个设备间实现色彩再现的开放性。在设备特性和色彩管理模块(Color Management Module, CMM)存入Profile后,系统具备再现的实时性。

2.2.3 色彩光源 目前研究中,光源主要以矩阵形式表达,用映射转换表达光源影响^[12]。需要分析的光源性质有光源染色性、光源空间分布和校正后的光源不变量。目前研究都假定光源稳定不变,分析光源影响可用两种方式,一是先测定光源各特性参数,然后根据参数直接计算对图像色彩影响。二是向标准光源场景进行匹配转化。前者优点是直接方便,不足是对光源在图像中渲染效果处理不够。后者克服了该缺陷,但不足是匹配转化模型较简单。通过光谱特性研究色彩特性及色彩再现是一个新开拓性领域,通过光谱可将包括视觉刺激系统在内的各色彩处理系统连接起来^[13]。其中色彩的光谱刺激空间累积理论^[4]把图像点视觉效果色值通过光源散发的不同光谱光在该点映射后重新叠加表达,它主要基于以下公式:

$$\begin{aligned} r_i &= \int R(\lambda) S_i(\lambda) E^*(\lambda) d\lambda \\ g_i &= \int G(\lambda) S_i(\lambda) E^*(\lambda) d\lambda \\ b_i &= \int B(\lambda) S_i(\lambda) E^*(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $(r_i, g_i, b_i)'$ 是图像点最终进入人眼的色值, $S_i(\lambda)$ 为该点表面对波长 λ 光的光谱反射率, $E^*(\lambda)$ 为稳定光源 c 下光谱分布函数。该体系原理是利用不同发射光谱反射后的再次复合,系统在实际应用中还有相当误差,需继续修正。其主要贡献是从光谱角度分析光源影响,取得一定开拓性进展。

3 CM体系模型

对于CM领域的问题,国内外有很多不同解决方式和研究方法,有适合研究的体系表达模型,还有全局解决的人工神经网络法。下面对这些典型理论和方法进行讨论。

3.1 色彩体系的理论模型

为便于探讨色彩及其设备特性隐喻理论,G. D. Finlayson, M. J. Vrhel和H. J. Trussell等人在CM研究中前后提出了色彩体系模型的理论表达方法。代表性的模型主要有以下两种:

第一种是由G. D. Finlayson和M. J. Vrhel提出来的。由于设备色域与标准色域都是有限维空间,设备特性和标准色域表达的色彩光谱可用向量表示。设备色域转换到Lab空间下的色彩集合是:

$$G = \{t \in \Omega_{Lab} \mid \exists c \in \Omega_{device} \text{ s.t. } \Phi_{device}(t) = c\} \quad (3)$$

其中 Ω_{Lab} 是Lab空间表达下的色向量集合, Ω_{device} 是设备色域表达方式下色向量集合。 Φ_{device} 是 Ω_{device} 向Lab空间的匹配转换映射。将Lab色域所在线性空间的拓扑距离定义为该空间范数,得到一个Banach空间下的有限闭凸子域,则最优映射 Φ_{device} 可由下式得到:

$$\begin{aligned} \Phi_{device} &= \arg(\min_{\Phi} \sum_{i=1}^{M_p} \|\Phi(c_i) - t_i\|^2), \\ \Phi_{device} &\in \{ \|\Psi(c_i) - t_i\| \leq \delta_v, i=1, 2, \dots, M_p \} \end{aligned} \quad (4)$$

C_i 是 Ω_{device} 的控制点(Key Point), M_p 为其个数,用分光仪测定光谱转化可得到 t_i 值。 δ_v 为误差控制上限。 Ω_{Lab} 到 G 的匹配算法由下式得到:

$$D: D(t) = \arg(\min_{c \in G} \|c - t\|), \forall t \in \Omega_{Lab} \quad (5)$$

