

激光与光电子学进展

基于非 RAW 数据的数码反射显微镜色度特征化

徐鹏^{1,2,3*}, 张克奇¹, 章海军², 毛磊¹, 邱元芳¹, 曾志¹

¹宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315040;

²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

³浙江农林大学暨阳学院, 浙江 诸暨 311800

摘要 为了防止彩色数码反射显微镜的白平衡算法失效, 提高图像颜色采集精度, 提出了基于非 RAW 数据的数码相机色度特征化方法。首先, 利用色卡中性色块建立基于幂函数的非线性校正模型, 将非 RAW 数据转换为与场景辐亮度线性相关的数据。然后, 建立色度特征化模型。最后, 通过实验测试非 RAW 数据校正前后的色度特征化精度, 并分析光源亮度变化对非线性校正模型及色度特征化精度的影响。结果表明, 校正后的非 RAW 数据将提高色度特征化精度, 对于线性色度特征化模型效果尤为明显。同时, 光源亮度改变将引起非线性校正模型以及色度特征化精度的变化, 当亮度变化不剧烈时, 可采用通用非线性校正模型。

关键词 视觉; 颜色测量; 色度特征化; 数码相机; 显微镜; RAW 数据

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0133001

Colorimetric Characterization of Digital Reflection Microscope Based on Non-RAW Data

Xu Peng^{1,2,3*}, Zhang Keqi¹, Zhang Haijun², Mao Lei¹, Qiu Yuanfang¹, Zeng Zhi¹

¹Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315040, China;

²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

³Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji, Zhejiang 311800, China

Abstract In order to prevent the failure of the white balance algorithm of color digital reflection microscope and improve the accuracy of color acquisition, a colorimetric characterization method based on non-RAW data is proposed. First, a nonlinearity correction model based on power function is established by using the neutral patches of the color card. The non-RAW data is converted into the data linearly related to the scene radiance. Then, the colorimetric characterization model is established. Finally, experiments are conducted to test the accuracy of colorimetric characterization model before and after correction of non-RAW data, and the influence of luminance change of light source on nonlinearity correction model and the accuracy of colorimetric characterization is analyzed. The results show that the corrected non-RAW data will improve the accuracy of colorimetric characterization, and the improvement effect is especially obvious for the linear colorimetric characterization model. At the same time, the luminance change of the light source will cause the variation of the nonlinear correction model as well as the accuracy of colorimetric characterization, but when the luminance change is not sharp, the general nonlinear correction model can be used.

Key words vision; color measurement; colorimetric characterization; digital camera; microscope; RAW data

OCIS codes 330.1710; 330.1690; 330.1730

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-05-17; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 浙江省博士后科研资助项目(2019121128)、绍兴市科技计划项目(2018C20013)、浙江农林大学暨阳学院科研发展基金项目(JY2018RC02)

*E-mail: xsjzxp@163.com

1 引言

彩色数码显微成像系统采用彩色数码摄像头采集图像,相较于专业数码相机,彩色数码摄像头成像质量通常较差,并利用白平衡算法校正图像颜色^[1],例如,灰度世界法或最大 RGB 值法,但数码显微成像系统的成像视场非常小,拍摄对象(样品)颜色单一或稀少,当场景不符合估计假设时,白平衡算法将失效。为了实现颜色的精确控制,需要借助数码相机色度特征化的理论和技术^[2-4],建立相机 RGB 通道响应值与 XYZ 三刺激值之间的映射关系。现有的色度特征化实验通常采用与场景辐亮度线性相关的 RAW 数据^[5],可以获得较高的色度特征化精度。然而数码显微成像系统的彩色数码摄像头通常并不提供 RAW 数据,而生成经图像信号处理算法(ISP)处理的图像^[6],如 JPEG 图像等,图像中的 RGB 值经过去马赛克、白平衡、阶调调整、图像压缩等处理,并不适用于精确地定量分析与后续处理^[7]。利用数学方法可以从非 RAW 数据中恢复与场景辐亮度线性相关的数据^[8],因此研究人员提出了各种非线性校正模型,如幂函数模型^[9]、多项式模型^[10]、主成分分析(PCA)模型^[11]和非参数模型^[12]。本文针对彩色数码反射显微镜,提出基于非 RAW 数据的色度特征化方法,首先基于中性色块的反射比及其 RGB 值建立非线性校正模型,并对非 RAW 数据进行校正,然后利用校正后的数据进行数码显微镜的色度特征化。通过实验,对比分析非 RAW 数据校正前后的色度特征化精度,同时,分析光源亮度变化对非线性校正模型以及色度特征化精度的影响,旨在解决彩色数码反射显微镜的颜色失真问题,以及研究典型色度特征化算法对彩色数码反射显微镜的适用性。

