

文章编号: 0253-2239(2010)07-2170-05

IPT 色空间及其均匀性研究

黄小乔 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 IPT 色空间在色域映射和图像色貌模型研究中得到应用。介绍了 IPT 色空间, 采用 D65 光源下的孟塞尔系统和 Ebner 和 Fairchild 提出恒常色相数据研究了 IPT 色空间的均匀性。孟塞尔系统的三刺激值 XYZ 作为 IPT 色空间输入值, 计算明度、彩度和色相, 并与 CIELAB 色空间计算结果进行均匀性比较。结果表明, 在明度均匀性方面, 两个色空间结果基本相似, CIELAB 色空间比 IPT 色空间稍好; 在彩度均匀性上, CIELAB 色空间较好于 IPT 色空间; 在色相均匀上, 采用孟塞尔系统数据的计算结果中 IPT 色空间在对蓝色色相预测和各个色相角的线性关系要比 CIELAB 色空间好, 而对于 Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据, IPT 色空间的色相均匀性明显优于 CIELAB 色空间。

关键词 视觉光学; 均匀性; 孟塞尔系统; 恒常色相

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2170

Study on the Uniformity of IPT Color Space

Huang Xiaoqiao Shi Junsheng

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

Abstract The IPT color space has been used in the study of gamut mapping and image color appearance model. The uniformity of IPT was investigated using Munsell system and Ebner and Fairchild's constant hue data sets, and compared with calculated ones of CIELAB color space. Tristimulus value X, Y and Z of Munsell data set with an illuminant of D65 were used as input of IPT and CIELAB to compute lightness, chroma, and hue. The calculated results showed that; IPT and CIELAB models have similar performance in lightness uniformity; CIELAB has better performance than IPT in chroma uniformity; on hue uniformity, the IPT is only better in blue area and has better linear relation in every hue angle than CIELAB with Munsell data set, however, the IPT is better than CIELAB with Ebner and Fairchild's constant hue data sets.

Key words visual optics; uniformity; Munsell system; constant hue

1 引 言

近年来,随着彩色数字媒体设备使用的普及,实现跨媒体的彩色图像真实重现的颜色管理系统(CMS)^[1]、描述不同观察条件下颜色的色貌模型(CAM)^[2]以及描述图像色貌的图貌模型(iCAM)^[3]成为颜色科学及工程的研究热点^[4]。

颜色管理系统一般包括三个模块,输入输出设备颜色特性化、色貌模型变换和色域映射^[5]。色相

均匀在色域映射方面非常重要^[6],色域映射是一个沿着恒常知觉色相,通过改变明度或彩度来处理图像的每一个像素。许多色空间,如 CIELAB 和 CIECAM97s,恒常色相角并不代表恒常知觉色相,不能满足色域映射。在色彩复制流程中,彩色图像由色貌模型转换后,若色相的预测不准确,再经色域映射处理,也会造成色域映射结果有误差。为此,1998 年 Ebner 和 Fairchild 为图像处理应用提出的

收稿日期: 2009-07-21; 收到修改稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(60668001)和云南省教育厅科学研究基金(08Y0143)资助课题。

作者简介: 黄小乔(1981—),男,硕士,讲师,主要从事颜色科学与图像处理等方面的研究。

E-mail: hxq-km@foxmail.com

* 通信联系人。E-mail: shi-js@263.net

IPT 色空间^[6], 恒常色相代表恒常感知色相, 有较高的精确度。这样一个色空间虽然不能解决所有的色貌问题, 但说明了这样一个色空间在实际应用的重要性, 并且可以使用在要求色域映射相关的应用中。

在图貌模型研究中, Fairchild^[3] 采用 IPT 作为计算色貌色空间, 不仅仅因为其色空间的均匀性, 而且具有对图像处理简单, 同时通过亮度影响因子 F_L , 调节 IPT 非线性指数 ($0.43F_L$), 可以实现预测图像对比度随环境亮度和范围的变化, 如 Hunt、Stevens、Bartleson-Breneman 效应和高动态范围图像再现等应用。

文献[6]指出, IPT 色空间是一个简单的、均匀的色空间, 它对色相的预测比以往其它色空间较为准确, 在明度与彩度预测上与 CIELAB 类似。本文用孟塞尔系统均匀色空间颜色数据, 研究 IPT 色空间在明度、彩度和色相上预测的均匀性, 并与 CIELAB 色空间的均匀性进行比较, 为实际应用中色空间的选取提供理论参考。

