

文章编号: 0253-2239(2010)s100415

基于高斯函数的图像设备加权自适应多项式色度特征化模型

张显斗 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为了提高数字图像设备的色度特征化精度,提出了基于高斯函数的加权自适应多项式模型。对任一目标样本以自适应方式选取距其最近的几个训练样本,设计相应高斯函数作为权重对各个训练样本的贡献率加以调制,通过最小二乘法获得目标样本对应的多项式系数。设计相应实验分别用该模型、普通多项式模型和基于距离反比函数的加权多项式模型实现了数码相机的色度特征化。实验结果表明,在所有训练样本和检验样本组合情况下,提出的基于高斯函数的加权自适应多项式模型均取得了最高的颜色预测精度。

关键词 视觉光学;色度特征化;加权多项式模型;高斯函数;数码相机

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201030.s100415

Adaptively Polynomial Model Based on Gaussian Weighted Function for Colorimetric Characterization of Image Devices

Zhang Xiandou Xu Haisong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract In order to improve the accuracy of colorimetric characterization of digital image devices, an adaptively polynomial model based on Gaussian weighted function is proposed. Certain nearest training samples are adaptively selected for each target sample, and a Gaussian function is designed to weight the contribution of each training sample, and then the least-squares method is adopted to get the coefficients of the corresponding polynomial models. An experiment is implemented to colorimetric characterization of digital still cameras with the proposed model, common polynomial model and polynomial model based on inverse distance weighted function. The experimental results indicate that the prediction accuracy of the proposed model is highest in all the training and testing samples combinations.

Key words visual optics; colorimetric characterization; weighted polynomial model; Gaussian function; digital still camera

OCIS codes 330.0330; 330.1730; 1000.0100

1 引 言

显示器、数码相机^[1]和打印机等数字图像设备在生产、生活和科学研究中得到了广泛应用。但由于不同设备的呈色机理不同,相同驱动值在不同设备上所表示的颜色往往不一样,因此彩色图像在这些设备间传输时经常出现颜色失真现象^[2]。目前用

于解决此类问题的颜色管理系统^[3,4]采用设备无关颜色空间(CIE XYZ, CIE LAB 等)作为间接颜色连接空间实现数字图像设备间的颜色复现,因此建立设备相关颜色空间与设备无关颜色空间的对应关系,即数字图像设备的准确色度特征化是提高彩色图像跨设备颜色复现精度的基础。

收稿日期: 2010-08-21; 收到修改稿日期: 2010-10-27

作者简介: 张显斗(1981—)男,博士研究生,主要从事颜色科学和图像技术等方面的研究。

E-mail: xiandouzhang@126.com

导师简介: 徐海松(1966—)男,教授,博士生导师,主要从事颜色与影像科学、图像技术、光度学和色度学等方面研究。

E-mail: chsxu@zju.edu.cn

显示器的技术发展比较成熟,且其发光特性受外界照明环境的干扰较小,因此根据显示器的发光机理建立相应模型^[5,6]即可实现显示器准确的色度特征化。而对于数码相机和打印机等设备,其设备相关颜色空间与设备无关颜色空间有较强的非线性映射关系,一般通过多项式模型^[7]、三维查找表^[8]及神经网络^[9]等经验法实现其色度特征化,其中多项式模型的应用最为广泛。许多研究者对多项式模型做了进一步改进,如徐艳芳^[10]和 Kotera^[11]等提出的分空间法, Balasubramanian 等^[12]提出的基于距离反比函数的加权多项式法等,都不同程度上提高了数字图像设备的色度特征化精度。本文提出了一种新的基于多项式的色度特征化模型,首先根据目标颜色自适应的选取训练样本,然后设计相应的高斯函数作为权重对各个训练样本的贡献率做进一步调制,获得该样本对应的特定多项式模型系数以预测其色度值。另外以数码相机为例,分别用普通多项式模型、基于距离反比函数的加权多项式模型及本文提出的模型实现其色度特征化,并对这 3 种模型的预测结果进行比较评价。

2 多项式模型

2.1 普通多项式模型(CPM)

