基于色调恒常空间的色彩管理

罗雪梅[1],曾 平[1,2],王 莹[1],王义峰[1]
(1. 西安电子科技大学计算机外部设备研究所,陕西西安 710071;2. 西安石油大学计算机学院,陕西西安 710065)

摘 要: 针对 CIELAB 空间色调非恒常影响色域匹配及色差计算准确度问题,研究了色调恒常校正方法,建立了一种新的校正空间 tLAB,并用其替代 CIELAB 空间实施色彩管理.首先,以孟塞尔空间为标准,分析了 CIELAB 空间的色调非恒常性.然后,利用孟塞尔新标数据对 CIELAB 空间实施色调校正,构建了色调恒常的颜色空间 tLAB;借助三维查找表(3D_LUT)描述 CIELAB 和 tLAB 之间的非线性关系,提出了不增加时空代价的色彩管理工程实现方案.最后,给出了利用 tLAB 空间进行色域匹配的结果,以及新的色差评价指标体系.实验表明,利用 tLAB 空间进行色域匹配的效果明显优于传统方法,且用其替代 CIELAB 空间实施色彩管理具有很好的实时性和普适性.

关键词: 色彩管理; 色域匹配; 3D_LUT; 色调恒常; 孟塞尔空间
中图分类号: TP334.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2660-04

Color Management Using A Hue-Constancy Color Space

LUO Xue-mei[1], ZENG Ping[1,2], WANG Ying[1], WANG Yi-feng[1]
(1. *Research Institute of Computer Peripherals, Xidian University, Xi'an, Shannxi* 710071, *China*;
2. *School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shannxi* 710065, *China*)

Abstract: Hue nonconstancy of CIELAB color space affects the result of gamut mapping and the accuracy of color difference evaluation seriously. To solve this problem, a hue-constancy corrected method was proposed and a new color space tLAB was constructed, which was used to replace CIELAB during color management. Based on Munsell color space, the hue nonconstancy of CIELAB was analyzed firstly. Then the hue in CIELAB was corrected according to Munsell renotation Data, and the tLAB color space was created which was hue constant. Meanwhile, 3D look up table(3D-LUT) was utilized to characterize the non-linear relationship between CIELAB and tLAB; an implementation scheme for color management with a low spatio-temporal cost was presented. Finally, the results of gamut mapping in tLAB color space and a new color difference evaluation were presented. Experiments show that the results of gamut mapping in the new tLAB space gain an advantage over the traditional ones. In addition, the color management using tLAB color space has real time performance and universality.

Key words: color management; gamut mapping; 3D_LUT; hue constancy; munsell space

1 引言

色彩管理致力于不同平台、不同介质间的颜色一致再现.国际色彩联盟(ICC)引入设备无关色彩空间作为各设备颜色信号通信的标准交换空间,称其为设备连接空间(Profile Connection Space, PCS)[1~3].为实现相互通信,各设备需要定制 Profile(彩色特性描述文件),用其反映色彩在设备空间和 PCS 空间之间的转换关系.由于各种设备具有不同的成色范围(色域),为了使图像可在不同设备上再现,还需进行色域匹配,以将图像的全部色彩合理映射至设备色域内,使其在"小"色域设备上得到满意再现[4~6].色域匹配是色彩管理最核心技术之一.CIELAB 空间通常被认为是视觉均匀的颜色空间,因此常被色彩管理系统(Color Management System, CMS)选作 PCS 空间,色域匹配一般也在该空间进行.另一方面,为获得比较理想的匹配效果,现有色域匹配算法普遍遵循色调不变原则,仅允许改变明度和彩度[7].这引发了一必然矛盾:由于 CIELAB 空间不具备色调恒常性[8~11],彩度或明度的变化会相应改变色调,如将 CIELAB 空间作为色域匹配的参考空间,必然导致某些颜色经色域匹配后色调发生偏移.

