

相机参数可变的齐次多项式色度特征化模型

方竞宇¹ 徐海松¹ 汪哲弘² 吴晓玫¹

¹浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

²杭州市质量技术监督检测院建材电器中心, 浙江 杭州 310019

摘要 基于相机的成像原理,建立了不同拍摄参数下响应值之间的转换方程,提出了一种基于齐次多项式回归的色度特征化模型,克服了传统多项式模型非线性外插造成的误差。对 Nikon D3x 数码相机进行了拍摄参数变化的色度特征化实验,分析了不同项数对特征化精度的影响。实验结果表明,齐次多项式模型适用于描述拍摄参数可变的相机色度特征化,且项数以 6、7 项为宜;在 4 种色温和 7 种照度构成的 28 种 LED 光源下的实验中,在色温不变、照度变化的光照下其颜色预测精度优于 1.5 CIELAB 色差单位,与固定参数、固定光照下多项式模型的精度相当,而在色温和照度同时变化的情况下其平均色差小于 2.0 CIELAB 单位,可以满足相机应用的色度精度的性能要求。

关键词 视觉光学; 色度学; 色度特征化; 齐次多项式; 数码相机

中图分类号 O432.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0833002

Homogeneous Polynomial Model for Colorimetric Characterization of Camera with Variable Settings

Fang Jingyu¹ Xu Haisong¹ Wang Zhehong² Wu Xiaomin¹

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

²Center for Building Materials and Appliances, Hangzhou Institute of Testing and Calibration for Quality and Technical Supervision, Hangzhou, Zhejiang 310019, China

Abstract Based on the imaging principle of cameras, a transformation equation among response value under different capture settings is established, and a colorimetric characterization model based on the homogeneous polynomial regression is proposed, which avoids errors caused by the nonlinear extrapolation in the traditional polynomial model. A Nikon D3x digital camera is employed to conduct the colorimetric characterization experiment under variable capture settings and the effect of different numbers of terms on characterization accuracy is analyzed. The experimental results show that the homogeneous polynomial model is applicable to describing the colorimetric characterization of cameras with variable capture settings, and it shows the best performance with 6 or 7 terms. In the experiment of 28 kinds of LED light resources with 4 kinds of color temperature and 7 illumination levels, but under fixed color temperature and variable illumination, the predicted color accuracy is superior to 1.5 CIELAB units and it is comparable to the accuracy from the polynomial model with fixed parameters and light sources. In contrast, under the simultaneous change of color temperature and illumination levels, the average chromatic aberration is less than 2.0 CIELAB units, which fulfills the colorimetric accuracy requirement in the practical application of cameras.

Key words visual optics; colorimetry; colorimetric characterization; homogeneous polynomials; digital camera

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.1710

收稿日期: 2016-03-29; 收到修改稿日期: 2016-04-18

基金项目: 国家 973 计划(2013CB328802)

作者简介: 方竞宇(1988—),男,博士研究生,主要从事颜色科学与高动态范围图像方面的研究。

E-mail: fangjy88@gmail.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、影像技术和照明工程等方面的研究。