多项式模型的基本原理是通过多项式展开的方式建立数字图像设备红、绿和蓝通道驱动值与 CIEXYZ 三刺激值或 CIELAB 颜色空间色坐标值的对应关系。以红、绿和蓝通道驱动值到 XYZ 的变换为例,多项式模型可以表示为

$$t_i = a_{1,i} + a_{2,i}r + a_{3,i}g + a_{4,i}b + a_{5,i}r^2 + a_{6,i}g^2 + a_{7,i}b^2 + a_{8,i}rg + a_{9,i}rb + a_{10,i}gb + a_{11,i}rgb + \dots, \quad (1)$$

式中 t_i 表示颜色样本对应的 i ($i = X, Y, Z$) 刺激值, $a_{s,i}$ ($s = 1, 2, \dots, m, m$ 为多项式项数) 表示 i 刺激值对应的多项式系数, r, g 和 b 分别表示颜色样本对应的红、绿和蓝通道的归一化驱动值。从理论上讲,多项式的展开项可以取任意项的组合及项数,但实际上多项式模型的不同项及项数对模型的颜色预测精度有较大影响,应根据实际需求选择合适的项及项

数。研究表明(1)式所示的 11 项多项式的颜色预测精度较高^[7]。

假设选取 n 个颜色样本作为训练样本以获得(1)式所示的多项式系数,每个颜色样本都对应(1)式所示的一组表达式,则多项式系数可以通过(2)式所示的最小二乘法确定:

$$\mathbf{A}_{i,\text{opt}} = \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \| t_{i,j} - \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{A}_i \|^2 \right\}, \quad (2)$$

式中 $t_{i,j}$ 表示第 j 个颜色样本对应的 i 刺激值, $\mathbf{h}_{i,j}$ 为由常数项 1 及由第 j 个颜色样本归一化驱动值组成的多项式展开项对应的 $1 \times m$ 矩阵, \mathbf{A}_i 为 i 通道对应的大小为 $m \times 1$ 的系数矩阵。将所有 n 个训练样本对应的 i 刺激值用大小为 $n \times 1$ 的矩阵 \mathbf{T}_i ($\mathbf{T}_i = [t_{i,1}; t_{i,2}; \dots; t_{i,n}]$) 表示,对应的归一化驱动值展开项用大小为 $n \times m$ 的矩阵 \mathbf{H}_i ($\mathbf{H}_i = [\mathbf{h}_{i,1}; \mathbf{h}_{i,2}; \dots; \mathbf{h}_{i,n}]$) 表示,通过简单的数学变换,基于最小二乘法的多项式模型待求系数矩阵 \mathbf{A} 可以简单的表示为

$$\mathbf{A}_i = (\mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i)^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{T}_i. \quad (3)$$

通过(3)式确定多项式模型的系数后,对于任一目标颜色 C_i ,即可通过该多项式预测其对应的 CIEXYZ 三刺激值。

2.2 基于距离反比函数的加权多项式模型(DWPM)

上述普通多项式模型的颜色转换效率较高,但实际上,由于设备相关颜色空间与设备无关颜色空间在各个色区的转换特性往往不同,一般很难仅通过一个多项式模型就能使所有样本均获得较高的颜色预测精度。另外,在设备相关颜色空间中,距目标颜色 C_i 较近的训练样本,其对应的 CIEXYZ 三刺激值与 C_i 对应的三刺激值也较接近,这类训练样本对 C_i 的颜色预测精度影响也较大。因此若对任一目标颜色 C_i 都通过权重函数对各个训练样本的贡献率加以调制并建立其特定的多项式模型,这样能很大程度上提高模型的预测精度。

对于任一目标颜色 C_i ,基于加权的最小二乘法可以表示为

$$\mathbf{A}_{i,\text{opt}} = \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_{i,j} \| t_{i,j} - \mathbf{h}_{i,j} \mathbf{A}_i \|^2 \right\}. \quad (4)$$

常用的权重函数为距离反比函数,如下式所示。

$$w_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{(d_{R,t} - d_{R,j})^2 + (d_{G,t} - d_{G,j})^2 + (d_{B,t} - d_{B,j})^2 + \alpha}}, \quad (5)$$