为解决色彩管理面临的 CIELAB 空间色调非恒常

收稿日期:2009-08-22;修回日期:2010-06-03
基金项目:国家部委"十一五"预研项目(No.51316060203);陕西省教育厅专项科研计划(No.09JK701);国家武器装备预研基金(No.9140A16050210DZ01);中央高校基本科研业务(No.72104969)

问题,本文以视觉均匀的孟塞尔空间为标准,对 CIELAB 空间进行色调校正,构建一个色调恒常的颜色空间,记作 tLAB 空间;实现时利用 3D_LUT 描述 CIELAB 和 tLAB 之间的转换关系,既保留了现有色彩管理架构和色域匹配软件的可用性,又不增加时空代价.实验表明,利用 tLAB 空间实施色域匹配的结果明显优于 CIELAB 空间,且用其替代 CIELAB 空间实施色彩管理具有很好的实时性和普适性.

2　色彩管理流程

为描述 ICC 色彩管理流程,记 PCS 色彩空间为 Ω_{PCS},设备色彩空间为 Ω_{device},并作如下定义:

定义 1　设备变换 $l = F_{device}(d)$, $d \in \Omega_{device}$, $l \in \Omega_{PCS}$;设备反变换 $d = F_{device}^{-1}(l)$.

定义 2　设备色域

$G = \{l \in \Omega_{PCS} \mid \exists\, d \in \Omega_{device}, F_{device}(d) = l\}$.

定义 3　色域匹配 $D: \Omega_{PCS} \rightarrow G$,满足

$\forall\, l \in \Omega_{PCS}, D(l) \in G$.若 $E(\cdot)$为评价函数,则最优色域匹配 $D_{opt} = \arg\min_{D} E(l, D(l))$.

在显示图像打印再现时,色彩管理流程使用的设备色彩空间包括 $\Omega_{Monitor}$ 和 Ω_{Print},并选择 CIELAB 空间 Ω_{Lab}作为 PCS 空间.如记 $H = \{H_{i,j} \mid 1 \leqslant i \leqslant M, 1 \leqslant j \leqslant N\}$, $H_{i,j} \in \Omega_{Monitor}$为一幅彩色图像,则其色彩管理流程如图 1 所示.

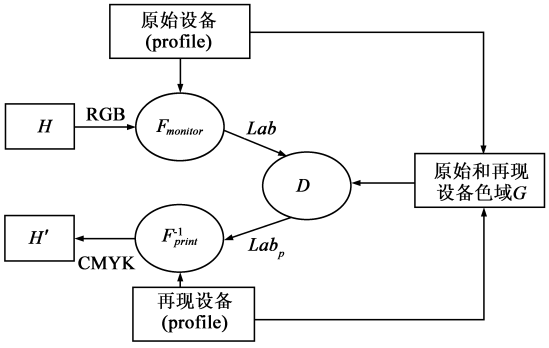


图1　色彩管理流程图

从图中可以看出,彩色图像 H 经 ICC 色彩管理系统后的输出图像:

$$H'_{i,j} = (F_{print}^{-1} D F_{monitor})(H_{i,j}) \qquad (1)$$

3　CIELAB 空间色调非恒常性分析

孟塞尔颜色系统是目前国际上广泛采用的颜色分类和颜色标定系统.它从心理学角度,根据颜色的视觉特点,按视觉等距(即视觉均匀)的原则来编排颜色.孟塞尔新标数据集提供了最完善的颜色色样,不仅包含了每一色样的色调 H、明度 V、彩度 C 三坐标值,还给出了在 CIE1931 色度系统中的色度坐标 x, y 与亮度因数 Y[12].理论上,孟塞尔颜色系统是色彩管理理想的 PCS 空间,但在实际应用上,由于 HVC 与传统三刺激 RGB、XYZ 的转换关系不能用解析式给出,难以用于色彩测量和色彩管理.目前色彩管理最常使用的 PCS 空间是 CIELAB 空间,其基本具备了视觉均匀性,可用解析式描述 LAB 与传统三刺激 RGB、XYZ 的关系,并用 ab 平面上的角度(公式定义为 $h_{ab} = \arctan(b/a)$)反映色调,用 L 反映明度,用 ab 平面上的半径(公式定义为 $C_{ab} = (a^2 + b^2)^{1/2}$)反映彩度.这一方法的一大不足是不具备色调恒常性,即同一色调角上的颜色并非同色调.