2 理论与方法

2.1 非 RAW 数据校正

非 RAW 数据校正通过建立物体的非 RAW 相机响应值与物体表面辐亮度之间的关系,将非 RAW 相机响应值校正为与辐亮度线性相关的数据。本文利用色卡中若干中性色块建立非线性校正模型,原理表示为

$$e_i = \int E(\lambda)r(\lambda)_i d\lambda = c_i \int E(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

式中: $E(\lambda)$ 为光源的光谱辐亮度; $r(\lambda)_i$ 为第 i 个中性色块的光谱反射比; e_i 表示第 i 个中性色块表面反射

的辐亮度。由于中性色块光谱反射比的值在各个波段基本一致,因此可用常数 c_i 代替 $r(\lambda)_i$, c_i 表示第 i 个中性色块的反射比。

$$q_i = \frac{e_i}{e_{\max}} = \frac{\int E(\lambda)r(\lambda)_i d\lambda}{\int E(\lambda)r(\lambda)_{\max} d\lambda} = \frac{c_i \int E(\lambda)d\lambda}{c_{\max} \int E(\lambda)d\lambda} = \frac{c_i}{c_{\max}}, \quad (2)$$

式中: $r(\lambda)_{\max}$ 为中性色块中光谱反射比最大值,也可看作最白色块的光谱反射比; c_{\max} 表示最白色块的反射比; e_{\max} 表示最白色块的辐亮度; q_i 表示第 i 个中性色块的归一化辐亮度,可见,其等于第 i 个中性色块与最白色块的反射比的比值。

$$\begin{cases} p_{iR} = \frac{R_i}{R_{\max}} \\ p_{iG} = \frac{G_i}{G_{\max}} \\ p_{iB} = \frac{B_i}{B_{\max}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: R_i, G_i, B_i 分别表示第 i 个中性色块的 RGB 相机响应值; $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$ 分别表示最白色块的 RGB 相机响应值; p_{iR}, p_{iG}, p_{iB} 分别表示第 i 个中性色块的 RGB 归一化响应值。通过归一化响应值与归一化辐亮度建立非线性校正模型,本文采用 Mann 等^[9]提出的幂函数模型,并做了简单改进,即

$$q_i = (a_K p_{iK} + b_K)^{c_K}, \quad (4)$$

式中: p_{iK} 表示第 i 个色块的 K 通道响应值, $K \in \{R, G, B\}$; a_K, b_K, c_K 为模型参数,对 RGB 三个通道分别建立非线性校正模型。

2.2 数码相机色度特征化

数码相机色度特征化(正向)的原理是建立相机 RGB 值与三刺激值 XYZ 之间的映射关系。假设 n 个训练样本的相机响应值为 P , 包含由样本 RGB 值形成的向量 $\rho_j = [R_j, G_j, B_j]$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 其对应的三刺激值为 M , 则三刺激值与响应值之间的映射关系可以表示为

$$M = CP, \quad (5)$$

式中:转换矩阵 C 可通过最小二乘法确定。

$$C = (P^T P)^{-1} P^T M, \quad (6)$$

式中:上标 T 和 -1 分别表示矩阵的转置和逆。(6) 式即线性色度特征化模型。Hong 等^[2]提出了多项式色度特征化模型,通过引入由 RGB 值交叉构成的多项式项,更加准确地拟合了相机响应值与三刺激