式中 $[d_{R,t}, d_{G,t}, d_{B,t}]$ 和 $[d_{R,j}, d_{G,j}, d_{B,j}]$ 分别表示目标颜色样本 C_i 及第 j 个训练样本对应的驱动值, R, G, B 分别为红,绿,蓝 3 色, α 为避免权重函数出现奇异值的常数,此处取 0.001。经过简单的数学变换,加权多

项式模型系数可以通过(6)式计算得到：

$$\mathbf{A}_i = (\mathbf{H}_i^T \mathbf{W} \mathbf{H}_i)^{-1} \mathbf{H}_i^T \mathbf{W} \mathbf{T}_i, \quad (6)$$

式中 \mathbf{W} 为对角矩阵, 其对角元素为各个训练样本对应的权重。

这样对于任一目标颜色 C_i , 通过(6)式确定其对应的多项式系数, 然后再通过对应的多项式模型即可预测其 CIE XYZ 三刺激值。

2.3 基于高斯函数的自适应加权多项式模型 (GFWPM)

基于距离反比函数的加权多项式模型在一定程度上提高了多项式模型的颜色预测精度, 但对于任一目标样本, 选用所有训练样本预测其对应的加权多项式系数, 这种方法不但效率较低, 而且对距目标样本较远的训练样本可能非但不会提高模型的预测精度, 在某些情况下反而会降低其预测精度。另外, 对于部分目标样本, 可能只有有限几个训练样本距其较近, 大部分训练样本距其较远, 若简单的通过距离反比加权函数对各个样本的贡献率加以调制, 距其较远的训练样本所对应的权重可能很小, 这样对

应的多项式矩阵可能存在病态问题, 进一步会降低模型的预测精度及鲁棒性。为此, 对于任一目标颜色样本 C_i , 基于高斯函数的自适应加权多项式模型在设备相关颜色空间中仅选取离 C_i 最近的 l 个样本作为其训练样本, 然后利用经改进过的高斯函数对所有 l 个训练样本加一定大小的权重, 这样在提高模型预测精度的同时, 还可以避免变换矩阵出现病态问题, 增强了变换的鲁棒性。

高斯函数的基本形式为

$$f(x) = \exp[-(x - \mu)^2 / 2\sigma^2], \quad (7)$$

式中 μ 和 σ 分别影响高斯函数对应曲线的峰值位置和曲率。在目标颜色样本 C_i 处, 对应训练样本的权重应最大, 因此参数 μ 即为 C_i 对应的驱动值坐标 $[d_{R,i}, d_{G,i}, d_{B,i}]$, 另外自变量在偏离峰值 3σ 位置处为高斯函数的拐点且对应的函数值接近于 0, 因此所选取的 l 个训练样本距 C_i 的距离应在 3σ 范围内, 相应的 σ 应为 l 个训练样本中距 C_i 最远训练样本对应距离的 $1/3$ 。因此经改进过的高斯权重函数为

$$f(j) = \exp \frac{-[(d_{R,j} - d_{R,i})^2 + (d_{G,j} - d_{G,i})^2 + (d_{B,j} - d_{B,i})^2]}{\left[2 \times \left(\frac{1}{3} \times \sqrt{(d_{R,l} - d_{R,i})^2 + (d_{G,l} - d_{G,i})^2 + (d_{B,l} - d_{B,i})^2}\right)^2\right]}, \quad (8)$$

式中 $[d_{R,i}, d_{G,i}, d_{B,i}]$ 表示 l 个训练样本中距 C_i 最远的第 l 个训练样本对应的驱动值, $j (j = 1, 2, \dots, l)$ 为样本序号, $f(j)$ 表示第 j 个样本对应的权重。

在基于高斯函数的自适应加权多项式模型中, 离目标颜色样本 C_i 最近的训练样本个数 l 的选择会影响模型的预测精度。 l 过小, 则所对应的转换矩阵会出现病态问题甚至出现多解情况, 相反若 l 过大, 则会出现一般加权多项式模型的问题。一般情况下, l 为多项式模型项数的 2 到 3 倍, 模型的预测精度较高, 本文中令 l 为多项式模型项数的 3 倍。