为证明 CIELAB 空间的色调非恒常性,我们利用孟塞尔新标数据设计了以下两个实验.

实验 1　对孟塞尔每个色相页,选取固定明度、不同彩度等级的颜色样品,构成一颜色样本集,其中明度的取值为该色相页中能获得最大彩度的明度,如:对于黄色的色相 5Y,取明度 $V = 8$;对深蓝色的色相 5PB,取明度 $V = 2$.该样本集在 CIELAB 空间 ab 平面的分布情况如图 2 所示.

图 2 中,同色调色构成的连线称作等感知色调线,其中红色(色调角约 54° ~ 64°)、黄绿色(色调角为 108° ~ 120°)、蓝色(色调角约 280° ~ 310°)等区域的等感知色调线,随着彩度的增大,逐渐弯曲.显见,同一色调在 CIELAB 空间的色调角会随彩度而变.

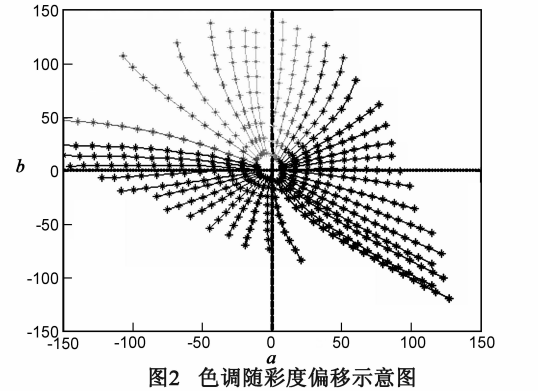


图2　色调随彩度偏移示意图

实验 2　对色相编号分别为 10GY、5P、10RP 的色相页,选取固定彩度、两个明度等级($V = 8$ 和 $V = 2$)的颜色样品,彩度取该色相页中两个明度等级均能达到的最大彩度,如:对于黄绿色的色相 10GY,明度 $V = 8$ 时,最大彩度为 24;明度 $V = 2$ 时,最大彩度为 12,因此取彩度值 12.上述孟塞尔采样点在 CIELAB 空间的计算色调角变化情况如图 3 所示.

图 3 中箭头表明:相同的感知色调(如 10GY、5P、10RP)当具有不同的明度等级($V = 8$ 和 $V = 2$)时,色调角也会发生偏移.

由此可见,CIELAB 空间的色调并非恒常.

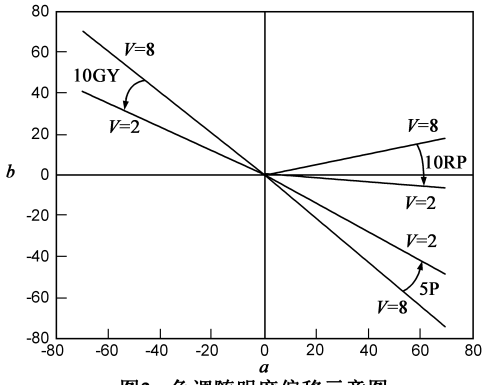


图3 色调随明度偏移示意图

4 基于色调恒常 tLAB 空间的色彩管理

4.1 色调恒常 tLAB 空间的构造

孟塞尔空间是视觉基本均匀的颜色空间,因此,可以引入孟塞尔新标数据构造校正样本集,对 CIELAB 坐标系统进行色调校正,进而生成色调恒常 LAB 空间,记作 tLAB.

