

# 普通办公照明环境下数码照相机的颜色特性化

宓超波 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 650500)

**摘要** 彩色数字设备颜色特性化是图像复制色彩管理流程中颜色转换的基础。为了让普通用户也可以实现照相机特性化,在研究白天自然光和夜晚日光灯 2 种办公照明环境下使用仪器特性化的基础上,提出一种自然光办公照明环境下不使用专业仪器的特性化方案,该方案只需要用户拥有一张 ColorChecker 24 色色卡。对特性化精度实验研究结果表明:在普通办公室环境下采用专业仪器测量,日光灯和自然光照明环境下的特性化精度平均在 3.5~3.9 个 CMC(1:1)色差单位;在自然光照明环境下,不使用仪器测量的特性化精度是 3.75 个 CMC(1:1)色差单位,与使用仪器测量的 3.48 个 CMC(1:1)色差单位相比增加非常小;晴朗白天 12:00~15:00,自然光照度变化和色温变化条件下,不使用仪器测量的特性化精度变化在 0.5 个 CMC(1:1)色差单位,说明了该方案具有实用性。

**关键词** 视觉光学;色度学;色彩管理;数码相机;颜色特性化

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0933001

## Colorimetric Characterization of a Digital Camera under General Office Lighting Environments

Mi Chaobo Huang Xiaoqiao Shi Junsheng

(Color and Image Vision Laboratory, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

**Abstract** The colorimetric characterization of digital color devices is the basis of image copy and color management process. Aiming to provide convenience for general users to characterize camera, based on studies of the characterization using instruments to measure samples under two office environments of daylight lighting during the day and fluorescent lighting at night, a characterization scheme that a user does not use professional instruments under daylight lighting is presented, but on one condition that the user has ColorChecker standards 24 color card. The characterization accuracy is studied, and experimental results show that, using professional instruments to measure samples, the characterization accuracy is 3.5~3.9 CMC (1:1) color difference units under environments of fluorescent (lighting and daylight lighting); not using instruments, the characterization accuracy is 3.75 CMC (1:1) color difference units under the environment of daylight lighting, and the difference of characterization accuracy is very small between using and not using instruments; not using instruments, the characterization accuracy varies in 0.5 CMC (1:1) color units at the condition of daylight changes in illumination and color temperature during sunny day from 12:00 to 15:00.

**Key words** visual optics; colorimetry; color management; digital camera; colorimetric characterization

**OCIS codes** 330.1730; 330.1715; 040.1490; 100.2000

## 1 引 言

数码相机不仅是大众电子消费品,而且作为一种主要的图像获取工具,在图形图像、色彩管理、计算机视觉、航天航空、生物医学、通信、工业工程、军

事公安、电子商务等领域应用广泛,扮演着十分重要的角色。虽然其性能不断提高,但拍摄图像的质量受多种因素影响,除了拍摄内容、环境照明、照相机设置,也与使用者拍照技术和经验有关,不同的相机

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61178054)、云南省教育厅科学研究基金(2012Y171)

作者简介: 宓超波(1987—),男,硕士研究生,主要从事颜色技术与数字图像处理等方面的研究。

E-mail: michaobo5178@163.com

导师简介: 石俊生(1960—),男,教授,主要从事颜色科学与光电成像技术等方面的研究。E-mail: shi-js@263.net  
(通信联系人,中国光学学会会员号: S040420574M)

拍摄同一景物得到不同的 RGB 值,所以把照相机 RGB 色空间称作依赖于设备的色空间。在要求精确的颜色再现应用场合,需要将依赖于设备的 RGB 色空间变换到独立于设备的国际照明委员会(CIE) XYZ 或 CIELAB 色空间,这样的颜色变换称作照相机颜色特性化。设备的特性化是图像设备真实复制颜色的一个重要环节<sup>[1-3]</sup>。