E-mail: chsxu@zju.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

随着数字成像技术的发展,数码相机不仅用于拍摄自然风光,在科学研究领域也有广泛的应用^[1-2],其中数字图像设备的色度特征化是其颜色管理的基础步骤和关键环节^[3]。数码相机的色度特征化模型将设备相关的 RGB 颜色空间转换到设备无关的 CIE XYZ 颜色空间,使数码相机成为一种低成本的简便的成像式测色设备。国际标准化组织将数码相机的色度特征化方法分为两种^[4]:一种是光谱灵敏度法,一种是目标色法。光谱灵敏度法需要使用单色仪等专业设备,价格昂贵,操作复杂,要求严格;目标色法只需使用标准色卡和灯箱就可以达到有效的精度,便利直接,因而得到了广泛的研究和应用。已有的基于目标色的数码相机特征化方法都属于经验法,即通过数学方法建立 RGB 空间和 XYZ 空间的关系,包括查找表(LUT)法、多项式回归模型、神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)等方法^[5-13]。其中 LUT 法是一种通用的特征化方法,但是需要大量样本;多项式回归和 ANN 方法精度相当,但是后者需要优化设置大量模型参数,前者使用更加简单方便,因而得到了广泛应用。从机器学习的角度来看,这些方法都属于机器学习的范畴,SVM 法是一种近年来流行的将统计学习方法应用于颜色预测的方法。虽然已有的相机色度特征化模型达到了较高的精度,但是目前的特征化模型一般要求相机参数固定,即相机在测试或实际使用时所采用的拍摄参数[如感光度(ISO)、光圈数、快门时间]必须与训练时保持一致,这极大地限制了相机拍摄的自由度。如果实测的场景与训练的场景亮度差异很大,参数固定必然导致拍摄图像过曝或者欠曝,特征化精度便随之下降,因此需要重新设置一个与实测场景亮度相仿的光照环境,使得图像能够正常曝光,并在相应的参数设置下在训练场景中重新进行模型训练,这对数码相机特征化的实际应用造成了极大的不便。本文基于数码相机的成像模型,将拍摄参数引入特征化模型,采用齐次多项式回归方法解决了非线性函数外插误差较大的问题,并通过实验验证了这种色度特征化方法的有效性。

2 色度特征化方法

2.1 拍摄参数变化的数码相机像素响应值转换方程

场景的辐射能量依次经过数码相机的成像镜头、快门、彩色滤波阵列(CFA)、图像传感器、放大电路、模数转换器(ADC)和 RAW 图像处理等模块的调制而输出最终的图像^[14],如图 1 所示。其中,成像镜头、快门、放大电路的调制分别受到拍摄时采用的光圈数、曝光时间和 ISO 的控制。RAW 图像是线性模数转换后的直接输出,没有经过诸如白平衡、伽马矫正、图像美化等后处理,因而 RAW 图像的像素值和场景辐射强度保持线性关系。为了提高特征化精度,此处使用数码相机输出的 RAW 文件而非 JPEG 格式文件。假设图像像素间无串扰,图像上位于 (x, y) 处的像素值 $P_c(x, y)$ 与场景的对应位置 p 的光谱功率分布 $L_r(p, \lambda)$ 的关系为^[15]

$$P_c(x, y) = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{f_p}\right)^2 TS \cos^4 \alpha \int_{\Lambda} L_r(p, \lambda) T_o(\lambda) \cdot T_c(\lambda) S_r(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中 d 为镜头的孔径, f_p 为焦距, α 为视场角, T 为曝光时间, S 为感光度, Λ 为波长 λ 的积分区间, $T_o(\lambda)$ 和 $T_c(\lambda)$ 分别表示镜头和 CFA 的光谱透射率, $S_r(\lambda)$ 表示传感器响应的相对光谱灵敏度。

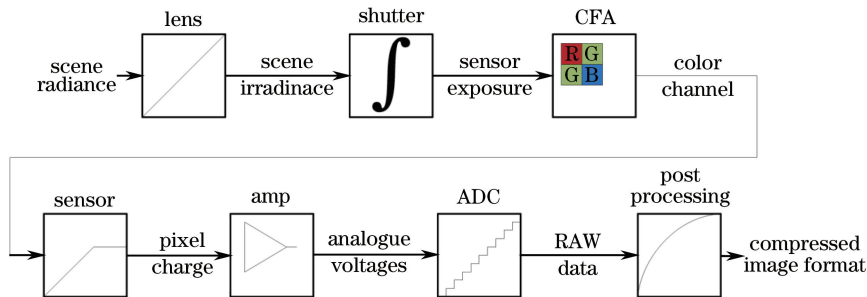


图 1 数码相机成像流程图

Fig. 1 Imaging workflow of digital cameras

(1)式中 $\cos^4 \alpha$ 项引起了轴外阴影现象,假设轴外阴影造成的成像非均匀性已经得到校正,对于同一场

景,由(1)式可以得到像素响应值和拍摄参数的关系为

$$\frac{P_{te}}{P_{ta}} = \frac{T_{te}S_{te}/N_{te}^2}{T_{ta}S_{ta}/N_{ta}^2}, \quad (2)$$