令 $l\in\Omega_{LAB}$, $t\in\Omega_{tLAB}$,则校正函数 $T(\cdot)$可定义为

$$t = T(l) \tag{2}$$

若用$\{l_k\}$、$\{t_k\}$,$1\leqslant k\leqslant M_q$ 分别表示校正样本集在 CIELAB 空间和 tLAB 空间的数值坐标集,那么校正函数

$$T(\cdot) = \arg\left(\min_{T}\sum_{i=1}^{M_q}\| T(l_i) - t_i\|^2\right) \tag{3}$$

其中 M_q 为样本数,$\|\cdot\|$ 为 2 范式.

为实现校正函数,首先,构造 CIELAB 空间校正前后的样本集如下:

孟塞尔新标数据的每一颜色样品均给出了 CIE1931 色度坐标 Y、x、y 值[13],将其转换至 CIEXYZ 空间,遵循孟塞尔样本推荐的观察照明 C,再将其转换至 CIELAB 空间,构成样本集在 CIELAB 空间的值集$\{l_k\}$,$1\leqslant k\leqslant M_q$.

定义孟塞尔新标数据的每一色相页的参考色调角

$$H_i = \begin{cases} scale * i, 1\leqslant i\leqslant N_{hue}-1 \\ 0, i = N_{hue} \end{cases} \tag{4}$$

其中,$scale$ 为色调角取值间隔,N_{hue}为选择样本集的色相种类数.将样本集$\{l_k\}$转换到 LCH 空间(其中 L 为明度,C 为彩度,H 为色调角),通过样本所在的色相页,将其源色调角校正到参考色调角 H_i,$1\leqslant i\leqslant N_{hue}$,再将其转换到 LAB 空间,记为$\{t_k\}$,$1\leqslant k\leqslant M_q$,即样本集在 tLAB 空间的值集.其次,对值集$\{l_k\}$和其对应的校正样本集$\{t_k\}$建立四面体网格,采用 3D_LUT 和四面体插值技术来实现校正函数 $T(\cdot)$,完成 CIELAB 空间至 tLAB 空间的转换.

令 tLAB 空间的坐标为 $La'b'$,它保持了 CIELAB 空间中的明度,并且等色调角的颜色具有色调恒常性.通过反向建表和插值可得到逆变换 $T^{-1}(\cdot)$.

4.2 基于 tLAB 空间的色彩管理

利用 tLAB 空间实施色彩管理流程如图 4.由于 ICC Profile 记录的照明一般为 $D50$,而 T 变换遵从孟塞尔系统推荐的照明 C,因此在进行 T 变换之前,引入了色适应变换 C_{illum},进行照明校正.同理,在进行设备反变换 $F_{pr\,\mathrm{int}}^{-1}$之前,需进行色适应逆变换 C_{illum}^{-1}再将照明校正至 $D50$ 下.

因此,打印输出图像可以表示为:

$$H'_{i,j} = ((F_{print}^{-1}C_{illum}^{-1}T^{-1})D (TC_{illum}F_{monitor}))(H_{i,j}) \tag{5}$$

由于 T 变换采用 3D_LUT 实现,与显示器和打印机 profile 的存储结构相一致,因此可以和 $F_{monitor}$合并,生成统一的 3D_LUT;同理,T^{-1}变换亦可与 $F_{pr\,\mathrm{int}}^{-1}$的查找表合并,生成统一的 3D_LUT.