按照国际标准<sup>[4-6]</sup>,实际应用中采用的特性化方法一般可分为 2 类:基于光谱响应和基于目标色<sup>[7-8]</sup>的特性化方法。基于光谱响应的特性化方法是在已知照相机三通道光谱响应的条件下,找出数码相机光谱响应和 CIE 的颜色匹配函数之间的关系,建立照相机 RGB 色空间到 CIE XYZ 色空间的变换关系<sup>[9]</sup>。然而,测量相机三通道光谱响应不仅需要专门实验装置和测量器材,而且需要专业测量方法<sup>[10]</sup>,使用的测量器材包括单色仪和辐射仪,并且需要专家在实验室完成<sup>[11]</sup>,一般照相机用户很难实现。其优点是,如果已知光谱响应,可以预测任何已知光源光谱条件下物体的三刺激值,有关照相机光谱响应特性的估计方法也在不断探索中<sup>[12]</sup>。基于目标色方法是将一定数量已知 CIE XYZ 的目标色作为参考色(也称训练样本),通过照相机拍摄参考色获得 RGB,利用三维查找表<sup>[13-14]</sup>、最小二乘多项式回归<sup>[15]</sup>或人工神经网络<sup>[16-17]</sup>等技术计算照相机 RGB 色空间到 CIE XYZ 色空间的变换关系<sup>[11]</sup>。查找表法需要至少 200 个颜色样本,Johnson 在 1996 年用了近 4000 个样本<sup>[14]</sup>,神经网络法也需要大量的样本,而多项式回归法具有参考色相对较少、只需要知道其 XYZ 值、计算方法简单的优点,是一种相对较简单方法。Hong 等<sup>[15]</sup>在 2001 年用多项式回归法对相机特性化进行了详细研究,包括多项式项数、训练样本数量、同色异谱现象以及训练与检验样本材质不同导致反射性能不同等因素对相机特性化精度的影响。实验结果表明,多项式项数为 11 时特性化误差较低;使用 X-rite ColorChecker 24 色色卡作为训练样品本,特性化精度为 1.85 CMC(1:1)色差单位 $[\Delta E_{CMC(1:1)}]$ ;训练与检验样本材质不同时特性化误差增大,文中给出的 3 种不同材质间的平均色差可以达到  $3.97\Delta E_{CMC(1:1)}$ 。最小二乘多项式回归一般选择在 CIE XYZ 色空间,Chouikha 在 2006 年研究了在 CIE  $L^* a^* b^*$  色空间最小二乘多项式回归,比较了采用照相机默认的 sRGB 色空间和照相机实际拍摄得到的 RGB 两种特性化精度<sup>[10]</sup>。对于 Nikon

Coolpix 950 数码相机,使用默认的 sRGB 色空间,照相机测量一系列灰样本和 93 个 NCS 彩色样本,特性化误差平均、最小和最大色差分别是 11.58、2.90、31.03 个 CIELAB 色差单位,不符合应用要求说明该特性化结果是失败的。采用照相机实际拍摄得到的 RGB,三阶拟合的平均、最大和最小色差分别是 2.41、0.19、7.99 个 CIELAB 色差单位;四阶拟合的平均、最小和最大色差分别是 1.79、0.34、6.42 个 CIELAB 色差单位。从已有实验结果看出,虽然好的回归效果需要目标色包括整个色域大量样本<sup>[10]</sup>,但基于目标色的特性化方法不仅操作简单并且也具有一定的特性化精度,满足一般应用的需求,是一种简单实用的方法。

然而,基于目标色特性化方法仍然需要知道参考色的 CIE XYZ 值。参考色一般使用 X-rite 公司的 ColorChecker、ColorCheckerDC 或 ColorChecker SG 色块,也可以自行设计参考色<sup>[11]</sup>。获取参考色 XYZ 值有 2 种方法:1)用色度计或分光光度计测量;2)使用厂家给出的参考色在标准光源下的 XYZ 值。但是,由于实际照明条件很难达到在标准灯箱下的标准光源照明条件,精确特性化仍然需要测量仪器,仍然需要在实验室条件下由专业人员完成,这对于一般用户而言存在较大的困难。基于此原因,本文的研究目标是,用户只要拥有 ColorChecker 色卡以及标准照明条件下的数据<sup>[18-19]</sup>,不需要任何测色仪器就能实现照相机特性化。为此,研究 2 种在普通办公照明环境:白天利用自然光和晚上利用日光灯照明,在使用仪器测量条件下采用传统的基于目标色方法的特性化精度;研究在白天利用自然光照明条件下,直接采用与白天自然光接近的 D50 光源下的标准 CIE XYZ 数据的特性化精度,研究其应用的可能性。