值之间的非线性映射关系,因而得到了广泛应用。其发现 11 项多项式具有较好的估计精度,向量 ρ_j 可扩展为 11 项多项式,即

$$\rho_j^{11} = [1, R_j, G_j, B_j, R_j G_j, R_j B_j, G_j B_j, R_j^2, G_j^2, B_j^2, R_j G_j B_j] \quad (7)$$

此时,采用 n 个样本的 11 项多项式重新构成响应值矩阵 P ,利用(6)式可以再次计算转换矩阵 C ,则得到多项式色度特征化模型。

2.3 颜色校正流程

基于非 RAW 数据的颜色校正流程如图 1 所示。

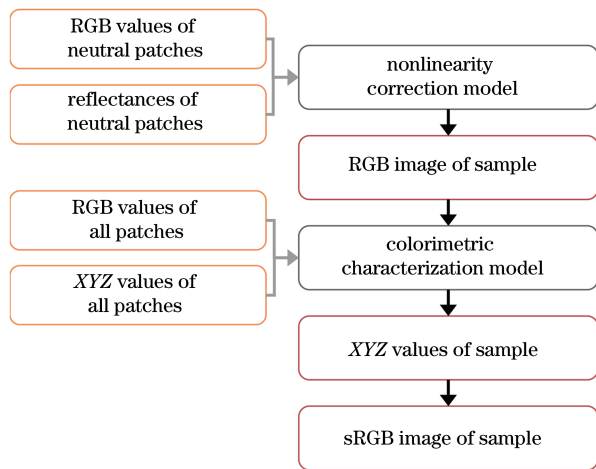


图 1 基于非 RAW 数据的颜色校正流程

Fig. 1 Flowchart of color correction based on non-RAW data

首先利用数码显微镜拍摄色卡,利用色卡中性色块的 RGB 值和反射比建立非 RAW 数据的非线性校正模型,然后利用色卡所有色块的 RGB 值和 XYZ 值建立色度特征化模型。拍摄样品并获得样品的 RGB 图像,利用非线性校正模型校正样品的 RGB 值,代入色度特征化模型,获得样品的 XYZ 值,并转换成样品的 sRGB 图像,如果需要在某台显示器上显

示,则可以预先对显示器进行色度特征化,利用显示器色度特征化模型获得样品的显示设备相关 RGB 值。

3 实验与分析

3.1 非线性校正模型建立

实验采用一台彩色数码反射式显微镜,采集爱色丽 ColorChecker Classic 色卡(后文简称 Classic 色卡)的彩色图像,图片格式为 JPEG。利用 X-Rite 公司的分光光度计 SP64 测量 Classic 色卡在 D65 照明体下的 XYZ 三刺激值。利用色卡中 6 个中性色块,建立 RGB 三通道非 RAW 数据的非线性校正模型,如图 2 所示,在每个子图中,实心圆点表示数据点,实线表示拟合的幂函数非线性校正曲线,可见幂函数模型较好地拟合了实验数据。

RGB 三通道具体的非线性校正模型表示为

$$\begin{cases} q_i = (0.54p_{iR} + 0.46)^{5.37} \\ q_i = (0.94p_{iG} + 0.05)^{2.22} \\ q_i = (0.99p_{iB} + 0.01)^{1.26} \end{cases} \quad (8)$$

可见, R, G, B 三个通道的非线性校正模型并不相同, R 通道的模型参数与另外两个通道相差较大,表明该彩色数码反射显微镜的白平衡算法失效,并没有获得正确的 XYZ 值。