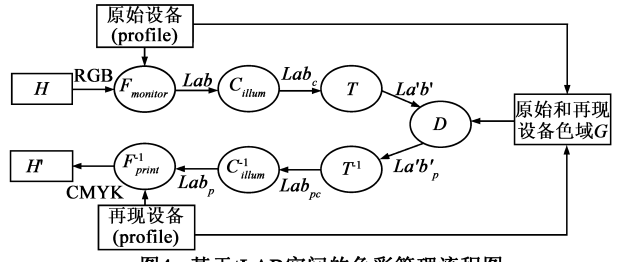


图4 基于tLAB空间的色彩管理流程图

显然,将色调恒常色彩空间 tLAB 作为色彩管理系统的 PCS 空间,并且重新定义显示器和打印机的设备变换算子:

$$F'_{monitor} = TC_{illum}F_{monitor} \tag{6}$$

$$(F_{print}^{-1})' = F_{print}^{-1}C_{illum}^{-1}T^{-1} \tag{7}$$

实际上,tLAB 空间和传统 CIELAB 空间在存储方式、运算过程和效率上完全相同,既能在不增加任何时空开销的前提下,保留传统色彩管理系统的架构,又能在色调恒常空间中进行色域匹配,提高色彩管理的性能.

5 实验结果及分析

为验证在 tLAB 空间进行色彩管理的有效性,实验选取一幅简单色块图和 TC-803 提供的色域匹配标准测试图(如图 5(a)和图 6(a))为测试对象;选用传统的最小色差裁剪算法和基于视觉特性的最优色域匹配算法[14]作为色域匹配算法;令 $N_{hue}=40$, $scale=9$, $M_q=2729$;目的色域为柯达提供的标准打样色域.

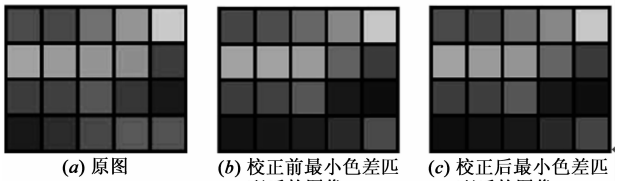
图 5(b)和图 5(c)分别给出了在 CIELAB 空间和 tLAB 空间进行最小色差裁剪算法匹配后的图像.从图 5(b)可看出,原图中的红色色块(第 1 行第 2 列)在 CIELAB 空间匹配后变为橙色;浅绿色色块(第 2 行第 2

列)匹配后变为浅黄色;蓝色色块(第 3 行第 5 列)匹配后变为紫色.而在图 5(*c*)中,这些色块的色调均得到了很好的保持.图 6(*b*)和图 6(*c*)分别给出了在 CIELAB 空间和 tLAB 空间进行基于视觉特性的最优色域匹配算法匹配后的图像.从图中可看出,原图中的蓝色车身部分(图 6 中白色圆圈标识区域)在图 6(*b*)中变为粉紫色,而在图 6(*c*)的色域匹配图像中仍为蓝色.显然,在 tLAB 空间进行色域匹配保证了原图像的色调恒常.

现有的图像质量客观评估方法如 CIELAB、CMC、CIE94、CIEDE2000 等均使用 CIELAB 空间,由于 CIELAB 空间存在色调非恒常性,其提供的定量值并不总能反映人眼所感知的色差.因此,在定量评价方面,本文提出利用色调恒常的 tLAB 空间进行质量评价.结果表明,在 tLAB 空间进行质量评价更能真实反映人眼的主观效果.图 5、图 6 在新空间进行色差计算的结果如表 1 所示.其中色差 $\Delta E_{tab}=\sqrt{(L_1-L_2)^2+(a_1'-a_2')^2+(b_1'-b_2')^2}$,$\Delta E_{t00}$与文献[15]中给出的 CIEDE2000 色差公式类似,只是用 tLAB 空间的(a',b')值替换了 CIELAB 空间的(a,b).从表 1 可以看出,在校正后的空间进行色域匹配,匹配后图像与源图的平均 ΔE_{tab}与 ΔE_{t00}色差均比校正前要小,这表明新空间比 CIELAB 空间更适合进行色域匹配.