2 IPT 色空间

IPT 既是一个均匀色空间, 也是一个对立色空间, 它的命名来自于原文 Intensity、Protan 及 Tritan 的缩写^[6]。其中 I 代表明度轴、 P 代表红-绿轴、 T 代表黄-蓝轴, IPT 与 CIELAB 色空间的色彩属性值相同。值得注意的是, CIELAB 的量化范围与 IPT 完全不同。IPT 数值范围分别为: I 为 $\{0 \sim 1\}$, P 与 T 均为 $\{-1 \sim 1\}$ 之间。所以, 为了能与 CIELAB 相互转换对应, 需要分别将 $I \times 100$, $P \times 150$, $T \times 150$, 如此才能符合 CIELAB 色彩定义范围。

IPT 色空间输入的数据是 D65 照明下 2° 观察者 CIEXYZ, 通过锥细胞响应空间变换到 IPT 空间, 变换如下:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7075 & -0.0807 \\ -0.2280 & 1.1500 & 0.0612 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9184 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, (1)$$

$$L' = L^{0.43}, \quad L \geq 0$$

$$L' = -|L|^{0.43}, \quad L < 0$$

$$M' = M^{0.43}; \quad M \geq 0$$

$$M' = -|M|^{0.43}; \quad M < 0$$

$$S' = S^{0.43}; \quad S \geq 0$$

$$S' = -|S|^{0.43}; \quad S < 0, (2)$$

$$\begin{bmatrix} I \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 \\ 4.4550 & -4.8510 & 0.3960 \\ 0.8056 & 0.3572 & -1.1628 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix}. (3)$$

3 IPT 色空间均匀性及与 CIELAB 比较结果

3.1 评价色空间均匀性数据

孟塞尔系统是被公认的一个均匀的颜色空间, 目前国际上广泛采用孟塞尔颜色系统作为分类、标定表面色和色貌模型研究^[7~9]。Ebner 和 Fairchild 用 30 个观察者测试出了一组恒常感知色相数据。该组数据包含 CIELAB 色空间中以 24° 为等间隔分布的 15 个色相角上的 306 种颜色^[10,11]。数据给出了每一个色相角对应数据在 D65 光源下的 XYZ 值。Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据已广泛应用于各种色相的相关计算中^[6,12,13]。

3.2 明度均匀性

图 1 和图 2 分别以孟塞尔系统的明度 $V(2.5 \leq V \leq 9)$ 作为横轴, 并将对应的 XYZ 作为输入计算出的

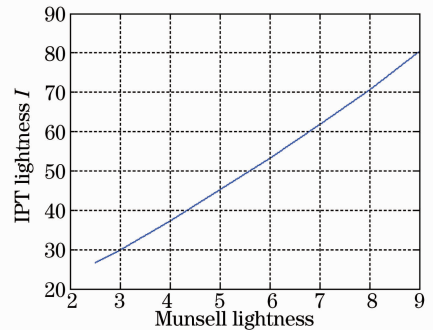


图 1 孟塞尔明度与 IPT 明度关系曲线

Fig. 1 Calculated lightness in IPT color space versus Munsell lightness

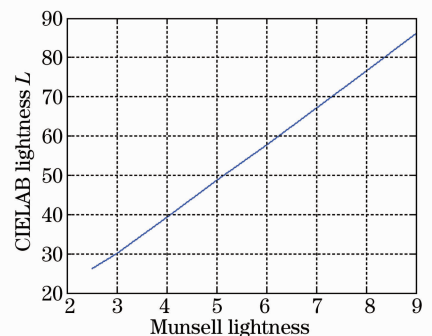


图 2 孟塞尔明度与 CIELAB 明度关系曲线

Fig. 2 Calculated lightness in CIELAB color space versus Munsell lightness

IPT、CIELAB 明度值 I 和 L 为纵轴。从图可以看出,在预测属性明度 L 时,CIELAB 的线性关系比 IPT 要好;进一步计算出两种模型预测的明度与孟塞尔明度的相关系数,CIELAB 预测的明度与孟塞尔明度的相关系数达到了 0.999,IPT 与孟塞尔明度的相关系数是 0.991。由图 1 和 2 可以看出 IPT 色空间明度 I 的均匀性比 CIELAB 的明度 L 的均匀性要稍差,但差别不是很明显。