由 Ω_{device} , Ω_{device}^{-1} 和 D 就可构成设备特性(Device Profile)。

该模型在匹配方法的理论上有很大开拓,而且能得到很高精度,但其致命缺陷是设备特性直接影响匹配映射算法,这决定了该模型不具备即时性和开放性。可以分析看到,全局映射采用的有限成员向量等价于多项式映射函数,由于在Lab色域上的Banach空间拓扑同构于Euclid空间,因此容易导致局部匹配有龙格现象,可以讨论引入分域样条映射改进。

第二种是由G. D. Finlayson在研究设备色彩特性时提出一个匹配模型^[14],其主要机制如下:

$$\Gamma = \sum_{j=1}^N \{ \|X_j^T - \rho_j^T M\|^2 \} + \lambda \sum_{k=1}^3 (x_k - \sum_{j=1}^3 \rho_j^k M_{jk})^2 \quad (6)$$

其中 ρ^c 是RGB色域下的约束表面向量,要转化为标准色域

下约束向量 X^c , Λ 是 Lagrange 乘数, M 是转换矩阵, 满足以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^N \{ \rho_{ij} (x_{ik} - \sum_{h=1}^3 \rho_{ih} M_{hk}) \} + \Lambda \sum_{k=1}^3 \rho'_k (x_k - \sum_{h=1}^3 \rho''_h M_{hk}) = 0 \quad (7)$$

可以看出, 此模型的实质是基于最小二乘回归机制的最优匹配, 它适于整体均匀的线性匹配, 由于实际映射的非线性, 因此这种方法局部匹配并不最优。不过可从构造非线性函数改进, 回归法机制会依然适用, 这方面可以探讨。虽然有上述分析的不足, 上述模型还是做出了重要贡献, 主要有以下三个方面: 为 CM 深层机制研究提供了方向性开拓, 对相关研究提供了功能强大的模型工具, 在色域匹配中引入分形几何思想。

3.2 人工神经网络法

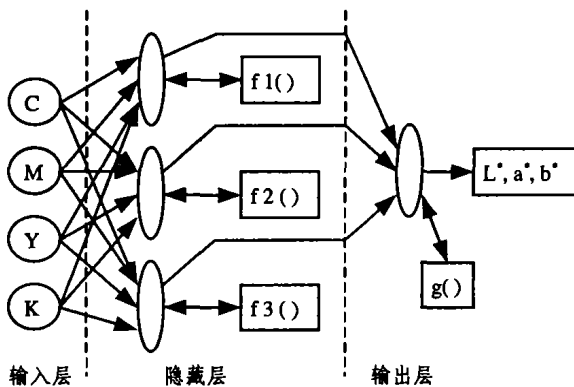


图5 ANN在CMYK色域向Lab色域转化的应用图

人工神经网络法(Artificial Neural Network, ANN)是一种优化方法, 它能成功应用于CM, 由 Drakopoulos 等人利用 ANN 构建的 CM 应用系统 NeuralColor 就成功解决了非线性的色彩调配问题^[15]。ANN 本质上是一个自适应非线性动力学系统, 模拟了人类神经元活动原理, 具有自学、联想、对比、推理和概括能力。ANN 建模功能很强大, 可满足各种功能

要求。目前 ANN 是 CM 领域一研究热点。它在色彩油墨的非线性调配、色域非线性匹配及色彩输入调校等方面的应用都很成功。图 5 展示了 ANN 在 CM 应用中一般体系结构, ANN 主要由三部分有机模块组成: 输入层、隐藏层和输出层。其主要原理是利用输入神经元向隐藏层神经元反应信息, 不同反应通道传输的信息有不同的动态权重与纠偏值, 隐藏层神经元汇总处理信息并激活相应功能, 处理结果再经动态权重和纠偏值处理后反应给输出神经元, 输出神经元汇总信息后激活相应功能, 处理输出最终结果。