其中 P 表示像素值, N 表示光圈数, 下标 te 和 ta 分别表示测试过程和训练过程。

使用数码相机拍摄某一场景, 相机响应值为

$$\begin{cases} R(x, y) = k \frac{TS}{N^2} \int_A L_r(p, \lambda) T'_R(\lambda) d\lambda \\ G(x, y) = k \frac{TS}{N^2} \int_A L_r(p, \lambda) T'_G(\lambda) d\lambda \\ B(x, y) = k \frac{TS}{N^2} \int_A L_r(p, \lambda) T'_B(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 为图像中某一位置的红、绿、蓝通道响应值, k 表示比例常数, $T'_R(\lambda)$ 、 $T'_G(\lambda)$ 和 $T'_B(\lambda)$ 分别表示红绿蓝三通道的综合响应函数(包含了镜头和 CFA 透射率以及传感器的响应函数)。

场景的 CIE 三刺激值为

$$\begin{cases} X(p) = K \int_A L_r(p, \lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y(p) = K \int_A L_r(p, \lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z(p) = K \int_A L_r(p, \lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $X(p)$ 、 $Y(p)$ 、 $Z(p)$ 为对应场景中的 CIE 三刺激值, K 表示归一化系数, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 分别代表了 CIE 标准色度观察者的光谱三刺激值。由上述(3)、(4)式可以推理出: 在特定的光照变化条件下, 如照明体的亮度发生变化, 而其相对光谱功率分布保持不变时, 场景中的 CIE 三刺激值 X 、 Y 、 Z 会发生相应的变化; 若相机使用固定的拍摄参数, 则相机的响应值 R 、 G 、 B 会与场景的三刺激值 X 、 Y 、 Z 等比例地变化。为了验证这个推论, 分别在 12, 100, 800 lx 三种照度下采用数码相机拍摄同一张 X-Rite Classic 24 色标准色卡, 在坐标系中描绘相机 R 、 G 、 B 值与各色块三刺激值中 X 值的关系, 结果如图 2 所示, R 、 G 、 B 值与 Y 、 Z 值的关系与此相仿。可见 R 、 G 、 B 响应值与 X 、 Y 、 Z 三刺激值在整体上成线性关系, 但在局部表现出非线性特征。这种特殊的光照变化虽然和实际情况并不完全一致, 但作为实际情况的一种近似, 其得出的结论仍可用于特征化模型的推导。

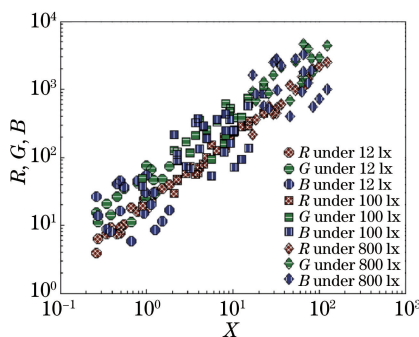


图 2 在 12, 100, 800 lx 三种不同照度下, 相机响应值 R 、 G 、 B 值与 X 刺激值的关系

Fig. 2 Relationship between R , G , B response values and X value at three different illumination levels of 12, 100, and 800 lx

2.2 基于齐次多项式回归的颜色预测模型

Hong 等^[6]提出了多项式回归模型用于数码相机的色度特征化。假设 n 个训练样本的相机响应值为 \mathbf{R} , \mathbf{R} 由相机 R 、 G 、 B 值的向量 ρ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 构成, 其对应的三刺激值为 \mathbf{H} , 则响应值与三刺激值之间的映射关系可以表示为

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}\mathbf{M}, \quad (5)$$

其中变换矩阵 \mathbf{M} 可以通过最小二乘法确定, 即

$$\mathbf{M} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{H}. \quad (6)$$