3.3 彩度均匀性

选择孟塞尔系统彩度 C 最多的明度值为 5 的等明度面为研究对象,明度值 $V=5$,彩度分别为 2,4,6,8,10 的各个色块在 a^*b^* 、PT 空间中的分布如图 3,图 4 中的小圆圈所示。在理想的情况下,如果颜色空间的彩度是均匀的,则由相同彩度、不同色相的颜色构成的彩度圈在其对立色平面上应该是理想的圆,即同一彩度圈内的半径处处相等,并且相邻彩度圈之间的间距是相等的。分别对 CIELAB 和 IPT 两个模型各个彩度预测的数据进行拟合,如图 3,图 4 所示,从图中可以看出,IPT 色空间在明度值 $V=5$ 的 PT 图中各等彩度圈的数据拟合曲线是椭圆;而 CIELAB 空间在明度值 $V=5$ 的 a^*b^* 图中各等彩度圈的数据轨迹虽然不是标准的圆,但能用圆较好地拟合。从图中也可以看出 IPT 颜色空间的 PT 图中各等彩度圈之间的间隔也是不相等的。CIELAB 色空间的 a^*b^* 图,无论是从同一彩度圈还是不同彩度的间隔都明显优于 IPT 色空间。所以 CIELAB 色空间的彩度均匀性要明显好于 IPT 色空间。

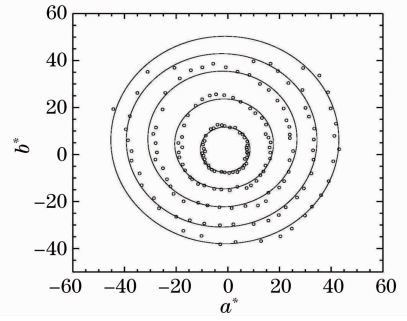


图 3 CIELAB 彩度(孟塞尔 $V=5$)

Fig. 3 Chroma performance of CIELAB

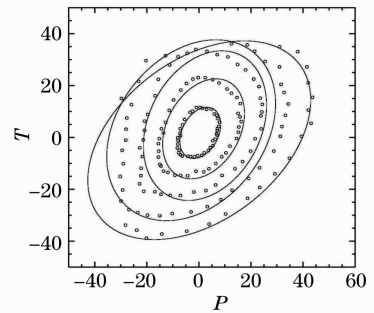


图 4 IPT 彩度(孟塞尔 $V=5$)

Fig. 4 Chroma performance of IPT

3.4 色相均匀性

3.4.1 采用孟塞尔系统

分别计算孟塞尔系统中每种色相 H 的标号为 2.5,5,7.5,10 的四个等级,文中色相等级用 h 表示的色卡的 CIELAB 的 $L^*a^*b^*$ 和 IPT 值,R,YR,Y,GY,G,BG,B,PB,P,RP 10 种主色相在 a^*b^* 、PT 图上的分布如图 5 和图 6 所示。