## 2 实验器材与实验环境

### 2.1 实验器材

1) 数码相机:Canon PowerShot G2,拍摄模式采用全手动模式。

2) 光谱辐射度计:Photo Research 公司的 PR-715,用于测量样本的 CIE XYZ 值。

3) 训练检验样本:X-rite 公司 ColorChecker Classic 24 色迷你小色卡和 ColorChecker SG 色卡,如图 1 所示。ColorChecker SG 140 色专业色卡包含了 ColorChecker Classic 的 24 色、皮肤色 14 色、中性色 17 色和其他 44 色(外围的 44 色是 3 种中性

色的重复)。选取 ColorChecker SG 中包含的 ColorChecker Classic 24 色作为训练样本,其余 ColorChecker SG 的全部 75 色作为检验样本。训练与检验样本的 CIELAB 空间  $a^* b^*$  分布图如图 2 所示。图 2 中“+”代表训练样本,“☆”代表检验样

本,可以看出,训练样本的空间分布很广,颜色的饱和度较高;而检验样本是  $L^* a^* b^*$  色空间均匀取值,并且基本与训练样本交叉,其中围绕白点分布样本较多,这些白点附近的颜色是人眼对其色差最敏感、颜色再现最重要的颜色。



图 1 (a) ColorChecker Classic 24 色迷你小色卡; (b) ColorChecker SG 色卡  
Fig. 1 (a) Colorcheck 24 patch dassic target; (b) ColorChecker SG color card

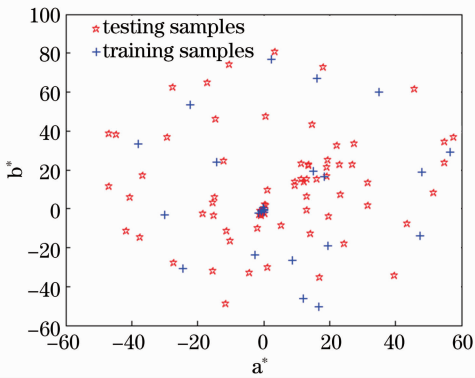


图 2 训练与检验样本在 CIE LAB( $a^* b^*$ ) 色空间分布图

Fig. 2 Color distributions of training and testing samples in CIE LAB( $a^* b^*$ ) diagram

## 2.2 实验环境

1) 地点:昆明,位于北纬  $25.02^\circ$ ,东经  $102.43^\circ$ 。  
2) 办公室环境:窗户向南,地面面积  $6.2 \text{ m} \times 5.4 \text{ m}$ ;房间整个墙面都是普通白墙,除了表面为灰色的电脑桌外,没有其他体积较大的彩色物体。

3) 照明与测量条件:如图 3 所示,办公环境选择 2 种照明方式,分别是:a)白天使用“北窗光”。按照“北窗光”从太阳升起后 3 h 和落下前 3 h,考虑射入房间角度的变化尽可能小,实验时间选择在  $13:00 \sim 15:00$  之间,并且特别注意要天气晴朗。被测量色卡放在房间中央,色卡朝向要避免自然光直射导致照射在训练和检验样本的照度不均匀,使入射房间的自然光经过墙壁反射后照射到样本上。b)晚上使用日光灯。日光灯管飞利浦 TL-D 36W/950 安装在房间顶上,共 4 组 8 支,其中一组离正下方放置的色卡中心距离 1.8 m。使用 PR-715 测量 2 种实际

光源的相对功率谱(PSD)如图 4 所示。图 4(a)为实验期间某天  $13:00 \sim 15:00$  每间隔 1 h 测量的照射在色卡上自然光和标准 D50 光源的相对功率谱;图 4(b)为日光灯作光源时照射在色卡上的光的相对功率谱。从图 4(a)看出,照射在色卡上自然光的相对功率谱与色温非常接近标准 D50 光源,这是下一步研究的基础,也是所提出特性化方法的基础。

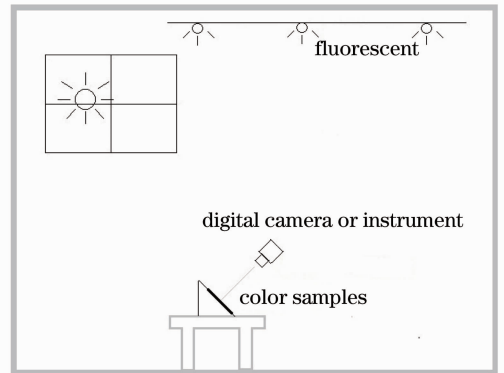


图 3 照相机拍摄和仪器测量色卡示意图

Fig. 3 Diagram of camera and instruments to measure color samples

4) 白天照相机拍摄与仪器测量时间:2013 年 4 月 4 日  $13:30 \sim 14:15$ 。由于测量训练和检验样本需要花费大量时间,在这段时间,自然光的强度和照射角度发生变化,这样将影响特性化精度,为此测量时间应尽可能短一些,实际时间是 45 min。