对任一目标颜色样本 C_i 自适应的选取距其最近的 l 个样本作为训练样本, 通过(8)式对各个训练样本的贡献率加以调制, 然后通过(6)式确定其对应的多项式系数, 即可预测该样本对应的三刺激值。

3 实验装置及样本采集

以数码相机为例, 具体讨论普通多项式模型、基于距离反比函数的加权多项式模型及基于高斯函数的自适应加权多项式模型的色度特征化方法。上述模型都需要训练样本以获得模型参数, 另外也需要

检验样本对模型的预测精度进行检验评价。 GretagMacbeth 公司生产的 ColorChecker DC Chart (CCDC) 和 ColorChecker Color Rendition Chart (CCRC) 标准色卡被广泛用于数码相机的色度特征化, 如图 1 所示, 下面重点分析基于这两种色卡的训练及检验样本获取方法。

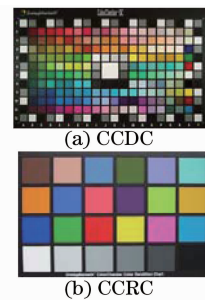


图 1 CCDC 和 CCRC 标准色卡

Fig. 1 CCDC and CCRC color chart

由于数码相机是一种智能的数字图像获取设备, 且需要外界光源照明才能对目标进行拍摄, 因此数码相机的参数设置及外界光源照明的稳定性及均匀性都会影响彩色图像的拍摄效果, 进而影响数码相机的色度特征化精度。为此本文使相机在确定的

手动模式设置下,在标准灯箱中利用数码相机对标准色卡拍照的方式实现其色度特征化,另外还分别设计了照明均匀性和重复性校正白板,以进一步对拍摄系统进行照明均匀性和重复性校正。

具体用于数码相机色度特征化的实验装置如图 2 所示,在暗室中首先将标准灯箱设置在 D65 标准照明环境下,通过照明均匀性白板手动设置数码相机的白平衡,然后手动设置数码相机的焦距,使得拍摄色卡都在相机视场范围内,再设置相机的光圈大小和快门速度,确保色卡中的所有色块都处于数码相机驱动值动态范围内。数码相机参数确定后,将重复性校正白板固定在 45° 支架下方,依次将照明均匀性白板、CCDC 和 CCRC 色卡放在 45° 支架上进行拍照,将拍摄得到的 CCDC 和 CCRC 图像分别按照(9)式和(10)式进行照明均匀性和重复性校正:

$$d'_{k,(i,j)} = d_{k,(i,j)} \frac{u_{k,ref}}{u_{k,(i,j)}}, \quad (9)$$

$$d''_{k,(i,j)} = d'_{k,(i,j)} \frac{v_{k,ref}}{v_k}, \quad (10)$$

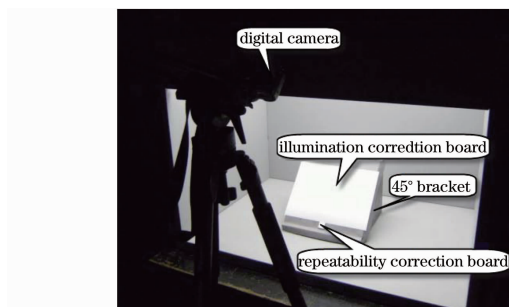


图 2 数码相机色度特征化实验装置

Fig. 2 Experimental setup for colorimetric characterization of digital still camera

式中 k (k 为红,绿,蓝) 表示通道类型, $d_{k,(i,j)}$, $d'_{k,(i,j)}$ 和 $d''_{k,(i,j)}$ 分别表示目标图像在 (i, j) 像素位置对应的 k 通道在校正前、照明均匀性校正后及重复性校正后的驱动值, $u_{k,ref}$ 和 $u_{k,(i,j)}$ 分别表示照明均匀性校正白板图像中心区域及在 (i, j) 像素位置对应的 k 通道驱动值, $v_{k,ref}$ 和 v_k 则分别表示与照明均匀性校正白板及目标图像同时拍摄的重复性校正白板中心区域对应的 k 通道平均驱动值。