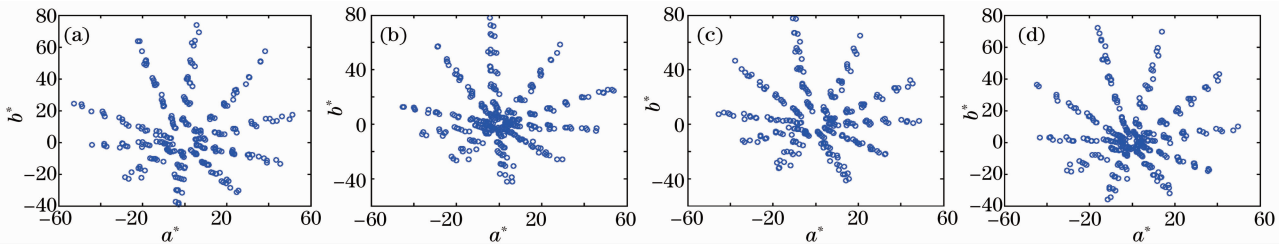


图 5 CIELAB 色相。(a) $h=2.5$;(b) $h=5$;(c) $h=7.5$;(d) $h=10$

Fig. 5 Hue performance of CIELAB. (a) $h=2.5$;(b) $h=5$;(c) $h=7.5$;(d) $h=10$

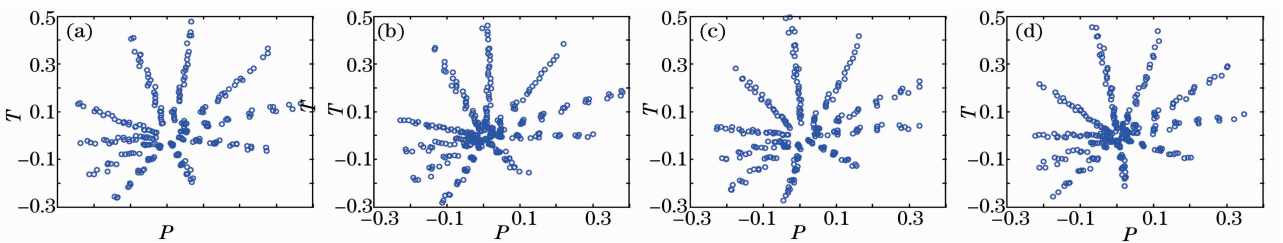


图 6 IPT 色相。(a) $h=2.5$;(b) $h=5$;(c) $h=7.5$;(d) $h=10$

Fig. 6 Hue performance of IPT. (a) $h=2.5$;(b) $h=5$;(c) $h=7.5$;(d) $h=10$

一个理想的均匀颜色空间,具有相同色相的颜色数据在色度图上绘制的应是以(0,0)为起点,一系列夹角相同的射线^[14]。从图 5,图 6 可以看出,各色相在 a^*b^* 图上的射线夹角的均匀性明显要好于 PT 图上的分布,但图 5 中各图左下角的蓝色相部分显得极不均匀,许多离散点严重偏离了应在的射线,几乎形成了几个独立的色相(多个射线);图 6 中蓝色相的分布有一定的改善,但 G, BG, B, PB 四个色相偏离得较为严重。

为了更清楚地比较 CIELAB 和 IPT 色空间对同一色相预测情况,选择色相等级 h 为 5 的孟塞尔系统进行进一步研究,计算 R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, RP 十种主色相的色相角。图 7 所示的是各色相角偏离其平均值的平均值,图 8 所示的是各色相角的最大值与其平均值的偏离值。从图中可以看出,除了 G, P 色相外,其余各色相无论是从各色相角与其平均值的偏离程度,还是从各色相角的最大值与其平均值的偏离值来看, IPT 色空间都比

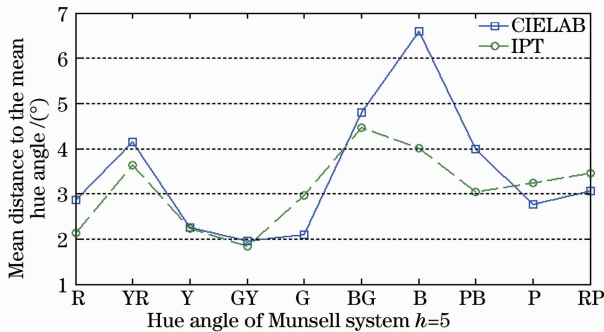


图 7 CIELAB 和 IPT 色空间 10 个主色相角的平均偏离值分布图(孟塞尔 $h=5$)

Fig. 7 Distribution map of average deviation for 10 principal hue angle in CIELAB and IPT spaces(Munsell $h=5$)

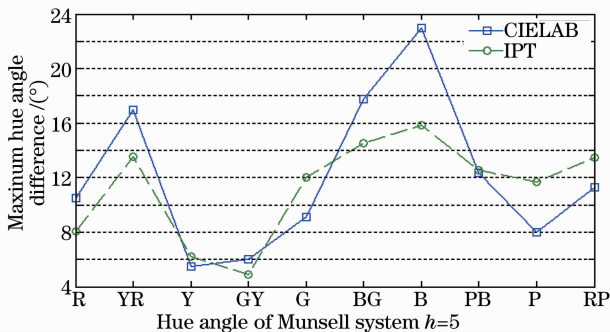


图 8 CIELAB 和 IPT 色空间 10 个主色相角的最大偏离值分布图(孟塞尔 $h=5$)

Fig. 8 Distribution map of maximum deviation for 10 principal hue angle in CIELAB and IPT spaces (Munsell $h=5$)

CIELAB 色空间要小,说明以 D65 光源下的孟塞尔系统为标准参考, IPT 色空间 PT 坐标中同一色相的线性关系比 CIELAB 空间中 a^*b^* 稍好。同时,从图 5,图 7 和图 8 可以看出, CIELAB 空间在蓝色色相的不均匀性相对突出。