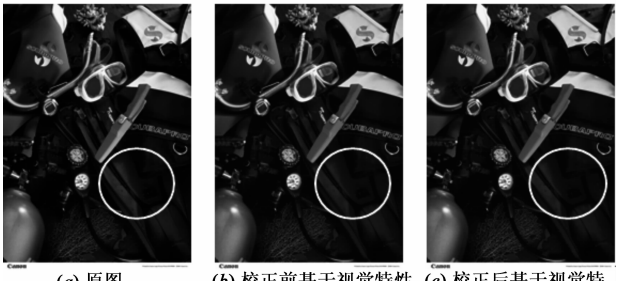
表 1　校正前后色差统计表

	校正前 ΔE_{tab}	校正后 ΔE_{tab}	校正前 ΔE_{t00}	校正后 ΔE_{t00}
图 5	16.422	12.0235	6.5781	4.6620
图 6	7.2213	4.5142	3.0957	2.1812



(*a*) 原图　(*b*) 校正前最小色差匹配后的图像　(*c*) 校正后最小色差匹配后的图像

图5　色域匹配色块测试图



(*a*) 原图　(*b*) 校正前基于视觉特性匹配后的图像　(*c*) 校正后基于视觉特性匹配后的图像

图6　色域匹配标准测试图

6　结论

本文针对 CIELAB 空间的色调非恒常性,提出以视觉均匀的孟塞尔空间为标准,建立色调恒常的颜色空间 tLAB 的方法,并将该方法应用于色彩管理.tLAB 空间采用离散数据集的形式,通过预先生成通用 3D_LUT,存储至输入/输出设备 profile,将 tLAB 空间作为 ICC Profile 的 PCS 空间,从而保持了传统色彩管理系统的构架,且不增加额外的时空开销.最后给出了利用 tLAB 空间进行色域匹配的效果,以及新的图像质量评价方法.基于 tLAB 空间的色彩管理可应用于任何跨设备的图像再现,具有很好的实时性和普适性.

作者简介:

罗雪梅　女,1982 年生于湖北省黄冈市.西安电子科技大学计算机学院讲师,博士.研究方向为计算机色彩管理、计算机图形图像处理.E-mail:luoxuemei@xidian.edu.cn

曾　平　男,1956 年出生于重庆市.西安电子科技大学教授,博士生导师.研究方向为计算机图形学、计算机图像处理、色彩管理技术、计算机外部设备技术等.

E-mail:zengp@xsyu.edu.cn

参考文献:

[1] J C King. Why color management? [A]. SPIE Proc. of the 9th Congress of the International Colour Association [C]. New York: SPIE, 2001. 4421. 439 – 445.

[2] V Michael, S Eli, et al. Color image generation and display technologies[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(1): 23 – 33.

[3] M J Vrhel, T H Joel. Color device calibration: a mathematical formulation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(12): 1796 – 1806.

[4] J Morovic. To develop a universal gamut mapping alogrithm [D]. Ph D Thesis, University of Derby, 1998.

[5] 刘瑞华,曾平,王义峰.一种自适应分区回归的打印机色彩校正方法[J].电子学报,2007,35(11):2201 – 2204.
Liu Ruihua, Zeng Ping, Wang Yifeng. A color calibration method of printer using adaptive regression[J]. Acta Electronical Sinica, 2007, 35(11): 2201 – 2204. (in Chinese)

[6] 王义峰,曾平,王莹,罗雪梅.基于色域划分的多通道打印机色彩校正[J].电子学报,2010,38(3):507 – 511.
Wang Yifeng, Zeng Ping, Wang Ying, et al. Multi-channel printer characterization based on gamut partition[J]. Acta Electronical Sinica, 2010, 38(3): 507 – 511. (in Chinese)

[7] J Morovic. M R Luo. The fundamentals of gamut mapping: A survey[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2001, 45(3): 283 – 290.

[8] G J Braun, M D Fairchild. General-purpose gamut-mapping algorithms: Evaluation of contrast-preserving rescaling functions for color gamut mapping[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2000, 44(4): 343 – 350.

[9] N Moroney. A hypothesis regarding the poor blue constancy of CIELAB[J]. Color Research and Application, 2003, 28(5): 371 – 378.

(下转 2668 页)