3.2 色度特征化实验

利用 Classic 色卡的 24 个色块分别建立线性色度特征化模型和 11 项多项式色度特征化模型,同时,利用(8)式对 24 个色块的相机响应值进行非线性校正,再次建立两种色度特征化模型。响应值非线性校正前后的转换矩阵 C 表示为

$$C_L = \begin{bmatrix} 0.0968 & 0.0060 & -0.0755 \\ 0.1311 & 0.2811 & 0.1598 \\ 0.0186 & -0.0380 & 0.7393 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

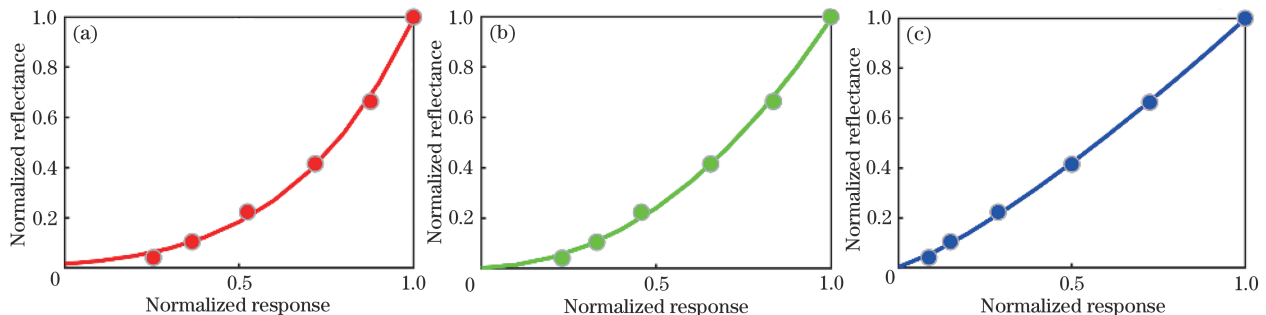


图 2 RGB 通道非线性校正曲线。(a) R 通道; (b) G 通道; (c) B 通道

Fig. 2 Nonlinearity correction curves of RGB channels. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

$$C_P = \begin{bmatrix} -5.6018 & -9.8190 & -14.6119 \\ 0.0752 & 0.1121 & 0.1723 \\ 0.0275 & 0.0820 & 0.1143 \\ 0.1095 & 0.0451 & 0.6309 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.0013 & 0 & -0.0011 \\ -0.0032 & -0.0037 & -0.0025 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0013 & 0 \\ 0.0051 & 0.0049 & 0.0048 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$C_{NL} = \begin{bmatrix} 0.3997 & 0.1929 & -0.0989 \\ 0.3474 & 0.6730 & 0.3293 \\ 0.0680 & 0.0119 & 0.6432 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$C_{NP} = \begin{bmatrix} -0.0224 & -0.0239 & -0.0130 \\ 0.6774 & 0.4249 & 0.1808 \\ 0.3641 & 0.7860 & 0.3644 \\ -0.0015 & -0.0839 & 0.5309 \\ 0.1434 & -0.0475 & 0.5263 \\ -0.1796 & -0.1060 & -0.0923 \\ -0.3525 & -0.4591 & 0.0437 \\ -0.3865 & -0.2975 & -0.5061 \\ -0.0888 & -0.0625 & -0.5118 \\ 0.2671 & 0.3100 & 0.1206 \\ 0.4175 & 0.4465 & 0.2765 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中： C_L 和 C_P 分别为相机响应值非线性校正前的线性和多项式色度特征化转换矩阵； C_{NL} 和 C_{NP} 分别为相机响应值非线性校正后的线性和多项式色度特征化转换矩阵。可见，相机响应值经非线性校正后，线性和多项式色度特征化转换矩阵都发生了变化

