

CIECAM02 色貌模型应用存在的问题及 建议解决的方法

石俊生

(云南师范大学颜色与图像视觉实验室, 云南 昆明 650092)

摘要 综述了 CIECAM02 色貌模型应用已经确定的问题以及建议解决的方法,包括明度计算问题、黄-蓝问题和紫色问题导致数学计算不稳定,以及 ICC 色彩管理系统中应用 CIECAM02 模型在色域映射、HPE 矩阵产生的白色适应和模型逆变换中遇到的困难。可以看出,虽然对出现的问题提出了相应的解决方法,但这些方法还需要在不同应用目的中检验,还需要提出更好的解决方法;CIECAM02 色貌模型研究中最关键的色适应变换 CAT02 和量化知觉属性的 HPE 变换仍需要进一步研究。色貌模型仍处在研究阶段。

关键词 色度学;色貌模型;CIECAM02;色彩管理;数字设备

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.042601

Review of Problems in CIECAM02 and Solutions

Shi Junsheng

(Color & Image Vision Laboratory, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract Some problems in CIECAM02 that have been identified and the solutions are reviewed. Those problems include mathematical failure for calculating lightness, yellow-blue problem and purple problem that result in mathematical instabilities, a gamut mapping, HPE matrix and backward model when the CIECAM02 is used in an ICC workflow. It is showed that proposed solutions need to be verified by various applications and new solutions need to be presented. Color appearance models are still at the process of development.

Key words colorimetry; color appearance model; CIECAM02; color management; digital devices

OCIS codes 260.0260; 330.0330; 120.0120

1 引言

随着图像技术以及各种彩色媒体设备的广泛使用,各种媒介在不同观察环境与条件下颜色度量以及跨媒体颜色再现成为色度学亟待解决的问题。为了满足色彩管理应用需求,CIE TC8-01 在 2004 年公布的 CIECAM02 色貌模型,模型具有预测包括色适应状态的不同观察条件色貌和其色空间的均匀性^[1,2]。随后展开了对 CIECAM02 色貌模型的应用研究,主要集中在国际色彩联盟(ICC)色彩管理架构中使用本身存在的问题,包括完全适应下白点、逆变换以及色域映射空间相关问题;同时也开展了色空间均匀性和色差评价、复杂刺激及图像色貌模型、大范围观察条件下色貌预测等颜色应用各个领域的研究。本文不涉及色貌模型扩展功能及应用研究的更多内容,主要对已经确定的 CIECAM02 模型本身存在的问题,以及建议解决方法进行详细描述,存在的问题主要包括模型中数学计算出现的问题、在 ICC 色彩管理架构中使用 CIECAM02 遇到的问题、完全适应下白点及 HPE 矩阵存在的问题。

2004 年公布的 CIECAM02 色貌模型已经指出计算明度可能出现复数的问题,并给出简单的处理建议^[1,2]。2005 年 Tastl 等^[3]讨论了 ICC 色彩管理系统架构中使用 CIECAM02 必须考虑的一些问题及处理建议,主要包括使用 CIECAM02 的目的、观察条件参数的选择、特征文件连接空间(PCS)编码值变换到无效

收稿日期: 2010-10-19; **收到修改稿日期**: 2010-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(60668001)资助课题。

作者简介: 石俊生(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事颜色、成像与图像处理等方面的研究。

E-mail: shi-js@263.net

的 CIECAM02 色度值。2005 年 Guay 等^[4]对 ICC 架构中使用 CIECAM02 色貌空间进行色域映射时,由于 XYZ 或 LAB 作为 PCS 的整个网格空间包含一些非物理色出现的问题提出了解决方法。2006 年 Kuo 等^[5]描述了在 ICC 架构中使用 CIECAM02 遇到的两个问题,一是在完全适应下白点的问题,是由于 HPE 矩阵第一行的总和不严格等于 1 导致的;二是当彩度 C 为 0 及很小时逆模型出现的问题。2005 年 Li 等^[6]在测试 CIECAM02 稳健性时发现,虽然正模型在理论上可能对一些颜色区域出现数学计算问题,但不能说明对实际样本出现问题,采用显示器 sRGB 色空间和目标色通过了测试。2006 年 Brill 等^[7,8]发现 CAT02 色适应红(R)、绿(G)基元在 HPE 三角形色空间的外边,并把它称作“黄-蓝问题”。2007 年 CIE 技术委员会 TC8-11 在 26 届 CIE 大会技术报告中对模型存在的数学问题提出了修改模型^[9],满足大范围产业应用的要求。2008 年 Brill 等^[10]进一步分析了 CIECAM02 模型中锐基 CAT02 色适应变换、生理学锥基坐标 HPE 变换、非整数幂函数的非线性处理中出现数学问题的原因,并指出了比“黄-蓝问题”更严重的“紫色问题”。2009 年 Li 等^[11]在第 17 届“Color Imaging Conference”会议报告上指出,CIECAM02 模型存在几个问题目前已经确定,并概括了存在问题以及对模型修改或扩展建议,其中主要存在问题概括为 4 个方面:1)某些颜色出现数学问题;2)CIECAM02 颜色范围比 ICC 特征文件连接空间的范围小;3)HPE 矩阵问题;4)视明度问题。