响应值向量 $\boldsymbol{\rho}_i$ 具有可扩展性, 可通过增加更多更高次的项数, 使得一阶线性的映射转换成高阶非线性映射, 从而提高(5)式的预测精度。此处 6 种多项式模型进行对比实验和讨论, 其最高次数不超过三阶。假设第 i 个样本的 RGB 三通道响应值分别为 R_i, G_i, B_i , 有

$$\begin{aligned} \rho_{3i} &= [R_i, G_i, B_i]_{1 \times 3}, \\ \rho_{5i} &= [1, R_i G_i B_i, \rho_{3i}]_{1 \times 5}, \\ \rho_{9i} &= [\rho_{3i}, R_i G_i, R_i B_i, G_i B_i, R_i^2, G_i^2, B_i^2]_{1 \times 9}, \\ \rho_{11i} &= [1, R_i G_i B_i, \rho_{9i}]_{1 \times 11}, \\ \rho_{18i} &= [\rho_{9i}, R_i G_i^2, R_i B_i^2, G_i R_i^2, G_i B_i^2, B_i R_i^2, B_i G_i^2, R_i^3, G_i^3, B_i^3]_{1 \times 18}, \\ \rho_{20i} &= [1, R_i G_i B_i, \rho_{18i}]_{1 \times 20}. \end{aligned} \quad (7)$$

考虑到相机在实测时会采用不同的拍摄参数, 提出可变参数的相机色度特征化模型, 其流程如图 3 所示。经过与传统的多项式特征化模型一致的训练阶段, 得到转换矩阵 \mathbf{M} , 但是需要记录 ISO、光圈数和快门时间等相机拍摄参数。在测试阶段, 拍摄的测试样本可能使用了不同的捕获参数, 需要根据(2)式将相机响应值转换到训练阶段拍摄参数的 R, G, B 值, 称之为等效 R, G, B 值。最后基于回归模型将等效 R, G, B 值通过转换矩阵 \mathbf{M} 映射到测试样本的 X, Y, Z 值, 从而完成特征化过程。考虑相机参数的多项式模型存在一个问题: 在训练样本的 R, G, B 值的取值范围内, 通过引入高次项来预测 R, G, B 值与 X, Y, Z 值之间的局部非线性关系, 从而提高预测精度, 但是当测试光照条件发生变化时, 其 R, G, B 值可能会落在训练样本取值范围之外, 这时采用多项式外插法得到的 X, Y, Z 值不符合 R, G, B 与 X, Y, Z 之间的整体线性变化规律。为了解决这个整体线性和局部非线性的矛盾, 提出了一种基于齐次多项式的方法, 将响应值向量拓展为齐次多项式 $\bar{\rho}_i$, 分别针对 3 项、4 项、6 项、7 项、12 项、13 项的齐次多项式进行实验测试:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{3i} &= [R_i, G_i, B_i]_{1 \times 3}, \\ \bar{\rho}_{4i} &= [\sqrt[3]{R_i G_i B_i}, \bar{\rho}_{3i}]_{1 \times 4}, \\ \bar{\rho}_{6i} &= [\bar{\rho}_{3i}, \sqrt{R_i G_i}, \sqrt{R_i B_i}, \sqrt{G_i B_i}]_{1 \times 6}, \\ \bar{\rho}_{7i} &= [\sqrt[3]{R_i G_i B_i}, \bar{\rho}_{6i}]_{1 \times 7}, \\ \bar{\rho}_{12i} &= [\bar{\rho}_{6i}, \sqrt[3]{R_i G_i^2}, \sqrt[3]{R_i B_i^2}, \sqrt[3]{G_i R_i^2}, \sqrt[3]{G_i B_i^2}, \sqrt[3]{B_i R_i^2}, \sqrt[3]{B_i G_i^2}]_{1 \times 12}, \\ \bar{\rho}_{13i} &= [\sqrt[3]{R_i G_i B_i}, \bar{\rho}_{12i}]_{1 \times 13}. \end{aligned} \quad (8)$$