表 1 给出了色块相机响应值非线性校正前后的色度特征化模型精度，以 24 个色块的色差 (CIE DE2000 色差) 的平均值、最大值和标准偏差 (std.) 表示。可见，对于线性模型，非线性校正后精度有了较大提高，表明所建立的非线性校正模型较好地拟合了非 RAW 数据与场景辐亮度的非线性关系。而对于多项式模型，非线性校正后精度有所提高，但提高幅度不大，且校正前的多项式模型精度优于线性模型，说明多项式模型较好地拟合了相机响应值与 XYZ 三刺激值之间的非线性映射关系。但对于图像而言，多项式模型需要计算每一个像素 RGB 值的多项式项，然后再求解 XYZ 值，当图像空间分辨率较高，达到百万甚至千万像素时，将影响多项式模型的实时计算效率，而线性模型的计算速度非常快，能够满足实时处理的要求，因而被大部分消费级彩色数码相机所采用。

表 1 非线性校正前后的色度特征化精度

Table 1 Accuracy of colorimetric characterization before and after nonlinearity correction

ΔE_{00}	Linear model		Polynomial model	
	Before	After	Before	After
Mean	9.96	4.27	2.80	2.58
Max	23.08	8.48	9.25	7.74
Std.	5.77	1.76	2.01	1.97

图 3 为 Classic 色卡和样品在不同校正方法下的颜色效果。图 3(a) 为 Classic 色卡的真实颜色；图 3(b) 为样品的表现颜色；图 3(c) 和 (h) 分别为显微镜采集的色卡和样品的 JPEG 图像颜色；图 3(d)~(g) 分别为色卡在不同校正方法下的颜色效果，校正方法依次为未校正数据非线性+线性色度特征化模型、校正数据非线性+线性色度特征化模型、未校正数据非线性+多项式色度特征化模型、校正数据非线性+多项式色度特征化模型；图 3(i)~(l) 分别为样品在不同校正方法下的颜色效果，各校正方法同色卡。由于显微镜采用卤素灯光源，采集的色卡和样品图像偏向低色温的暖黄色，如图 3(c) 和 (h) 所示。经校正后，图像不再偏黄，但未校正数据非线性+线性色度特征化模型的效果最差，如图 3(d) 所示，色卡校正后的中性色块仍然带有一定色彩，且其他色块颜色与色卡真实颜色也有较明显差距。从图 3(b) 可以看出，样品的表现颜色主要是中性色且偏黑色，而图 3(i) 整个图偏淡青色，其他三种校正方法都有较好的校正效果，如图 3(e)~(g) 所示。由于样品的颜色主要是中性色，本文给出了在每种校正方法下色卡 6 个中性色块的色差平均值，分别为 13.13、4.78、4.07 和 2.45，可见，校正数据非线性+多项式色度特征化模型对中性色的颜色恢复精度最高，校正效果如图 3(g) 和 (l) 所示，可以看到，对较低明度的中性色也有较好的恢复效果，因此，在进行多项式色度特征化前有必要进行数据非线性校正。

3.3 不同亮度下的非 RAW 数据校正及色度特征化

调整显微镜光源的亮度，采集 Classic 色卡在另外两种亮度下的 JPEG 图像，并利用色卡中性色块建立非 RAW 数据的非线性校正模型，如图 4 所示。图中，L1、L2、L3 分别表示三种亮度水平。在每一个子图中，实线、虚线、点划线分别表示三种亮度水平下的非线性校正曲线。可以看出，三种亮度下的非线性校正曲线并不完全相同，尤其 G 通道和 B 通道在不同亮度下的非线性校正曲线偏差较大，造成