Li 等^[11]指出的视明度问题一方面是计算明度出现复数的问题,另一方面指 CIECAM02 模型对视明度的预测精度问题。2002 年 Hunt 等^[12]对 CIECAM97s 的视明度函数做了调整后被 CIECAM02 采用,其目的是修正饱和度函数(s)。然而,CIECAM02 对视明度的预测与视觉数据不是很好吻合。出现这个问题也不奇怪,因为,与明度、视彩度和色相属性可以使用的数据相比,视明度的相关视觉数据很少^[11]。因此,为了改进 CIECAM02 对视明度的预测,需要更多的视觉数据^[11],这里对此问题不做更详细描述。

本文主要对 CIECAM02 模型应用已经确定的问题,以及建议解决的方法进行详细描述。这些问题包括明度计算问题、黄-蓝问题和紫色问题导致数学计算不稳定问题,以及使用 CIECAM02 色空间进行色域映射、HPE 矩阵问题和 CIECAM02 逆变换使用在 ICC 遇到的困难与建议解决的方法。不涉及 CIECAM02 模型功能扩展、预测精度改进以及颜色应用最新进展的更多内容。

2 CIECAM02 色模型计算步骤

为了讨论方便,将 CIECAM02 模型概括为 4 个计算步骤总结如下^[7]:

第 1 步:首先采用 Von-Kries 类型的 CAT02 色适应变换,将输入 X, Y, Z 值变换到 CAT02 基元 R, G, B ;然后利用色适应因子 D 对相对三刺激值适应与不适应的线性组合得到部分适应(R_c, G_c, B_c);

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{CAT02}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{M}_{\text{CAT02}} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned} R_c &= [D(Y_w/R_w) + (1-D)]R, \\ G_c &= [D(Y_w/G_w) + (1-D)]G, \\ B_c &= [D(Y_w/B_w) + (1-D)]B. \end{aligned} \quad (2)$$

第 2 步:将矢量(R_c, G_c, B_c)经过 HPE 线性变换到锥响应基元坐标(R', G', B');

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{HPE}} \mathbf{M}_{\text{CAT02}}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{式中 } \mathbf{M}_{\text{HPE}} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.00000 \end{bmatrix}.$$

第3步:对锥响应基元 R', G', B' 分别进行依赖于绝对适应亮度非线性处理,得到锥细胞后适应响应 R'_a, G'_a, B'_a ;

$$\begin{aligned} R'_a &= \frac{400(F_L R'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L R'/100)^{0.42}} + 0.1, \\ G'_a &= \frac{400(F_L G'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L G'/100)^{0.42}} + 0.1, \\ B'_a &= \frac{400(F_L B'/100)^{0.42}}{27.13 + (F_L B'/100)^{0.42}} + 0.1. \end{aligned} \quad (4)$$