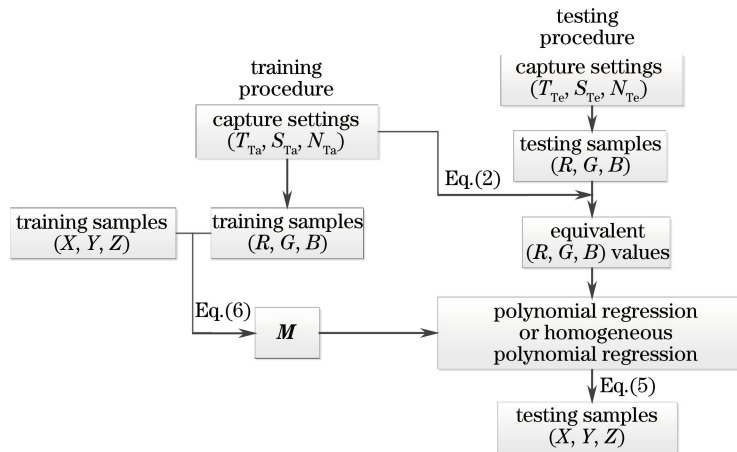


图 3 参数可变的相机色度特征化模型流程图

Fig. 3 Colorimetric characterization workflow of digital cameras with variable settings

3 实 验

3.1 实验设备和设置

为了提供可以控制的光照环境,实验中分别采用了标准灯箱(SpectraLight III, GretagMacbeth,美国)和可调谐 LED 灯箱(colorControl, JUST Normlicht,德国),其中 SpectraLight III 提供稳定的 D65 光源,可调谐的 LED 灯箱提供 4 种相关色温(CCT)(5000,5500,6500,7500 K)下 7 种照度(12,25,50,100,200,400,800 lx)的共 28 种照明环境。实验颜色样本来自于 GretagMacbeth Color Checker DC 237 色标准色卡(以下简称 DC 色卡)和 X-Rite Color Checker Digital SG 140 色标准色卡(以下简称 SG 色卡)。因为梯度更丰富的中性色块在色卡的中部已经存在,DC 色卡和 SG 色卡最外围边缘的黑白灰相间的中性色块在训练和检验过程中不予考虑。图像拍摄采用 Nikon D3x 数码相机,配以 Nikon 变焦镜头(AF-S 24-120 f/4 ED VR,日本 Nikon,泰国),拍摄的距离固定为 70 cm,且照明与测量几何条件均可视为 $45^\circ \times 0^\circ$ (国际照明委员会推荐的 45° 定向入射, 0° 测量的标准照明几何条件)。在色卡位置处放置一张 A4 纸大小的反射率均匀性方差小于 0.1 的亚光相纸,通过拍摄亚光相纸来校正成像的空间非均匀性^[8]。

3.2 实验过程

根据所使用灯箱的不同,整个实验过程分为两个部分。第一部分实验采用 SpectraLight III 灯箱中的 D65 光源,依次拍摄 DC 和 SG 色卡,相机的曝光时间以减半的方式,从 1/2 s 减小至 1/1000 s,其余参数固定,即 ISO100、光圈数 5.6、焦距 30 mm。其中,曝光时间为 1/15 s 时曝光正常,曝光时间大于 1/15 s 时图像随曝光时间的翻倍而出现曝光逐渐过度的现象,曝光时间小于 1/15 s 时图像随曝光时间的减半而出现曝光逐渐不足的现象。此处的训练步骤选择 1/15 s 的曝光时间,测试步骤包含所有的曝光时间参数。同时,以 DC 和 SG 色卡中偶数序列的色块作为训练样本,以奇数序列的色块作为测试样本。第二部分实验在 LED 灯箱提供的 28 种光照条件下依次拍摄 DC 色卡,在不同的光照条件下分别调整曝光时间以确保捕获图像的正常曝光,除了曝光时间外其余拍摄参数均与第一部分实验设置一致。此处选择 6500 K 色温下 100 lx 照度的光环境为训练条件,所有 28 种光照条件均参与测试,色卡训练样本和测试样本的选择方式均与第一部分实验相同。