两种照明条件下实验开始前与实验结束时刻的照度、色温与色品坐标如表 1 所示。从表中可以看出实验所选择的自然光环境色温、色品坐标接近于 D50 光源环境。

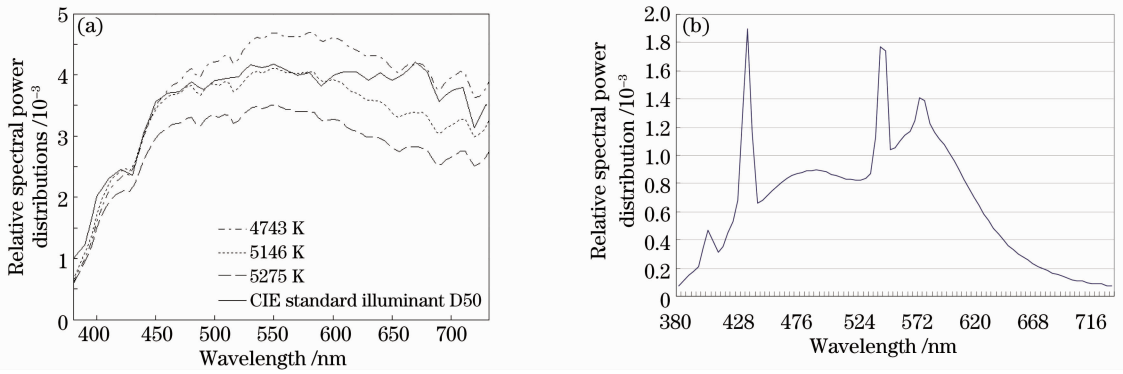


图 4 实测光源相对功率谱。(a)不同时刻自然光和标准光源 D50 相对功率谱;(b)实测日光灯相对功率谱  
Fig. 4 Measured relative PSD of light sources. (a) PSD of daylight lighting at different time and standard light source D50; (b) measured PSD of fluorescent lighting

表 1 日光灯与自然光照明的测量结果

Table 1 Measurement results of the fluorescent and daylight lighting

Parameter	Illuminance /lx	Color temperature /K	CIE (x,y)
Fluorescent lighting	272	5609	0. 3297, 0. 3640
Daylight lighting before expt.	962	4947	0. 3477, 0. 3647
Daylight lighting after expt.	874	5062	0. 3441, 0. 3598
CIE Illuminant D50	—	5000	0. 3457, 0. 3585

### 2.3 拍摄样本及测量光照均匀性

用图 3 所示放置样本方式同时拍摄训练和测试样本(ColorChecker SG 色卡),拍摄图像如图 5 所示,色卡位于整个图像中间,占大约 3/5 画面。研究标准灯箱照明环境下特性化照相机发现,由于照射在实验样本上的照度不均匀导致的误差达到 10 个 CMC(1:1)色差单位;另外照相机拍摄的均匀性也将影响特性化精度。为此,实验前对两种均匀性进行测试。方法是按照图 3 所示的测量方式,用 PR-715 对 ColorChecker SG 色卡左上、右上、左下、右下 4 个角上白色块照度进行测量,测量时分别先对准 4 个白色块,然后将 Photo Research 公司提供的参考白板放在每个白色块前进行测量,重复多次实验结果显示,样本 4 个角上照度变化小于 10 lx,说明照射在样本上照度的均匀性很好。同时,利用图 5 所示的照相机拍摄图像可以检验照相机拍摄的均匀性,方法是取出拍摄图像色卡 4 个角上白色块的 RGB 值,实验结果表明,4 个角上 RGB 值的差值不超过 5,是属于照相机的噪声范围。



图 5 相机拍摄的训练与检验样本  
Fig. 5 Picture of training and testing samples shot by camera

### 3 实验过程与实验结果

根据 Hong 等的研究结果,实验采用 11 项多项式回归的方法进行特性化<sup>[15]</sup>,方程为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,11} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \cdots & A_{2,11} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & \cdots & A_{3,11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ RG \\ RB \\ GB \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \\ RGB \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