式中 F_L 为亮度因子。

第4步:用 (R'_a, G'_a, B'_a) 计算对立色坐标,再用对立色坐标计算色相、明度、视明度、彩度、视彩度和饱和度感知属性。其中明度 J 计算方程为

$$J = 100(A/A_w)^{cz}, \quad (5)$$

式中

$$z = 1.48 + \sqrt{Y_b/Y_w}, \quad (6)$$

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 0.305]N_{ib}, \quad (7)$$

$$A_w = [2R'_{aw} + G'_{aw} + (1/20)B'_{aw} - 0.305]N_{ib}, \quad (8)$$

$$N_{ib} = N_{ib} = 0.725(Y_w/Y_b)^{0.2}. \quad (9)$$

3 CIECAM02 存在数学问题及建议解决的方法

明度计算问题。在CIECAM02公布时已经发现计算明度出现复数的数学问题^[2]:(3)式计算出的 R', G', B' 可能出现负值,这样导致(4)式计算 R'_a, G'_a, B'_a 出现复数,已经建议采取计算前先去掉负号的方法。之后, Li等^[6]和 Brill等^[7,8,10]又做了进一步分析,计算明度函数 J (5)式中, c 和 z 是正数, A 和 A_w 依赖于测试样本和照明光源。其中 A_w 一定是正值^[6],而对于一些颜色出现 A 为负值的情况^[6~8,10],结果在计算 J 时出现了复数问题。这种情况出现在当 B_c 相对于 R_c 和(或者) G_c 很小时,在计算步骤第2步将得到负的 B' ,则在第3步产生负的 B'_a 。一个例子是当在强的蓝光源完全适应条件下,看一个饱和的黄色时就出现这种情况,例如适应亮度 100 cd/m^2 、完全适应 $D=1$ 、测试光 $(x, y) = (0.49, 0.49)$ 、适应光 $(x_w, y_w) = (0.15, 0.05)$ 。

Brill等^[7,8]发现CAT02红、绿基元在HPE三角形色空间的外边,其结果是极端蓝适应情况下的CAT02颜色位于HPE空间的外边,即HPE空间蓝坐标为负值。HPE基元色度坐标 (x, y) 可以由 M_{HPE}^{-1} 列矢量与列总和的比值得到,分别是红(0.8374, 0.1676)、绿(2.3022, -1.3022)和蓝(0.1680, 0)。同样, CAT02基元色度坐标 (x, y) 可以由 M_{CAT02}^{-1} 列矢量与列总和的比值得到,分别是红(0.7114, 0.2949)、绿(-1.4758, 2.5059)和蓝(0.1439, 0.0568),CAT02(实线)和HPE(虚线)基元三角形如图1(a)所示^[7],前者内部代表CAT02色空间非负范围,后者内部代表HPE色空间负色域范围。看起来奇怪的HPE绿基元

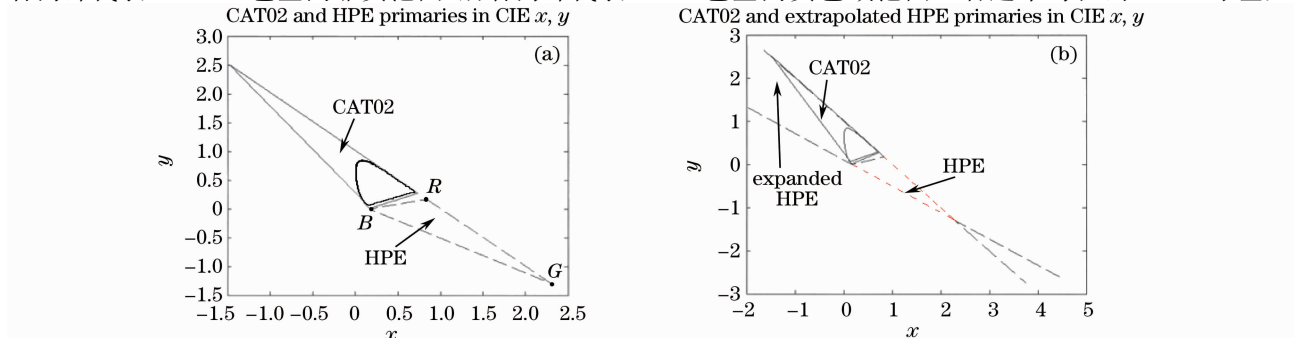


图1 (a)在 (x, y) 色空间CAT02基元三角形和HPE基元三角形,(b)扩展HPE基元三角形和光谱轨迹

Fig. 1 (a) CAT02 primary triangle and HPE primary triangle, (b) HPE primary "triangle" and spectrum locus

点(2.3022, -1.3022)是离开 $X+Y+Z=1$ 平面的,属于负色域范围。HPE 允许的 RGB 基元非负色域范围(即正色域)是对 HPE 基元的扩展,方法是延长 RGB 基元三角形边,删除 RG 和 BG 边。扩展的 HPE 包括两个部分:一个是以 G 顶点的两条射线所夹角区域,一个是由 RB 边和以 R, B 点的两条射线所包围的无限区域,如图 1(b)所示^[7]。

图 2 是 CAT02 基元三角形(实线)、HPE 基元三角形(点画线)、光谱轨迹(黑实线)表示在 (u', v') 空间。HPE 基元三角形在 (x, y) 空间有两个区域特点在 (u', v') 空间不存在了。图 3 是图 1(b)的放大,可以看出, CAT02 基元 B 在 HPE 基元三角形内部,但基元 R 和 G 在 HPE 基元三角形外部,详细描述参考文献^[7]。