经过上述步骤处理后即可获得 CCDC 和 CCRC 色卡中所有色块对应的通道驱动值,然后用 X-Rite 分光光度计 SP64 测量(漫射照明,不包含镜面反射;8°照明观察几何条件)各个色块对应的光谱反射比,再用 CIE 标准照明体 D65 及 CIE1931 标准色度观察者计算各个色块对应的 XYZ 三刺激值。这

样,两个色卡中所有色块对应的驱动值及 XYZ 三刺激值即可组合成不同的训练样本和检验样本,供各种多项式模型进行比较评价。

4 实验结果及讨论

下面以 11 项多项式模型为例分析讨论普通多项式模型(CPM)、基于距离反比函数的加权多项式模型(DWPM)及基于高斯函数的自适应加权多项式模型(GFWPM)用于数码相机色度特征化的颜色预测精度。

首先选取 CCDC 色卡中奇数彩色色块作为训练样本,分别用这 3 种模型预测偶数彩色色块的 CIE XYZ 三刺激值,然后计算预测三刺激值与实测三刺激值的 CIEDE2000 色差^[13~15],各个检验样本的预测结果如图 3 所示,图中横、纵坐标分别表示 CCDC 色卡中色块序号及对应的 CIEDE2000 色差。可以明显看出,CPM 的预测精度最低,部分色块的预测色差高于 10,而经过加权函数调制后的 DWPM 和 GFWPM 的预测精度明显高于 CPM,整体上 GFWPM 的预测精度也高于 DWPM。3 种模型对所有检验样本预测色差的统计结果如表 1 中的 2~4 列所示,再次表明 GFWPM 的预测精度最高,尤其可以明显降低最大预测色差。另外,对所有检验样本的平均预测色差为 1.41,整体上获得了较高的颜色预测精度。

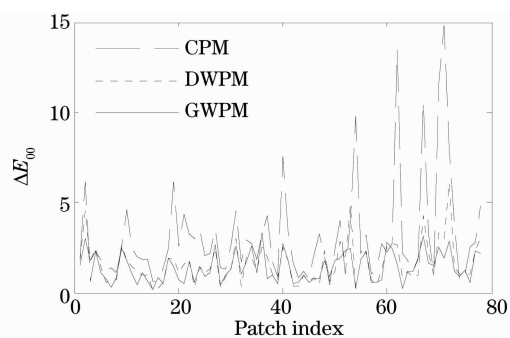


图 3 三种模型对 CCDC 色块的预测色差
Fig. 3 Predictive color difference of CCDC patches by three models

为了考察训练样本和检验样本介质不同时 CPM, DWPM 和 GFWPM 的预测精度,选取 CCDC 色卡中所有彩色色块作为训练样本,CCRC 所有色块作为检验样本。3 种模型对所有检验样本的预测色差如图 4 所示,其中横、纵坐标分别表示 CCRC 色卡中色块序号及 CIEDE2000 色差。再次可以看出 CPM 的预测精度最低,其次为 DWPM, GFWPM 的预测精度最高。表 1 中的 5 到 7 列给出了这 3 种

模型对 CCRC 色块预测色差的统计结果,可以看出对应色差明显大于 2 到 4 列所示结果,说明训练样本和检验样本介质的不同整体上会降低模型的预测精度,这主要是由于介质间的同色异谱^[7]引起的。

表 1 CPM, DWPM 及 GFWPM 在不同训练样本和检验样本组合下的预测色差

Table 1 Predictive color difference of CPM, DWPM and GFWPM with different training and testing sample combinations

ΔE_{00}	CCDC odd patch \rightarrow CCDC even patch*			CCDC \rightarrow CCRC		
	CPM	DWPM	GFWPM	CPM	DWPM	GFWPM
Minimum	0.45	0.13	0.17	1.19	0.46	0.49
Mean	3.10	1.62	1.41	4.07	2.73	2.34
Maximum	14.85	6.12	3.32	10.71	6.26	5.33

Note: A \rightarrow B represents that 'A' and 'B' are training and testing samples respectively.