使用孟塞尔系统均匀颜色数据,对 IPT 色相的均匀性结果如下:1) IPT 空间中同一色相的线性关系比 CIELAB 空间要好;2) CIELAB 空间的全部 10 个色调在空间的分布均匀性要比 IPT 空间好。这个结论与文献[6]得出的“IPT 能精确的预测色相,是个色相均匀的色空间,其色相预测比 CIELAB 更准确”不能很好的相吻合,因此,采用文献[7]中提到的 Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据进行进一步的验证。

3.4.2 采用 Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据

Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据各个角度数据在 CIELAB 和 IPT 色空间的 a^*b^* 和 PT 平面中的色相分布图如图 9、图 10 所示。图中的小圆圈代表恒常感知色相数据中参考色相角分别为 $0^\circ, 96^\circ, 168^\circ, 192^\circ, 264^\circ$ 的数据,星号代表色相角为 $24^\circ, 48^\circ, 72^\circ, 120^\circ, 144^\circ, 168^\circ, 216^\circ, 240^\circ, 288^\circ, 312^\circ, 336^\circ$ 的数据。从图中可以看出,对于 Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据, IPT 色空间的色相均匀性比 CIELAB 明显要好。为了更清楚地了解同一色相角的分布情况,图 11,图 12 分别显示了各个色相角偏离平均值和最大色相角偏离平均值的值。通过比较可以发现, IPT 色空间色相角在从 $216^\circ \sim 288^\circ$ 范围内,同一色相角的偏离程度要比 CIELAB 小得多,其余范围二者相差不大。IPT 色空间各个色相角的线性关系要比 CIELAB 好,对于整个空间色相的均匀性, IPT 空间要比 CIELAB 空间均匀。同时,从图 9,图 11 和图 12 可以看出, CIELAB 空间在蓝色色相($264^\circ \sim 288^\circ$)部分不均匀性相对突出。

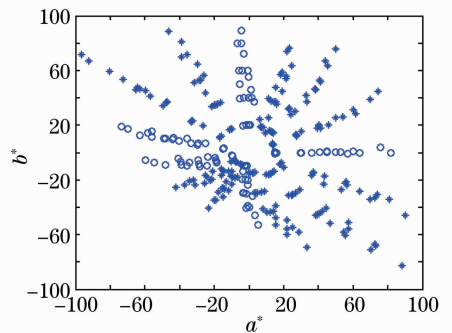


图 9 CIELAB 色相

Fig. 9 Hue performance of CIELAB

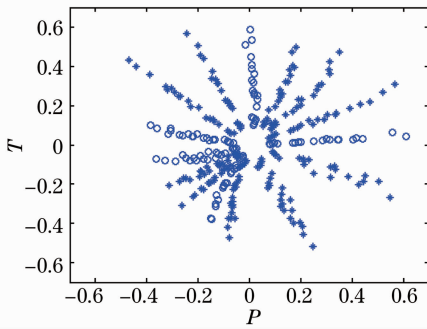


图 10 IPT 色相

Fig. 10 Hue performance of IPT

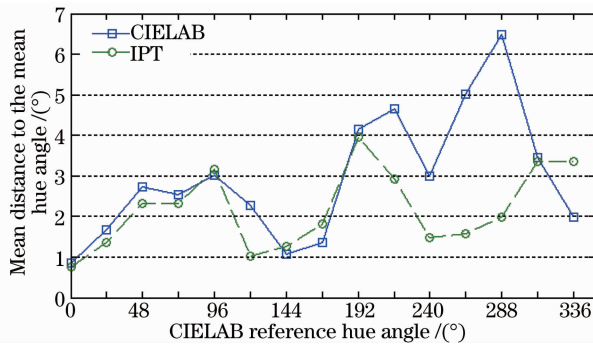


图 11 CIELAB 和 IPT 色空间 15 个色相角的平均偏离值分布图

Fig. 11 Distribution map of average deviation for 15 hue angle in CIELAB and IPT spaces

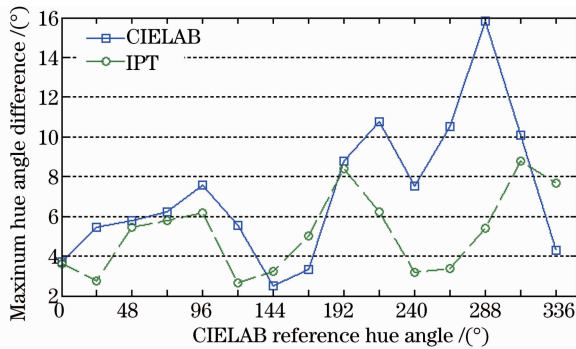


图 12 CIELAB 和 IPT 色空间 15 个色相角的最大偏离值分布图

Fig. 12 Distribution map of maximum deviation for 15 hue angle in CIELAB and IPT spaces