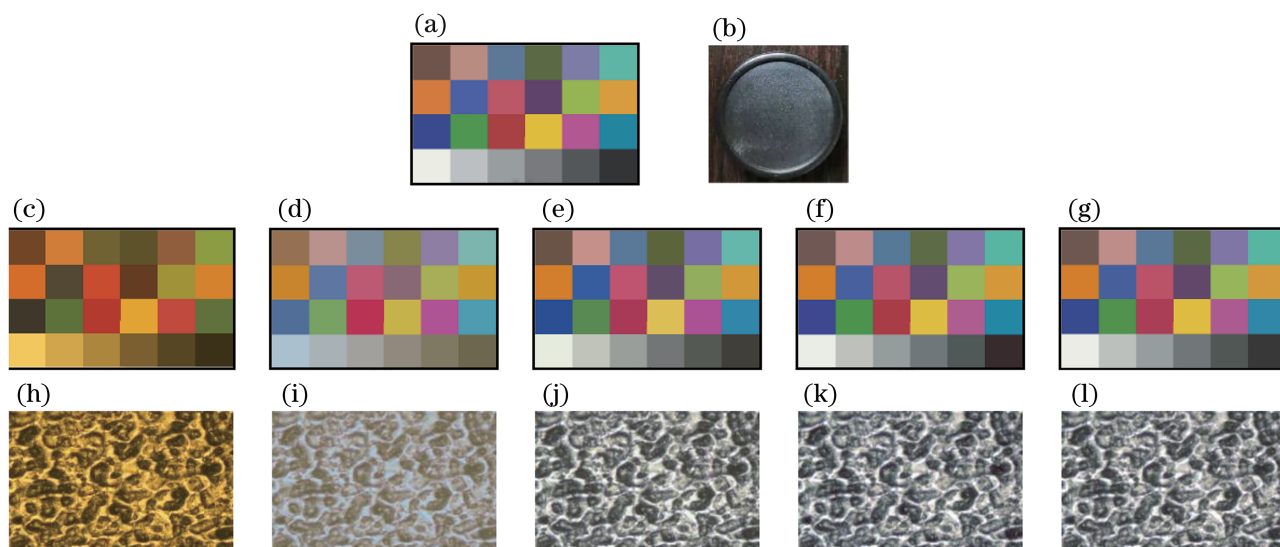


图 3 Classic 色卡和样品颜色校正效果。(a)Classic 色卡的真实颜色;(b)样品的表现颜色;(c)色卡的 JPEG 图像颜色;(d)~(g)色卡在不同方法下的颜色校正效果,方法依次为非线性未校正+线性色度特征化模型、非线性校正+线性色度特征化模型、非线性未校正+多项式色度特征化模型、非线性校正+多项式色度特征化模型;(h)样品的 JPEG 图像颜色;(i)~(l)样品在不同方法下的颜色校正效果

Fig. 3 Color correction results of Classic card and sample. (a) True color of Classic card; (b) appearance color of sample; (c) JPEG image color of Classic card; (d)~(g) color correction results of Classic card under different methods, which are nonlinearity uncorrected + linear colorimetric characterization model, nonlinearity corrected + linear colorimetric characterization model, nonlinearity uncorrected + polynomial colorimetric characterization model, and nonlinearity corrected + polynomial colorimetric characterization model; (h) JPEG image color of sample; (i)~(l) color correction results of sample under different methods

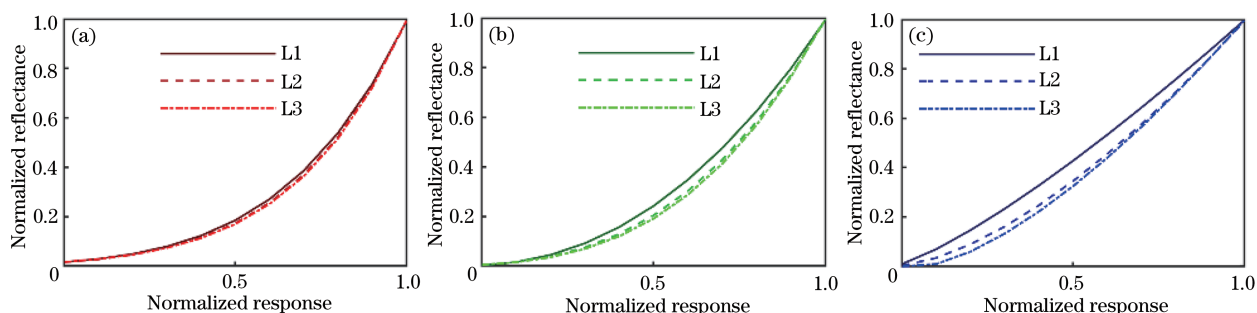


图 4 三种亮度下的 RGB 通道非线性校正曲线。(a)R 通道;(b)G 通道;(c)B 通道

Fig. 4 Nonlinearity correction curves of RGB channels under three luminance levels. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