2008 年 Brill 等^[10] 又指出的“紫色问题”,即 CAT02 三角形紫色部分在光谱轨迹内部,也就是说, CAT02 三角形不包含饱和紫色,如图 2 和图 4 所示。这种效果在 (u', v') 比 (x, y) 色空间看得更清楚。可以用一个饱和紫色说明“紫色问题”的坏处,饱和紫色位置在 CAT02 三角形基元 G 的相对的 RB 边上,其基元 G 为负值,这样一个饱和紫色在 CAT02 三角形内略带紫色的光源下适应后,其位置移动到光谱轨迹外边,甚至 HPE 三角形的外边。例如:一个饱和紫色色度 $(x, y) = (0.4, 0.12)$, 采用 CAT02mod 矩阵在光源色度 $(x_w, y_w) = (0.4, 0.2)$ 完全适应下,紫色色度变成 $(x_p, y_p) = (0.5788, -0.0444)$, 位于 HPE 三角形的外边。“紫色问题”主要影响是,随着适应光源向紫色的移动(适应光源保持在 CAT02 三角形内),CAT02 三角外饱和紫色更饱和。

上面计算明度出现的复数问题,以及“黄-蓝问题”与“紫色问题”导致数学计算的不稳定,表面上是非整数幂函数的非线性处理中出现的,但问题源于 CAT02 色适应变换、HPE 变换,以及色适应基元相对于光谱轨迹和生理学锥细胞基元的位置。在 CIECAM02 模型中,色适应变换对于某些颜色的预测出现负的三刺激值,为了保证适应色在色适应基元给出的正的色域,所有适应色位于正的 45° 角 HPE 锥细胞基元三角形空间色域内是重要的, HPE 三角形、CAT02 三角形和光谱轨迹三种色度必须满足相互嵌套, HPE 三角形必须包含 CAT 三角形, CAT 三角形必须包含光谱轨迹。如果这种包含不成立, CIECAM02 模型存在的几个问题导致数学上的不稳定,将遇到各种困难^[10]。

避免(5)式计算出现数学问题可以采取计算前先去掉 A 负号的方法。但这种方法也无法避免在 HPE 三角形边缘上非线性斜度无穷,这样会使 CAT02 和 HPE 色空间变换出现跳跃即不连续^[10]。下面是几种建议的解决方法,基本以微调 CAT02 和 HPE 变换矩阵为主,这些方法目前仅仅针对 CIECAM02 模型的数学问题,没有考虑 CIECAM02 模型在极端条件下预测精度问题^[10]。

方法 1。CIE 第 8 分部邀请 Brill 等^[10] 研究新的 CAT02 基元,使其位于 HPE 三角形。Brill 等^[10] 建议把

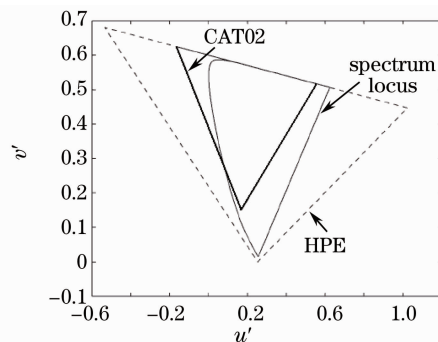


图 2 在 (u', v') 空间的 CAT02 基元三角形, HPE 基元三角形和光谱轨迹

Fig. 2 CAT02 primary triangle, HPE primary and triangle spectrum locus in (u', v') space

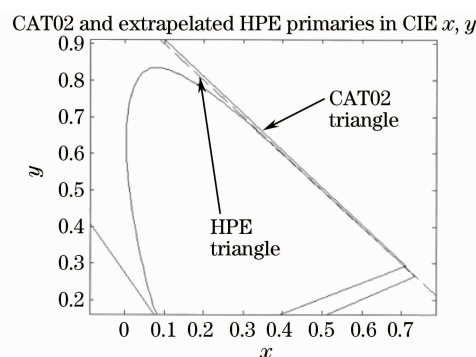


图 3 图 1(b)的放大

Fig. 3 Blowup of Fig. 1(b)