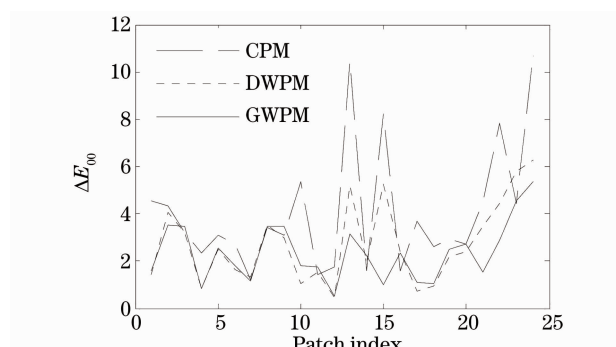


图 4 三种模型对 CCRC 色块的预测色差

Fig. 4 Predictive color difference of CCRC patches by three models

5 结 论

首先概括分析了数字图像设备色度特征化的研究背景及针对不同设备的色度特征化方法,然后重点介绍了普通多项式模型及基于距离反比函数的加权多项式模型的色度特征化原理,并分析了这两种模型的优缺点。在此基础上,提出了基于高斯函数的自适应加权多项式模型。为了对上述模型进行比较评价,设计相关实验利用这 3 种模型实现了数码相机色度特征化,结果表明,通过加权方法明显可以提高多项式模型的预测精度。另外,本文提出的基于高斯函数的自适应加权多项式模型在训练样本选取、计算量和变换的稳定性、预测精度等方面的指标均明显优于基于距离反比函数的加权多项式模型。

参 考 文 献

- Chen Yiyi, Xu Haisong, Zhang Xiandou *et al.*. Study of spectral reconstruction based on digital camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1416~1419
陈奕艺, 徐海松, 张显斗等. 基于数码相机的光谱重构研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1416~1419
- X. D. Zhang, H. S. Xu. An adaptively spatial color gamut

但即使在训练样本和检验样本介质不同的情况下, GFWPM 仍取得了较高的颜色预测精度,进一步验证了该模型的有效性。

- mapping algorithm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 873~877
- International Color Consortium. ICC. 1, 2004, Version 4. 2, 6~8. <http://www.color.v4spec.salter>
- Windows color system; the next generation color management system. <http://www.microsoft.com/whdc/device/display/color/wcs.mspx>, 2005
- R. S. Berns, R. J. Motta, M. E. Gorzynski. CRT colorimetry. Part I: Theory and practice[J]. *Color Res. Appl.*, 1993, **18**(5): 299~314
- Zhang Xiandou, Xu Haisong. Piecewise partition model accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1719~1724
张显斗, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的分段分空间模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1719~1724
- G. W. Hong, M. R. Luo, P. A. Rhodes. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(1): 76~84
- P. Hung. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations[J]. *J. Imaging Sci. Technol.*, 1993, **2**(1): 53~61
- H. R. Kang, P. G. Anderson. Neural network applications to the color scanner and printer calibrations [J]. *J. Electron. Imaging*, 1992, **1**(2): 125~135
- Xu Yanfang, Huang Min, Liu Haoxue *et al.*. Color transformation based on the hue division for color scanners[J]. *Information Recording Materials*, 2007, **8**(1): 55~58
徐艳芳, 黄敏, 刘浩学等. 基于色调区域分割的扫描仪颜色转换[J]. *信息记录材料*, 2007, **8**(1): 55~58
- H. Kotera, A. Ishige, H. S. Chen *et al.*. High precision scanner/printer calibration in subdivided color spaces [J]. *J. Imaging Sci. Technol.*, 1999, **43**(2): 178~186
- R. Balasubramanian, M. S. Maltz. Refinement of printer transformations using weighted regression [C]. *SPIE*, 1996, **2658**: 334~340
- M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350
- Wang Zhehong, Xu Haisong. Evaluation of color-difference formulate based on the correlation between visual tolerances and hue angles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1838~1841
汪哲弘, 徐海松. 基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1838~1841
- Wang Han, Xu Haisong, G. H. Cui *et al.*. Evaluation of very large colour difference based on object surface colours[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1801~1806
王寒, 徐海松, G. H. Cui等. 基于物体表面色的超大色差评价[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1801~1806