3.3 实验结果与讨论

在实验数据处理的过程中,需要对 RAW 图像作暗电流扣除的预处理。第一部分的实验结果以 CIELAB 色差(ΔE_{ab}^*)表示,见表 1 和表 2,可见两种特征化方法达到最佳精度的曝光时间都为 1/15 s。这是因为测试和训练的拍摄参数一致,没有曝光时间的标称误差;而且,由于 1/15 s 是正常曝光时间,过曝和欠曝都会导致预测误差的增大。通过对比表 1 和表 2 不难发现,随着多项式项数的增加,在拍摄参数与训练参数一致的情况下多项式回归模型的精度得到提高,而在拍摄参数变化时其精度随项数增加反而呈现降低趋势,说明多项式模型对于参数可变的相机特征化描述是失效的。尤其是在过曝情况下,如在曝光时间 1/2 s 时出现了大于 2000 CIELAB 单位的色差,如此大的误差在物理上难以解释,但从数学上看其原因是:随着项数的增加,多项式的次数也增大,这使得输入值与预测值的关系偏离了 X, Y, Z 与 R, G, B 之间的整体线性趋势,高次非线性外插造成了预测值远大于实际的三刺激值,而选取的参考白不变,从而构成了一种高于漫反射参考白的异常“高光”,因此超过了正常 CIELAB 色差单位的合理范围。另一方面,齐次多项式回归模型对于参数变化情况下的相机特征化是适用的,随着项数的增加,特征化精度先提高后降低。过多项数可能造成了过拟合现象,从表 2 中可以得出齐次多项式最适宜的项数为 6、7 项。对比两种色卡的结果可知,DC 色卡的色块数量多,泛化能力更好,更适合用作训练样本,这与 Chou 等^[16]的结论一致。

表 1 SpectraLight III D65 光照环境中基于多项式回归模型的参数
可变相机色度特征化模型性能(以 CIELAB 色差 ΔE_{ab}^* 表示)

Table 1 Colorimetric characterization performance, in terms of CIELAB color difference of cameras with variable settings based on the polynomial regression model under the D65 lighting condition (SpectraLight III)

Size of matrix \mathbf{M}	Color checker	Exposure Time /s									
		1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1000
1×3	DC	5.7	2.3	2.4	1.8	2.0	2.2	2.9	2.7	3.1	4.5
	SG	7.6	3.7	3.9	3.1	3.2	3.3	3.8	3.7	3.6	4.8
1×5	DC	7.9	4.3	2.7	1.8	1.9	2.3	3.9	5.2	11.1	18.3
	SG	11.6	6.2	3.7	2.2	3.7	8.5	16.9	28.2	43.8	64.5
1×9	DC	27.7	8.1	3.1	1.5	1.7	2.0	2.6	2.4	3.1	3.9
	SG	49.9	15.5	5.5	2.3	3.1	3.6	4.2	4.2	4.5	5.0
1×11	DC	38.2	10.5	3.3	1.4	1.8	2.7	5.0	7.7	13.6	21.7
	SG	27.3	11.1	4.6	1.6	4.0	9.4	18.4	30.4	47.0	69.1
1×18	DC	254	23.6	4.5	1.4	1.8	2.5	3.5	3.3	4.3	5.1
	SG	496	80.3	12.5	1.7	3.5	5.0	6.3	6.6	7.3	7.3
1×20	DC	263	23.2	4.4	1.3	2.0	3.6	7.2	11.7	20.6	33.4
	SG	2216	190	16.6	1.4	4.5	10.0	19.3	31.7	48.8	71.6

表 2 SpectraLight III D65 光照环境中基于齐次多项式回归模型的参数可变
相机色度特征化模型性能(以 CIELAB 色差 ΔE_{ab}^* 表示)

Table 2 Colorimetric characterization performance, in terms of CIELAB color difference of cameras with variable settings based on the homogeneous polynomial regression model under the D65 lighting condition (SpectraLight III)