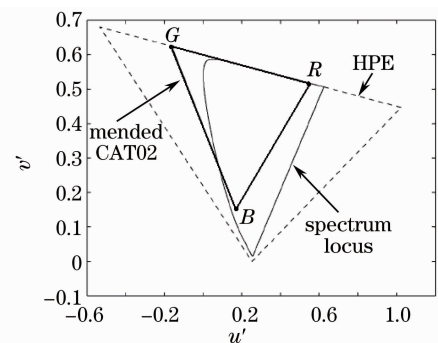


图 4 CIECAM02 色域: 光谱轨迹、修改的 CAT02(CAT02mod) 和 HPE

Fig. 4 Nonnested gamuts of CIECAM02: spectrum-locus, CAT02mod and HPE

CIECAM02 模型 CAT02 变换矩阵元素做很小修改,即将第 3 行从 $[0.0030, 0.0136, 0.9834]$ 变化成 $[0, 0, 1]$,使 CAT02 基元位于 HPE 三角形内。这样使 CAT02 三角形 RG 边位于 $z=0$ 线,即长波对应光谱轨迹,使新的 CAT02 三角形 RG 边一部分位于光谱外边,一部分位于光谱轨迹,但总是位于 HPE 三角形内部,如图 4 所示。这个修改 CAT02 的记作 CAT02mod。对文献[10]指出的问题做了修正^[7],但从统计意义上,这种对 CAT02 蓝基元的微小变化并没有明显改变不对称匹配^[8]。

CAT02mod 修正了“黄-蓝问题”,但是,最大的问题是“紫色问题”,对 CAT02 和 CAT02mod 同样存在^[10]。从图 4 看出,CAT02mod 三角形部分位于光谱轨迹内部,但不包括饱和紫色,而且基元 B 在光谱轨迹内部。这种效果在 xy 空间不明显,而在 $u'v'$ 空间特别明显。Li 等^[11]指出,CAT02mod 矩阵对 CAT02 表现不好的颜色工作得很好。但这种修改好像既没有校正 CAT02 的问题,也没有校正 CIECAM02 的问题。

方法 2。解决上面 CIECAM02 模型数学问题既可以采用色适应基元(即色适应变换矩阵),也可以采用修改 HPE 基元。对于采用修改色适应变换矩阵,在色貌模型研究过程中已经做过多种尝试。为了使 HPE 色域包围 CAT02 三角形,有多种修改 HPE 基元的方法,Brill^[7]提出了修改方法,其中一种对 HPE 矩阵修改方法为

$$\mathbf{M}_{\text{MHPE}} = \begin{bmatrix} 0.39157 & 0.68734 & -0.07909 \\ -0.23272 & 1.18573 & 0.04700 \\ 0.00300 & 0.01360 & 0.98340 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

方法 3。另外一种建议是修改 CIECAM02 模型的 $R'G'B'$ 用 $R''G''B''$ 代替^[10],称作约束方程为

$$R'' = \max(R', 0); G'' = \max(G', 0); B'' = \max(B', 0). \quad (11)$$

因此, R'_a, G'_a, B'_a 被定义为

$$\begin{aligned} R'_a &= \frac{400(F_L R''/100)^{0.42}}{(F_L R''/100)^{0.42} + 27.13} + 0.1, \\ G'_a &= \frac{400(F_L G''/100)^{0.42}}{(F_L G''/100)^{0.42} + 27.13} + 0.1, \\ B'_a &= \frac{400(F_L B''/100)^{0.42}}{(F_L B''/100)^{0.42} + 27.13} + 0.1. \end{aligned} \quad (12)$$

这样, R'_a, G'_a, B'_a 所有的值不低于 0.1。这样,(7) 式计算 A 总是非负数,(5)式计算 J 再没有问题了。

上面的修改方法简单,CIECAM02 正向模型没有问题,但逆向模型有一个问题。在完全相同的观察条件下,输入正向模型的 X, Y, Z 通过逆向模型预测的 X, Y, Z 有不同的值。

方法 4。Li 等^[11]在 2009 年提出一个得到色适应变换矩阵的方法,是采用约束条件下最优问题得到色适应变换矩阵的数学方法。利用视觉观察对应色三刺激值非负约束,结合对应色三刺激值之间色差最小得到的。得到色适应变换矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{CAT02}} = \begin{bmatrix} 1.007245 & 0.011136 & -0.018381 \\ -0.318061 & 1.314589 & 0.003471 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

以 D65 作为参考照明测试,使用 81 个测试照明对 $\mathbf{M}_{\text{CAT02}}$ 和其他 7 个色适应变换矩阵一起进行了测试。测试结果表明,对所有最优色和 CIE 标准观察者, $\mathbf{M}_{\text{CAT02}}$ 矩阵是唯一成功预测对应色,且没有出现负值。但是,预测精度大约在 1 个 CIELAB 色差单位,比原始的 CAT02 矩阵预测结果要差。可以认为,为了保证对应色非负的约束,牺牲了对应色预测精度。然而,与色适应观察者的偏差相比,1 个 CIELAB 色差单位是比较小的。