当已知训练样本的 XYZ 值和照相机拍摄得到

的RGB值,采用最小二乘多项式回归方法即可求出特性化矩阵A的最优解。得到特性化矩阵后,使用检验样本检验其特性化精度,即计算XYZ模型预测与实际测量的色差。为了与Hong等特性化精度研究结果进行比较,实验采用CMC(1:1)计算色差。特性化精度实验安排4个实验:实验一在日光灯照明、采用仪器测量的条件下进行;实验二在自然光照明、采用仪器测量的条件下进行;实验三在自然光照明、不用仪器测量条件下进行;实验四在自然光照明、不用仪器在不同时间不同照度和色温的条件下进行。其中使用仪器测量是为了与不用仪器测量进行比较,而实验四是为了比较在自然光偏离标准

表2 日光灯与自然光照明环境下采用与不采用仪器测量特性化CMC(1:1)的色差分布

Table 2 Color difference CMC(1:1) distribution of characterization with and without instrument measurement under fluorescent and daylight lighting

Color difference		0.1~0.5	1.5~3.0	3.0~4.5	4.5~6.0	>6.0
Number of samples	Expt. one	10	26	15	10	14
	Expt. two	5	20	31	8	11
	Expt. three	8	22	27	10	8

表3 日光灯与自然光照明环境下采用与不采用仪器测量特性化CMC(1:1)色差

Table 3 Color difference CMC(1:1) of characterization with instrument measurement under fluorescent and daylight lighting

Color difference	Mean	Max.	Min.
Expt. one	3.86	11.72	0.47
Expt. two	3.48	9.98	0.16
Expt. three	3.75	12.78	0.59

为了研究在自然光下不使用仪器测量方法的实用性,需要研究自然光照明偏离标准光源D50情况下的特性化精度,实验四研究了自然光色温变化,以及照射在样本上的照度发生变化对特性化精度的影响,实验结果如表4所示。分别间隔大约1h共测量3次,为了增加色温变化扩展了实验时间为11:25~15:10,色温变化范围为4724~5250K,照度变化范围为1673~835lx,其3次测量自然光相对功率谱类似图2(a)。表4中的3种特性化CMC(1:1)色差是分别对3种照明条件下,分别特性化和分别检验的结果,即每一种照明条件下用相机拍摄训练样本得到RGB值,再使用训练样本标准光源D50下的CIExyY得到特性化矩阵,同时用仪器测量检验样本CIEXYZ检验特性化精度。从表4可以看出,色温偏离5000K(±300K)时,不使用仪器进行特性化,特性化精度比4976K(即时间在13:50的色温接近D50照明条件下)大0.5CMC(1:1)色

光源D50时,不使用仪器方法对特性化精度的影响。所谓使用仪器测量是指,训练样本和检验样本的CIEXYZ都用仪器测量得到;不使用仪器测量是指,训练样本使用ColorChecker Classic 24在标准照明D50光源下CIExyY而检验样本仍然采用仪器测量是为了使特性化精度的检验更加准确,这种方法只需要用户在自然光照明环境下拍摄ColorChecker Classic标准色卡获取色卡RGB即可。

实验一、二、三的结果如表2、3所示。可以看出,3种实验条件下特性化精度非常接近,平均CMC(1:1)色差在3.5~3.9范围之内;实验二、三使用和不使用仪器的特性化精度基本一样。

并且在实验环境接近D50时不使用仪器特性化精度与采用仪器测量的实验结果平均色差基本相同。

表4 色温和照度变化的自然光照明环境下不使用仪器的特性化CMC(1:1)色差

Table 4 Color difference CMC(1:1) distribution of characterization without instrument under the condition of varieties in color temperature and illumination of daylight lighting

Measurement time	12:25	13:50	15:10
Color temperature /K	4724	4976	5250
Illuminance /lx	1673	990	835
Mean of color difference	4.27	3.75	4.14

## 4 结 论

为了能让用户在普通办公室照明环境下实现照相机颜色特性化,研究了白天自然光照明和晚上日光灯2种照明办公环境下使用专业仪器的特性化精度,平均在3.5~3.9个CMC(1:1)色差单位。同时研究了白天自然光照明环境下,用户不使用仪器,只要拥有ColorChecker Classic 24色标准色卡,特性化精度可以达到3.75个CMC(1:1)色差单位,基本接近使用仪器特性化精度3.48个CMC(1:1)色差单位;并且在晴朗白天12:00~15:00自然光照度变化和色温变化条件下,不使用仪器测量的特性化精度变化在0.5CMC(1:1)色差单位。