这种现象的原因可能是随着光源亮度调整,光源的色温发生了变化。

由于数码显微镜的光源内置于整个装置内,无法用测光仪器直接测量光源的光谱、亮度、白场等参数,因此本文利用中性色块测试光源色温的变化,即用中性色块的相对 RGB 值表示光源的色品,计算公式为

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R + G + B} \\ g = \frac{G}{R + G + B} \\ b = \frac{B}{R + G + B} \end{cases}, \quad (13)$$

式中:R、G、B 分别表示中性色块的 RGB 三通道相机响应值;r、g、b 表示光源的色品坐标。在每种亮度

下,利用明度值最高的三个中性色块分别计算光源的色品坐标,并取平均值作为该亮度下光源的色品坐标。三种亮度下光源的色品坐标如图 5 所示,由于 G 通道和 B 通道在三种亮度下的非线性校正曲线相差较大,因此给出了在 g - b 坐标系的光源色品。

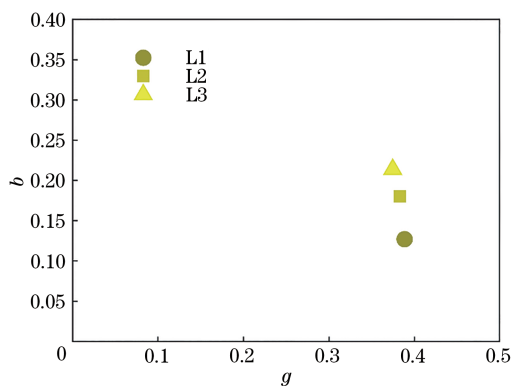


图 5 不同亮度下的光源色品

Fig. 5 Chromaticity of light source under different luminance levels

可见,三种亮度下的光源色品坐标并不同,相对于亮度 1(L1),亮度 2(L2)和亮度 3(L3)下的光源色品更接近,表明这两种亮度下光源色温变化较小,这也验证了图 4 中不同亮度下非线性校正曲线的变化,尤其对于 G 和 B 通道,相对于亮度 1,亮度 2 和亮度 3 下的非线性校正曲线更接近。

表 2 给出了在三种亮度下,采用各自的非线性校正模型校正数据前后的色度特征化精度,此处仅给出了平均色差,以考察色度特征化在不同亮度下的整体性能。可见,在每种亮度下,对于线性色度特征化模型,数据非线性校正后,精度有较大提高,对于多项式色度特征化模型,精度仍有提高,但提高幅度不大。同时发现,在每种方法下,亮度 3 下的精度最高,亮度 2 其次,亮度 1 最小,这是由于从亮度 1 到 3,光源的亮度逐渐增加,导致高亮度下数据的信噪比较高,从而得到了较好的色度特征化计算精度。

虽然不同亮度下每一个通道的非线性校正曲线并不完全一致,但整体趋势相同,且亮度变化不

表 2 三种亮度下非线性校正前后的色度特征化精度

Table 2 Accuracy of colorimetric characterization before and after nonlinearity correction under three luminance levels

Luminance level	Linear model		Polynomial model	
	Before	After	Before	After
L1	9.96	4.27	2.80	2.58
L2	9.27	3.26	2.72	2.62
L3	8.89	2.72	2.43	2.33