以上好像解决了 CAT02 的问题,不幸的是,并没有解决 CIECAM02 的数学问题。位于 CIE 光谱轨迹和内部的颜色,利用(5)式仍然在计算 J 时出现问题。

综上所述,使用约束方程(11)式,CIECAM02 的逆变换出现新问题。而 Li 等^[11]得到矩阵的解决色适应变换 CAT02 的问题,但没有解决 CIECAM02 的逆变换问题。但是,两种方法可以取长补短,一起相互结合解决问题^[11]。

4 CIECAM02 使用在 ICC 遇到的困难与建议解决的方法

4.1 CIECAM02 在 CMS 中的应用

色彩管理可以有各种方法,ICC 定义了一个开放的色彩管理系统(CMS)^[3,13],其核心元素是颜色特性文件(ICC profile)、PCS 和彩色管理模块(CMM)。PCS 是一个参考色空间,是一个独立设备的色空间,用来描述设备色貌的色空间,ICC 使用 2°观察者在 D50 照明下的 CIEXYZ 或 CIELAB 色空间作为 PCS。PCS 空间是实现色域映射与色空间变换插值,甚至是处理颜色再现的色貌属性空间。ICC profile 将各种原始设备色空间数据变换成 PCS 空间,也可以将 PCS 空间变换成各种目标设备色空间。

CMM 按照不同的意图完成设备色空间与 PCS 空间的变换。ICC 根据实际应用中不同的再现目分成 4 种意图,分别是知觉、饱和度、相对与绝对色度意图。在色度意图中,AtoB1 中包含了对应“设备空间均匀取样的”3D 网格的 PCS,BtoA1 中包含了对应“PCS 空间均匀取样的”3D 网格的设备值,这意味着色域映射包含在 3D LUT 中,实现从 PCS 网格到设备空间的映射^[5]。以 CIELAB 色空间作为 PCS 为例,PCS 包含了在整个 CIELAB 色空间均匀取样的 3D 网格,则 L^* 取值在 0 和 100 之间, a^* 和 b^* 取值在 -128 和 127 之间。在 PCS 空间网格中的设备值代表着设备色域的内部,设备测量值可以直接插值得到 PCS 值;但在 PCS 空间网格中设备色域外部的设备值必须经过色域映射,映射到色域边界后再进行插值。色域映射可以在不同色空间进行,最直接的空间是 XYZ 或 CIELAB PCS。但 XYZ 色空间不均匀,而在 CIELAB 色空间进行色域映射出现色度漂移,特别在蓝区。CIECAM02 已经具有色空间均匀性和较好的色调恒常性克服 CIELAB 模型遇到的问题^[3,14]。

理论上,CIECAM02 模型在 ICC 架构中有两个应用,一是利用模型产生的均匀色空间作为色域映射空间和色空间变换插值;二是利用模型可以预测不同观察条件下对应色处理颜色再现中的色貌属性空间。虽然 CIE 公布时将 CIECAM02 作为 PCS 空间和色域映射空间使用^[2],CIECAM02 色空间作为 PCS 空间使用对色域映射和变换插值应用更直接、更方便,但研究发现直接作为 PCS 空间有困难^[5],由于后适应非线性响应和知觉特性函数,这方面的应用研究工作较少。在第二种应用中,例如在知觉意图,根据参考媒介观察条件参数计算出 CIECAM02 色貌属性 $J_a c_b c$,再根据再现观察条件参数变换到对应色 $J_a c_b c$ 值,然后再变换到设备值。

4.2 ICC 中使用 CIECAM02 色空间进行色域映射与建议解决的方法

PCS 包含的非物理色引起变换到 CIECAM02 色空间出现数学问题。ICC 架构中使用 CIECAM02 色貌空间进行色域映射时,需要从 PCS 变换到设备色空间。PCS 定义在 CIEXYZ 或 CIELAB 整个网格空间,所有这些值必须变换到 XYZ 后再变换到 CIECAM02 进行处理,但整个 PCS 包含一些非物理色^[4],PCS 编码值变换到无效的 CIECAM02 色度值^[3],即一些 $L^* a^* b^*$ 极端值变换出负的 XYZ 值,这样在公式

$$t = \frac{e(a^2 + b^2)^{1/2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \quad (14)$$