Transform matrix \mathbf{M}	Color checker	Exposure Time /s									
		1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1000
1×3	DC	5.7	2.3	2.4	1.8	2.0	2.2	2.9	2.7	3.1	4.5
	SG	7.6	3.7	3.9	3.1	3.2	3.3	3.8	3.7	3.6	4.8
1×4	DC	5.6	2.3	2.4	1.9	2.0	2.2	3.0	2.7	3.2	4.6
	SG	7.6	3.7	3.9	3.1	3.1	3.2	3.7	3.7	3.5	4.6
1×6	DC	5.5	2.1	2.2	1.5	1.7	1.9	2.8	2.5	3.0	4.6
	SG	6.9	2.9	3.2	2.2	2.3	2.6	3.1	3.0	2.9	4.3
1×7	DC	5.4	2.1	2.2	1.5	1.6	1.9	2.8	2.4	3.0	4.6
	SG	6.9	3.0	3.2	2.3	2.5	2.7	3.3	3.0	3.1	4.5
1×12	DC	5.4	2.1	2.2	1.5	1.6	1.8	2.8	2.4	3.0	4.6
	SG	7.9	4.0	4.3	3.3	3.5	3.8	4.6	4.8	4.4	6.0
1×13	DC	5.4	2.1	2.2	1.5	1.6	1.9	2.8	2.4	3.0	4.6
	SG	7.7	3.8	4.1	3.2	3.3	3.6	4.4	4.6	4.2	5.8

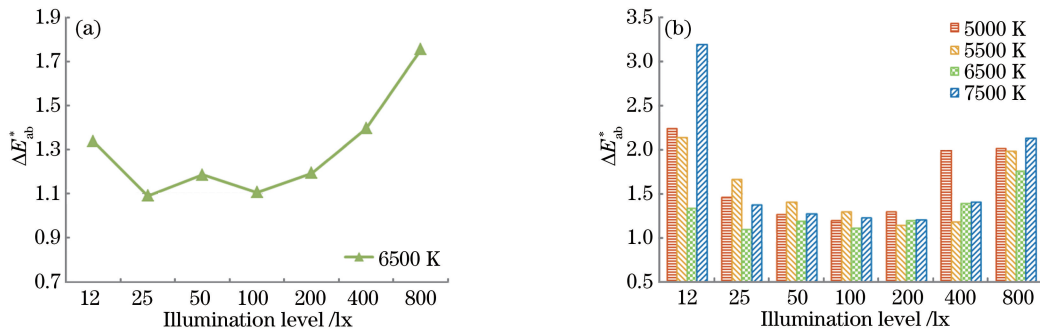


图 4 不同照明环境中的预测精度(以 CIELAB 色差表示)。(a)色温恒定而照度变化;(b)色温和照度均发生变化

Fig. 4 Predicted accuracy (in terms of CIELAB chromatic) under different lighting conditions. (a) Different illumination levels with a fixed color temperature; (b) simultaneous change of color temperature and illumination levels

第二部分实验设置了 28 种不同的光照组合,但根据第一部分实验的结论,仅对 DC 色卡进行拍摄,通过调整曝光时间以确保在不同色温和照度的光照下尽可能正确地曝光,训练光照条件选择为 6500 K 色温和 100 lx 照度,同时选择 7 项的齐次多项式作为回归模型。首先考察在色温不变的情况下特征化模型随光照亮度等级的变化性能,如图 4(a)所示。由图可见,除了 800 lx 外,其余照度条件下的色差均在 1.5 CIELAB 单位以下,这与固定参数下的多项式特征化模型基本保持在相同的精度水平。若采用所有色块同时作为训练和测试样本,则该模型的拟合精度可达 1 CIELAB 单位。此外,导致 800 lx 条件下色差偏大的原因之一是 LED 灯箱的频闪频率与相机的曝光时间吻合,这导致了捕获的图像不稳定。为了进一步考察所提出色度特征化模型对不同色温的适应性,对包含 4 种色温和 7 种照度的不同组合光照条件下的模型预测色差精度进行了分析,结果如图 4(b)所示。可以看到,除了过明或者过暗的情况外,其总体平均精度小于 2.0 CIELAB 单位,表明该方法具有令人满意的跨色温照明光谱适应性。