4 结 论

用 D65 光源下的孟塞尔系统作为输入,分别计算了 IPT 色空间和 CIELAB 色空间对明度、彩度和色相的预测,并比较了其均匀性,结论为 1) 明度均匀性,两个色空间结果基本相似,CIELAB 色空间比 IPT 色空间稍好;2) 彩度均匀性,CIELAB 色空间较好于 IPT 色空间;3) 色相均匀性,IPT 色空间在对

蓝色色相预测和各个色相角的线性关系要比 CIELAB 色空间好,这也证明了 CIELAB 色空间对蓝色色相的预测不准确的结论^[15]。但各个主色相之间在 PT 平面的分布均匀性要比在 a^*b^* 平面差。为了更进一步研究 IPT 色空间的色相均匀性,采用了 Ebner 和 Fairchild 恒常感知色相数据,计算结果表明,IPT 色空间的色相均匀性明显优于 CIELAB 色空间,同时也发现,对于恒常感知色相数据 IPT 色空间的色相均匀性也不是特别令人满意,色相角从 $192^\circ \sim 336^\circ$ 之间,色相都不同程度地偏离参考值,其具体原因还有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 ICC: File Format for Color Profiles, Ver. 4. 0. 0: 2001-12, International Color Consortium, 2001
- 2 CIE Publication 159: A Colour Appearance Model for Colour Management Systems; CIECAM02, 2004, CIE Central Bureau, Vienna, Austria
- 3 M. D. Fairchild, G. M. Johnson, Meet iCAM: a next-generation color appearance model [C]. IS&T/SID 10th Color Imag. Conf., 2002. 33~38
- 4 Niao Ningfang, Shi Junsheng, Wu Wenmin. An Introduction to Digital Color Management System[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 2
- 5 廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图图像颜色管理系统概论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 2
- 6 Xiangdou Zhang, Haisong Xu. An adaptively spatial color gamut mapping algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, 7(9): 873~877
- 7 F. Ebner, M. D. Fairchild. Development and testing of a color space (IPT) with improved hue uniformity [C]. IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1998. 8~13
- 8 Yang Weiping, Niao Ningfang, Huang Qingmei *et al.*. A new method of cathode-ray tube characterisation based on Munsell system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1039~1044
- 9 杨卫平, 廖宁放, 黄庆梅等. 基于孟塞尔系统的阴极射线管特性化新方法[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1039~1044
- 10 D. R. Wyble, M. D. Fairchild. Prediction of munsell appearance scales using various color appearance models[J]. *Color Research and Application*, 2000, 25(2): 132~144
- 11 Yu Daoyin, Zhang Hong, Li Yunqing *et al.*. A new color space transform method suited to color image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5): 576~579
- 12 郁道银, 张宏, 李云青等. 一种新的适应于彩色图像处理的彩色空间变化方法[J]. *光学学报*, 1995, 15(5): 576~579
- 13 F. Ebner, M. D. Fairchild. Finding constant hue surfaces in color space [C]. SPIE/IS&T Electronic Imaging, 1998, 3300: 107~117
- 14 F. Ebner, M. D. Fairchild. Constant Perceived-Hue Data[DB/OL]. <http://www.cis.rit.edu/fairchild/files/Ebner-Constant-Hue-Data.txt>
- 15 G. J. Braun, M. D. Fairchild. Color gamut mapping in a hue-linearized CIELAB color space [C]. IS&T/SID Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1998, 6: 163~168
- 16 G. D. Finlayson, S. Süsstrunk. Optimization for hue constant RGB sensors [C]. Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference, 2002, 10: 343~348
- 17 Zheng Yuanlin, Yang Shuhui, Zhou Shisheng *et al.*. Research on uniformity of CIE1976 LAB color difference formula [J]. *Packaging Engineering*, 2005, 26(12): 48~49
- 18 郑元林, 杨淑惠, 周世生等. CIE 1976LAB 色差公式的均匀性研究[J]. *包装工程*, 2005, 26(12): 48~49
- 19 N. Moroney. A hypothesis regarding the poor blue constancy of CIELAB[J]. *Color Research and Application*, 2003, 28(5): 371~378