计算中间变量 t 时出现分母为 0 或接近 0 的现象,计算明度 J 出现复数。Li 等将此问题归结为 CIECAM02 颜色范围比 ICC PCS 小的原因^[11]。

方法 1。可以采用 ICC 定义和规范,将 XYZ 值设为 0 后变换到 CIECAM02 处理后逆变换到 XYZ,但在暗区域某些极端值没有逆变换,这样就产生了工程问题^[3]。另外,光谱轨迹是自然界所有颜色的边界,CIECAM02 模型是建立在真实刺激实验数据基础上的,这些刺激是在光谱轨迹内部,模型没有考虑光谱轨迹外面的颜色,但由于适应,一些适应色会出现在光谱轨迹外面^[3]。

采用色域“先剪切”方法(pre-clipping)^[3],先确定 CIECAM02 定义的颜色范围,然后剪切或映射这个颜色范围外的点到这个颜色范围内部或边界,使颜色在 CIECAM02 的有效范围。先剪切是使用 CIECAM02 处理 ICC LAB PCS 不可避免的过程,先剪切的色主要在暗区域。文献[3]对先剪切做了讨论,包括 ICC 不同版本 ICC v2 和 v4 使用问题。2005 年 Guay 等^[4]也对先剪切进行了研究。这种方法的两个步骤存在逆变换问题,而且,这样的剪切将降低色域映射选择 CIECAM02 色空间的优势^[3,4]。

方法 2。另外一种方法是扩展 CIECAM02,在不影响正常色域颜色的条件下用数学方法使色域外的颜色也不出问题^[15]。例如对计算 J (5)式和计算非线性后适应锥响应(12)式进行了扩展,计算 t (14)式引入比

例因子 (scaling factors), 模拟结果表示了这种扩展 CIECAM02 的方法工作得很好。

4.3 ICC 中使用 CIECAM02 的 HPE 矩阵问题与建议解决的方法

在色貌模型中, HPE 矩阵将 XYZ 变换到生物锥响应空间对关联感知属性进行预测。在 CIECAM02 模型中, 使用估计的色适应因子 D 描述色适应状态, 而在 ICC 架构中一般假设完全适应状态, Kuo 等^[5]发现 HPE 矩阵第一行的总和不严格等于 1, 对白点完全适应下的锥响应 $(R'_w, G'_w, B'_w) = (100, 0.00001, 100, 100)$, 其结果是对立色 a^*, b^* 出现非 0 值, 导致彩度 C 不为 0, 即使是很小 (如 10^{-5}) 也会在实际应用时产生问题。

最简单的方法是对矩阵做微小调整, 例如, Kuo 等^[5]建议对 CIECAM02 模型(3)式中 M_{HPE} 矩阵第 1 行微小调整, 如将第 1 行的 -0.07868 调整为 -0.07869 , 同时也提出一种同时微调第 1 行的方法^[5]。

$$M_{\text{HPE}} = \begin{bmatrix} 0.389707 & 0.688977 & -0.078684 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.00000 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

4.4 ICC 中 CIECAM02 逆变换问题与建议解决的方法

ICC 架构实现跨媒介颜色再现需要使用 CIECAM02 逆模型, 而逆模型对彩度 $C=0$ 的颜色点变换到 XYZ 出现数学计算问题。为避免这一数学问题, Kuo 等^[5]提出了重新安排 CIECAM02 逆模型计算顺序, 对提出的方法在 ICC 架构中使用 CIECAM02 可能的两种途径 CIELAB(XYZ) \rightarrow CIECAM02 \rightarrow CIELAB(XYZ) 和 CIECAM02 \rightarrow CIELAB(XYZ) \rightarrow CIECAM02 进行了验证, 详细的方法及步骤参考文献^[5]。

5 总 结

Li 等^[11]在 2009 年总结的 CIECAM02 存在的四个问题及对模型修改或扩展, 针对 CIECAM02 模型应用已经确定的问题, 总结为两大存在问题及建议解决的方法进行了详细描述, 一个是 CIECAM02 应用中数学计算出现的问题, 一个是 ICC 彩色管理架构应用中使用 CIECAM02 遇到的问题。CIECAM02 模型出现的“黄-蓝问题”、“紫色问题”以及 CIECAM02 逆变换可以看作数学问题, 而且把这些表现出的数学问题归结为色适应空间、HPE 空间和光谱色空间三者的包含关系。而 ICC 彩色管理架构应用中使用 CIECAM02 遇到的问题, 其中也存在着 CIECAM02 遇到的数学问题, 包括 CIECAM02 逆模型。由此看出:

1) 虽然对出现的问题提出了相应的解决方法, 但这些方法还需要大量应用的检验, 还可以提出更好的解决方法。

2) 现存的问题特别涉及到色适应空间、HPE 空间和光谱色空间三种色空间的包含关系, 概括为 CIECAM02 模型色域问题, 这是一个复杂的问题。色适应变换矩阵 CAT02 和 HPE 矩阵是建立在视觉数据基础上, 一直是色貌模型研究的重点和关键, 但目前看来仍需要修改。这两个变换矩阵目前有多种解决方法, 例如按照 Li 等^[11]用数学非线性优化数学方法得到了色适应变换最优化矩阵扩展了 CIECAM02 颜色范围, 而且使 CIECAM02 模型进一步简化; 色适应变换采用 HPE 矩阵是避免某些颜色出现数学问题的较好选择。Brill^[7]指出几种修改 HPE 基元使其包围 CAT02 三角形可能的方法, 如改变 R 基元 (x, y) 为 $(0.004, 0.004)$ 和 G 基元 (x, y) 为 $(-0.003, -0.003)$, 也可以使 $\bar{z}(\lambda)$ 映射为纯蓝, 但所有可能的方法必须解释视觉数据。

3) 色貌模型仍处的研究阶段, 一方面包括模型本身的改进, 同时需要大量的应用研究。模型本身的改进包括对 CIECAM02 模型在内的色貌模型模拟视觉过程的模型进一步改进; 已经开展了大量的 CIECAM02 模型应用研究, 部分应用已经取得效果, 需要积累数据, 进一步完善模型; 同时也仍然需要进一步补充视觉数据的不足, 除了明确提出的视明度相关视觉数据, 需要色貌模型更大应用范围视觉数据。

参 考 文 献

- 1 N. Moroney, M. D. Fairchild, R. W. G. Hunt *et al.*. The CIECAM02 colour appearance models[C]. Proceedings of the 10th of CIC, Scotsdale, USA, November, 2002, s 23~27
- 2 CIE technical report, 159: 2004, A color appearance model for color management systems: CIECAM02[R]. CIE Central Bureau, Vienna, Australia

- 3 I. Tastl, M. Bhachech, N. Moroney *et al.*. ICC colour management and CIECAM02[C]. Proceedings of the 13th of CIC, Palo Alto, USA, 2005, 217~223
- 4 R. Guay, M. Shaw. Dealing with imaginary color encodings in CIECAM02 in an ICC work flow[C]. Proceedings of the 13th of CIC, Hewlett Packard Co. , USA, 2005, 318
- 5 C. H. Kuo, E. Zeise, D. Lai. Robust CIECAM02 implementation and numerical experiment within an ICC workflow[J]. *J. Imaging Sci. Technol.* , 2008, **52**(2): 020603
- 6 Changjun Li, M. R. Luo. Testing the robustness of CIECAM02[J]. *Color Res. Appl.* , 2005, **30**(2): 99~106
- 7 Michael H. Brill. Irregularity in CIECAM02 and its avoidance[J]. *Color Res. Appl.* , 2006, **31**(2): 142~144
- 8 S. Süsstrunk, M. H. Brill. The nesting instinct: Repairing non-nested gamuts in CIECAM02[C]. Late-Breaking-News Paper at 14th SID/IS&T Color Imaging Conference, Scottsdale, AZ, 2006
- 9 Changjun Li. R1-42 extensions of CIECAM02[C]. Color & Imaging Conference, CIC15, Albuquerque, 2007
- 10 Michael H. Brill, Sabine Süsstrunk. Repairing gamut problems in CIECAM02: a progress report[J]. *Color Res. Appl.* , 2008, **33**(5): 424~426
- 11 Changjun Li, M. Ronnier Luo, Michael R. Pointer. Recent progress with extensions to CIECAM02[C]. 17th Color Imaging Conference, Albuquerque, New Mexico, 2009, 69~74
- 12 R. W. G. Hunt, C. J. Li, M. R. Luo. Dynamic cone response functions for modes of colour appearance[J]. *Color Res. Appl.* , 2002, **28**: 82~88
- 13 ISO 15076-1; 2005, Image technology, colour management-Architecture, profile format and data structure-Part I Based on ICC.1[S]; 2004-10
- 14 N. Moroney, Z. Han. Field trials of the CIECAM02 colour appearance[C]. CIE 25th Quadrennium, 2003
- 15 G. W. Gill. A solution to CIECAM02 numerical and range issues[C]. Proceedings of the 16th of CIC, 2008