在 12:00~15:00 时间范围,自然光相对功率谱非常接近 D50,色温变化在 $\pm 300$  K 范围,但是,一个非常严格的条件是白天天气要晴朗,当有一点云彩遮挡太阳时,色温变化较大,可以达到 6000 K。另外,虽然照度变化较大,但由于特性化方法对颜色亮度  $Y$  的归一化处理,不影响特性化精度。本实验特性化没有达到 Hong 等研究的 1.85 CMC(1:1)色差单位的最好精度,这与检验样本的数量和在色域中分布有关,从图 2 可以看出检验样本分布范围较大,而在 Hong 等研究中,检验样本没有具体给出在色域中分布,其他研究也没有详细描述检验样本情况。

## 参 考 文 献

- 1 Shi Junsheng, Yun Lijun, Yang Jian, *et al.*. Accuracy of colorimetric characterization and effect of black point for CRT monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 371-376.  
石俊生, 云利军, 杨 健, 等. CRT 显示器特性化精度及“黑点”的影响[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 371-376.
- 2 Jin Chongchao, Shen Huiliang, Shao Sijie, *et al.*. Color characterization method for colorful inkjet printers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1233001.  
金崇超, 沈会良, 邵思杰, 等. 一种彩色喷墨打印机的颜色特性化方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1233001.
- 3 Mou Tongsheng, Shen Huiliang. Colorimetric characterization of imaging device by total color difference minimization [J]. *J Zhejiang Univ SCIENCE A*, 2006, 7(6): 1041-1045.
- 4 ISO. Graphic Technology and Photography-Colour Characterisation of Digital Still Cameras (DSCs) - Part 1: Stimuli, Metrology, and Test Procedures [S]. ISO 17321-1: 2012, [2012-11-5].
- 5 ISO. Graphic Technology and Photography-Colour Characterization of Digital Still Cameras (DSCs)-Part 2: Methods for Determining Transforms From Raw DSC to Scene-Referred Image Data by Minimising Errors in Colour Spaces [S]. ISO/TR 17321-2: 2012, [2012-10-12].
- 6 IEC. Colour Measurement and Management-Multimedia Systems and Equipment-Part 9: Digital Cameras [S]. International Standard IEC 61966-9: 2003, [2003-11].
- 7 ISO. Colour Characterisation of Digital Still Cameras Using Colour Targets and Spectral Illumination [S]. ISO 17321 WD4: 1999, [1999-12].
- 8 P Green. Overview of Characterization Methods [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- 9 F M Verdú, J Pujol, P Capilla Pevea. Calculation of the color matching functions of digital cameras from their complete spectral sensitivities [J]. *J Imaging Sci Technol*, 2002, 46(1): 15-25.
- 10 M Ben Chouikha, B Placais, G Pouleau, *et al.*. Benefits and drawbacks of two methods for characterizing digital cameras [C]. CGIV 2006 Proceedings, Society for Imaging science and Technology, 2006. 185-188.
- 11 Lee Seok-Han, Choi Jong-Soo. Design and implementation of color correction system for images captured by digital camera [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, 54(2): 268-276.
- 12 Martin Rump, Arno Zinke, Reinhard Klein. Practical spectral characterization of trichromatic cameras [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 170.
- 13 P C Hung. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 53-61.
- 14 Tony Johnson. Methods for characterizing colour scanners and digital cameras [J]. *Displays*, 1996, 16(4): 183-191.
- 15 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.
- 16 H R Kang, P G Anderson. Neural network applications to the colour scanner and printer calibrations [J]. *J Electronic Imaging*, 1992, 1(2): 125-135.
- 17 Liu Yea, Yu Hongfeia, Shi Junshenga. Camera characterization using back-propagation artificial neural network based on munsell system [C]. SPIE, 2007, 6621: 66210A.
- 18 Danny Pascale. RGB coordinates of the macbeth color checker [R]. Montreal, Quebec, Canada, The BabelColor Company, 2006.
- 19 CIE CIE 15: Technical Report: Colorimetry, 3rd edition [R]. CIE 2004.

栏目编辑: 李文喆