4 结 论

提出了一种基于齐次多项式并允许拍摄参数变化的数码相机色度特征化模型:先将不同参数下的相机响应值转换至训练条件下的等效响应值,然后通过齐次多项式回归预测三刺激值。相对于传统的多项式模型,齐次多项式回归兼顾了 RGB 值与 XYZ 值全局的线性和局部的非线性关系,避免了传统高次多项式外插产生的误差。以 Nikon D3x 数码相机为例,验证了该模型在参数变化时的有效性。在稳定的 D65 光源照明条件下,模型的精度呈现出随项数增加先提高后降低的规律;28 种组合 LED 光照条件下的测试表明,所提出的齐次多项式模型在光照变化及参数变化的复杂情况下,仍能保持与传统模型在光照固定和参数固定下相当的精度水准,同时还表现出了良好的跨色温光谱适应性,可以满足数码相机实用中的颜色预测精度要求。

参 考 文 献

- Guo Tong, Li Feng, Ni Lianfeng, *et al.* Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212003.
郭 彤, 李 峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212003.
- Qin Feng, Yang Weiping, Yang Jia, *et al.* Research on image reconstruction of traditional Chinese painting art based on radiance information matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1033001.
秦 锋, 杨卫平, 杨 葭, 等. 基于亮度信息匹配的国画艺术品图像重建研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1033001.
- Gong Rui, Xu Haisong, Zhang Xiandou, *et al.* Sub-space compensation model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0433001.
宫 睿, 徐海松, 张显斗, 等. 液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0433001.
- International Organization for Standardization. Graphic technology and photography-colour characterisation of digital still cameras (DSCs)-part 1: Stimuli, metrology and test procedures. ISO17321-1[S]. 2012.
- Hung P C. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 53-61.
- Hong G W, Luo M R, Rhodes P A. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. *Color Research and Application*, 2001, 26(1): 76-84.
- Schettini R, Barolo B, Boldrin E. Colorimetric calibration of color scanners by back-propagation[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1995, 16(10): 1051-1056.
- Cheung V, Westland S, Connah D, *et al.* A comparative study of the characterisation of colour cameras by means of neural networks and polynomial transforms[J]. *Coloration Technology*, 2004, 120(1): 19-25.
- Yang B, Chou H Y, Yang T H. Color reproduction method by support vector regression for color computer vision[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(22): 5649-5656.
- Ma Yanman, Liu Haoxue, Liu Xin. A research on the color characterization of digital camera[J]. *Journal of Beijing Institute of Graphic Communication*, 2006, 14(6): 9-12.
马燕满, 刘浩学, 刘 昕. 数码相机的颜色特征化研究[J]. *北京印刷学院学报*, 2006. 14(6): 9-12.
- Jiang Feifei, Xu Lanping, Zheng Liyang. Color characterization for digital camera based on BP neural network [J].

- Packaging Engineering, 2012, 33(5): 107-118.
- 蒋飞飞, 徐兰萍, 郑立扬. 基于 BP 神经网络的数码相机颜色特征化[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 107-118.
- 12 Zhang Jianguo, Jia Guoxin, Qu Xinghua. Colorimetric characterization of CCD digital camera based on artificial neural networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(2): 26-28.
- 张建功, 贾果欣, 曲兴华. 基于人工神经网络的 CCD 数码相机颜色特征化[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(2): 26-28.
- 13 Wang Yong, Chen Mei. Spectral reconstruction algorithm of digital camera based on BP neural network and principal component analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 123301.
- 王 勇, 陈 梅. 基于 BP 神经网络和主元分析法的数码相机光谱重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 123301.
- 14 Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]. Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997: 369-378.
- 15 Ortiz A, Oliver G. Radiometric calibration of CCD sensors: Dark current and fixed pattern noise estimation[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, 5: 4730-4735.
- 16 Chou Y F, Luo M R, Li C J, *et al.* Methods for designing characterisation targets for digital cameras[J]. Coloration Technology, 2013, 129(3): 203-213.