可以看出, ANN 处理模型是全局的, 这比组合局部功能的模型要改进很多, 另外它的动态反应功能大大增强了 CM 应用系统的鲁棒性。

4 CM 模型的应用体系分析

CM 应用体系是对上述研究的集成应用, 目前主要有两类: 一是色彩外观造型体系 CAM (Color Appearance Modeling), 以 CIECAM02 为代表。另一类是基于 ICC Profile 的 CMS (Color Management System), Apple 公司 ColorSync 系统可代表。下面对它们进行讨论。

4.1 CAM

CAM 是 CIE 从 1996 年开始组织研究^[16]集成的面向人眼视觉特性“所见即所得”的色彩调适 (Chromatic Adaptation) 体系。CAM 主要应用在以下三方面: 一是在色彩再现过程中观察环境常常变动, 因此必须测定环境视觉影响以进行调校。二是色彩在不同设备方式上表达效果不同, 在外观空间 (Appearance Space) 上进行匹配以取得满意的视觉一致效果。三是 CAM 能评测衡量色彩再现效果。CAM 在复杂光源和观察条件下的应用很成功^[17], 显示器在白点设定变化和光源变化的复杂模式下可通过 CAM 进行调适。由于 CAM 体系构建过程中基于大量视觉试验, 它的色彩可视化模型经过了大量简化, CAM 通过引入大量参数克服该缺陷。图 6 对 CAM 主要机制以流程图形式进行了展示。

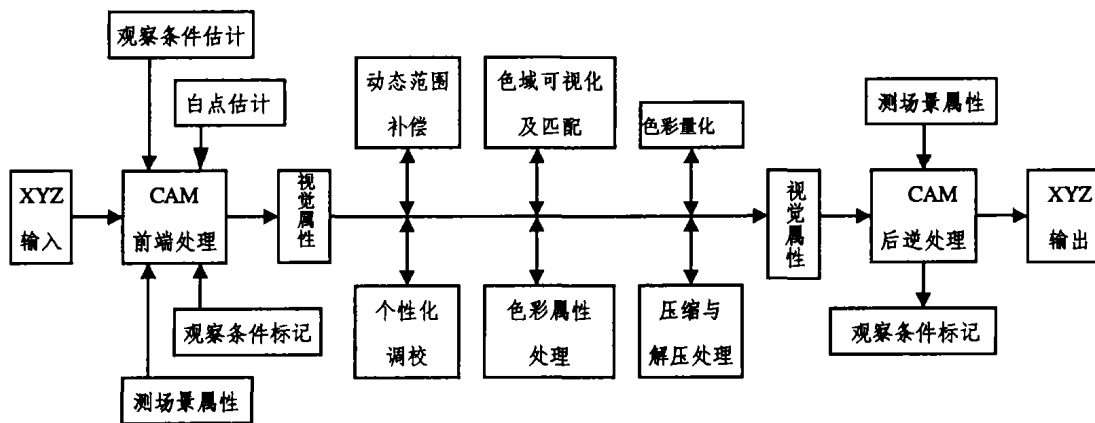


图6 CAM 机制图

CIECAM97s 是 CIE 集成很多研究成果构建的第一个 CAM, 它是功能强大的 CM 分析与应用工具, 主要用于设备间色彩再现, 不同设备色彩渲染及复杂观察条件下色彩的控制。其突出优势是对光源和不同观察条件有较好描述和控制, 实验表明 CIECAM97s 对色彩色度和明度描述能力都非常强^[18]。另外它对色彩色度、明度和饱和度提供了知觉关联属性, 它对环境及背景效果控制得比较成功^[19]。CIECAM02 是在 CIECAM97s 基础上扩展的新系统。它主要在以下方面有较大改进: 线性色彩调适转化, 视觉关联属性的修正计算和非

线性压缩反馈^[20]。CIECAM02 应用能力很强, 把显示器图像转换为打印图像用 CIECAM02 系统要比 CIELAB 系统的效果略好。

4.2 基于 ICC Profile 的 CMS

基于 ICC Profile 的 CM 模型在工业界应用很流行, 典型的有 Apple 的 ColorSync 系统, Microsoft 的 ICM 系统, 其它较好的还有 Agfa, Adobe, Best GmbH 等。它们原理基本一致, 主要机制和步骤如下:

(1) 首先在无 CMS 控制下分别让正常工作状态下的源

设备和目的设备输入或输出 IT8 标准色标。

(2) 分别用分光光度仪对每个输入或输出后的色块测定反射光谱, 汇总处理得到源设备和目的设备的色彩特性, 将结果按指定格式存入相应的 ICC Profile 中。

(3) 将前面制好的源设备与目的设备 Profile 传送给 CMS, 再通过 PCS(Profile Connection Space) 进行匹配转化。先把源设备特性转化为标准空间描述, 最后由标准空间描述再转化为按目的设备特性方式的特性描述。

4.3 两类应用体系解析

从以上对两类应用体系原理与机制的讨论可看出, 两类体系从不同方面对 CM 研究应用做出开拓进展, 但也都存在许多相应问题和局限。下面对此进行逐步分析。

4.3.1 对图像色彩表达的研究 CAM 体系擅长于从色度、明度、饱和度上描述色彩, 这比较适合人眼视觉特性, CAM 体系采用 CIEXYZ 作为设备无关表色体系, XYZ 色系统就是基于对人眼的刺激特性制订的, 因此 CAM 体系更适合于色彩的调适转换, 具体设备上基于视觉特性的白点校正也适于 CAM 体系。CAM 不足是对设备特性研究没有系统的理论和表述。基于 ICC Profile 的 CMS 面向具体设备特性, 它把具体设备的色彩特性完善地构造出标准形式描述, 它通过标准 PCS(Profile Connection Space) 匹配转换很成功, 但它没有针对人眼视觉特性的完整理论体系, 缺乏对色彩的调适转换。

4.3.2 对图像光源与观察条件的研究 物理图像色彩是通过光源反射分布光谱组合看到的, 这里涉及到对不同光源、观察条件及背景的影响分析。可以看出, 基于 ICC Profile 的 CMS 对光源色与观察条件的应用较欠缺, 它假定对色彩的观察条件都是标准的和一致的, 这是不现实的, 不同相似光源的光谱分布有相当差异, 其导致的色偏会直接带入色域匹配从而引起更大色差。CAM 体系对此进行了初步研究和应用, 它引入了对观察条件、背景和光源的测评方法, 并将结果以各种参数形式通过加映射转换来参与, 这是很大的开拓性进展。对于不足, 我们可以发现, CAM 体系把光源和观察条件独立了出来, 而光源相对于图像的空间位置变异会带来图像渲染效果的不同。需要引入空间分布信息并用它修正映射转换, 进一步还要探究光谱的空间散发分布特性, 这些可以讨论。

总结与展望 本文对新兴研究领域 CM 目前状况和主要研究进行了详尽析述, 对典型模型指出了主要原理和机制, 分析指出性能特征及优缺点。通过分析指出, 基于设备特性的, 通过 DICS 转化的色彩再现方式具有实时性和开放性, 是充分考虑设备条件的解决方式, 但它也有很多不足, 比如在不同光源和复杂观察条件下还不适用, 设备色域同标准色域转换还有待进一步提高精度, 另外将大量特性数据嵌入图像本身不仅加大了处理难度也影响网络实时传输。基于光源和不同观察环境建模的 CAM 体系适于色彩调适转换, 对光源和不同观察条件有很好控制, 对色彩色度、明度和饱和度描述力很强, 适于视觉特性。

CM 目前已成为图像处理的重要分支, 其研究与应用日益重要, 对 CM 的研究应该引起足够的重视。通过分析 CM 体系目前存在的问题和局限, 我们认为可以着重从以下方面进行深入研究:

- (1) 设备色域同标准色域间更优匹配算法的研究。
- (2) 不同光源环境和观察条件下对色彩特性影响的研究。
- (3) 色彩的网络实时再现研究。
- (4) 各种图像、光源特性与观察环境用统一标准体系来描述的研究。
- (5) 将 CM 从应用程序级转入系统平台级的研究。
- (6) CM 设备移植性的研究。
- (7) CAM 体系及其在数字化多媒体上的研究。