剧烈时,非线性校正曲线相差不大,同时,亮度调整后,在每种亮度下都做一次非线性校正势必比较麻烦,因此,本文尝试将每一个通道在三种亮度下的非线性校正模型参数取平均值,并建立该通道的通用非线性校正模型。表 3 给出了在三种亮度下,利用通用非线性校正模型校正数据前后的色度特征化精度,仍用平均色差表示,可见,对于两种色度特征化模型,非线性校正后精度都有所提高,尤其对于线性色度特征化模型,精度提高仍然很明显,虽然精度低于使用每种亮度下的非线性校正模型(表 2),但仍获得了较好的校正效果。

表 3 三种亮度下利用通用非线性校正模型校正前后的色度特征化精度

Table 3 Accuracy of colorimetric characterization before and after correction with general nonlinearity correction model under three luminance levels

Luminance level	Linear model		Polynomial model	
	Before	After	Before	After
L1	9.96	5.14	2.80	2.64
L2	9.27	3.29	2.72	2.67
L3	8.89	3.09	2.43	2.35

4 结 论

本文针对彩色数码反射显微镜,建立了基于幂函数的非 RAW 数据的非线性校正模型,并测试了校正后的数据对色度特征化性能的影响。对于线性色度特征化模型,数据非线性校正后的色度特征化精度有较大提高,表明所建立的非线性校正模型较好地拟合了相机响应值与场景辐亮度之间的关系。对于多项式色度特征化模型,数据非线性校正后精度仍然有所提高,但提高幅度不大,表明多项式色度特征化模型较好地拟合了相机响应值与 XYZ 三刺激值之间的非线性映射关系。此外,在不同亮度下,数据非线性校正后的色度特征化精度均有所提高,验证了所提出的非线性校正模型在不同光源下的适用性。同时,光源亮度改变导致光源色温变动,并引起非线性校正模型的变化,但在亮度变化不剧烈的情况下,可建立通用非线性校正模型,在保持一定色度特征化精度的同时,缩短每种亮度下的校正过程。

参 考 文 献

- [1] Kim S J, Lin H T, Lu Z, et al. A new in-camera imaging model for color computer vision and its

- application[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(12): 2289-2302.
- [2] Hong G W, Luo M R, Rhodes P A. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. Color Research & Application, 2001, 26(1): 76-84.
- [3] Ma Y M, Liu H X, Liu X. 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.
- [4] Zhang X D. Study of color reproduction theory and method for digital image [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 张显斗. 数字图像颜色复现理论与方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [5] Fang J Y, Xu H S, Wang Z H, et al. Homogeneous polynomial model for colorimetric characterization of camera with variable settings[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0833002. 方竞宇, 徐海松, 汪哲弘, 等. 相机参数可变的齐次多项式色度特征化模型[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0833002.
- [6] Parulski K, Spaulding K. Color image processing for digital cameras [M]//Digital Color Imaging Handbook. Boca Raton: CRC Press, 2017: 727-757.
- [7] Burggraaff O, Schmidt N, Zamorano J, et al. Standardized spectral and radiometric calibration of consumer cameras [J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19075-19101.
- [8] Nguyen R M H, Brown M S. RAW image reconstruction using a self-contained sRGB-JPEG image with small memory overhead[J]. International Journal of Computer Vision, 2018, 126(6): 637-650.
- [9] Mann S, Picard R. On being 'undigital' with digital cameras: extending dynamic range by combining differently exposed pictures[C]//1995 IS&T's 48th Annual Conference, May 7-11, 1995, Washington, D.C., USA. Springfield, VA: Society for Imaging Science and Technology, 1995, 422-428.
- [10] Mitsunaga T, Nayar S K. Radiometric self calibration [C]//Proceedings of 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), June 23-25, 1999, Fort Collins, CO, USA. New York: IEEE Press, 1999: 374-380.
- [11] Grossberg M D, Nayar S K. Determining the camera response from images: what is knowable?[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(11): 1455-1467.
- [12] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]//ACM SIGGRAPH 2008 classes on - SIGGRAPH '08, August 11-15, 2008. Los Angeles, California. New York: ACM Press, 2008, 31:1-10.