CM 有非常广阔的应用前景, 基于工业需要及目前研究的内容, 我们可以有以下应用蓝图: 显示器、打印机、扫描仪、印刷机、电视机和数码相机等图像设备都嵌入接口统一的 CMS 及设备对应的色彩特性数据, 所有图像包括其渲染效果统一用标准设备无关的 Lab 空间描述。任何图像都能在其它任何设备上实时再现, 在此基础上的色彩网络实时再现技术成熟后, 图像技术将跨入一个新的时代。

参考文献

- 1 Montag E D, Fairchild M D. Psychophysical evaluation of gamut mapping techniques using simple rendered images and artificial gamut boundaries. *IEEE Transactions On Image Processing*, 1997, 6(7): 977~989
- 2 Fairman H S, Brill M H, Hemmendinger H. How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color Research Application*. 1997, 22(1): 11~23
- 3 Gibson J E, Fairchild M D. Colorimetric characterization of three computer displays (LCD and CRT): [MCSL Technical Report]-2000
- 4 Finlayson G, Hordley S. Improving gamut mapping color constancy. *IEEE Transactions On Image Processing*, 2000, 9(10): 1774~1783
- 5 Stollnitz E J, Ostromoukhov V, Salesin D H. Reproducing color images using custom inks. In: *Proc. of the 25th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques*. 1998. 267~274
- 6 Braun G J, Ebner F, Fairchild M D. Color gamut mapping in a hue-linearized CIELAB color space. In: *IS&T/SID 6th Color Imaging Conf. Scottsdale*, 1998: 163~168
- 7 Moroney N. Color matching functions and blue constancy. In: *Proc. Intl. Congress of Imaging Science*. Tokyo, Japan, 2002, 419~420
- 8 Sharma G, Trussell H J. Digital color imaging. *IEEE Transactions On Image Processing*, 1997, 6(7): 901~932
- 9 Vrhel M J, Trussell H J. Problems in publishing accurate color in IEEE journals. *IEEE Transactions On Image Processing*, 2002, 11(4): 373~376
- 10 Trussell H J, Allebach J, Fairchild M D, et al. Special issue on color imaging. *IEEE Transactions on image processing*. 1997, 6(7)
- 11 International Color Consortium. Specification ICC. 1: 2001-12 File format for color profiles (Version 4.0.0)
- 12 Finlayson G D, Hordley S D, Hubel P M. Colour by correlation: a simple, unifying framework for color constancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2001, 23(11): 1209~1221
- 13 Johnson G M, Fairchild M D. Computer synthesis of spectroradiometric images for color imaging systems analysis. In: *IS&T/SID 6th Color Imaging Conf. Scottsdale*, 1998. 150~153
- 14 Finlayson G, Drew M. Constrained least-squares regression in color spaces. *Journal of Electronic Imaging* 6(4): 484~493
- 15 Littlewood D J, Drakopoulos P A, Subbarayan G. Pareto-Optimal formulations for cost versus colorimetric accuracy trade-offs in printer color management. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(2): 132~175
- 16 Luo M R, Lo M C, Kuo W G. The LLAB(l;c) color model. *Color Research Application*. 1996, 21(6): 412~429
- 17 Hubel P. The perception of color at dawn and dusk. In: *Proc. IS&T/SID 7th Color Imaging Conf.* 1999. 48~51
- 18 Hunt R W G. Application of a model of color appearance to practical problems in imaging. In: *Proc. of the IEEE*, 2002, 90(1): 57~63
- 19 Fairchild M D, Johnson G M. Color appearance reproduction: visual data and predictive modeling. *Color Research and Application*, 1999, 24: 121~131
- 20 Hunt R G W, C J L, Juan L Y, et al. Further improvements to CIECAM97s. *Color Research Application*. 2002, 27: 164~170