

基于均匀颜色样本的彩色数码相机色度特征化目标样本优化

徐鹏^{1,2,3*}, 章海军², 张克奇¹, 毛磊¹, 邱元芳¹, 赵巨峰⁴

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;

⁴杭州电子科技大学电子信息学院 浙江 杭州 310018

摘要 彩色数码相机通常利用目标样本建立色度特征化模型, 目标样本将影响相机响应值与色度值之间的映射关系。现有的目标样本选择方法忽略了目标样本的普适性, 即基于优化的目标样本建立的色度特征化模型应对任何颜色样本都适用, 为此提出了基于均匀颜色样本的数码相机色度特征化目标优化方法。首先, 从大量真实物体的光谱反射比中挑选均匀颜色样本, 然后, 结合色度特征化模型在均匀颜色样本中优化目标样本。实验结果表明, 目标样本的优化受数据类型和色度特征化模型的影响, 因而得到了不同的优化目标样本, 且优化目标样本的色度特征化性能优于典型的目标样本。同时, 对于 RAW 数据, 目标样本数量的增加并不一定提高线性色度特征化模型的精度, 而对于 sRGB 数据, 较多的目标样本将有利于提升多项式色度特征化模型性能。

关键词 颜色; 数码相机; 色度特征化; 目标优化; 均匀颜色样本; RAW 数据; sRGB 数据

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1133001

Optimization of Colorimetric Characterization Target for Color Digital Cameras Based on Uniform Color Samples

Xu Peng^{1,2,3*}, Zhang Haijun², Zhang Keqi¹, Mao Lei¹, Qiu Yuanfang¹, Zhao Jufeng⁴

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;

⁴School of Electronics and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Digital cameras usually build a colorimetric characterization model through target samples, which, however, will affect the mapping between the cameras' response values and the colorimetric values. The existing selection methods for target samples ignore the generality of target samples, namely that the colorimetric characterization model built based on the optimized target samples should be applicable to any color samples. Therefore, we proposed an optimization method of colorimetric characterization targets for the digital cameras based on uniform color samples. First, uniform color samples were selected from the spectral reflectance of extensive real objects. Then, the colorimetric characterization model was combined to optimize the target samples among the uniform color samples. The results show that the optimization of target samples is subject to the data type and the colorimetric characterization model. Consequently, different optimized target samples are obtained, and the

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-22; 录用日期: 2021-01-08

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)、浙江省装备电子研究重点实验室开放基金项目(GK190901207001)

* E-mail: xsjzxp@163.com

optimized target samples outperform the typical target samples in terms of colorimetric characterization. In addition, for the RAW data, an increase in the number of target samples does not necessarily improve the accuracy of a linear colorimetric characterization model, while for the sRGB data, more target samples will be beneficial for enhancing the performance of a polynomial colorimetric characterization model.

Key words color; digital camera; colorimetric characterization; target optimization; uniform color samples; RAW data; sRGB data

OCIS codes 330.1710; 330.1690; 330.1730

1 引言

在彩色数码相机图像信号处理(ISP)流程中,色度特征化将设备相关的相机传感器 RAW 响应值转换为设备无关的色度值^[1],如 CIE XYZ 三刺激值。彩色数码相机也可作为成像式色度计^[2],利用色度特征化从相机传感器 RAW 响应值或者 sRGB 值得到物体的色度值。色度特征化可利用目标样本建立相机响应值与色度值之间的转换关系^[3],因此目标样本将影响色度特征化的精度。通常,目标样本包含的样本数量越多,色度特征化精度越高,但较多的样本需要更多的制作成本和测量时间^[4],因此有必要优化得到恰当数量的目标样本,并保持较高的色度特征化精度。目标样本选择方法按不同标准可分为不同类型^[5],根据适用性可分为全局型和局部型,全局型获得的目标样本适用于所有样本,而局部型针对每个样本选择目标样本。根据选择方式可分为自下而上型和自上而下型,自下而上型逐渐往空集里增加样本,自上而下型从一个全集中逐渐剔除样本。根据应用目的可分为通用型和应用相关型,应用相关型针对某具体应用选择相应的目标样本,而通用型选择的目标样本适用于任何应用。对于彩色数码相机色度特征化,通常希望选择的目标样本适用于所有物体和应用,以提高色度特征化的泛化性能和计算效率,因此本文聚焦于全局型和通用型的目标样本选择方法。现有的方法通常针对某类特殊对象选择目标样本^[5],选择的目标样本仅适用于某类对象,而忽略了目标样本的普适性,即基于优化的目标样本建立的色度特征化模型应对任何颜色样本都适用,如果目标样本偏向某个色区,则基于目标样本建立的色度特征化模型将不利于其他色区颜色的恢复,因此本文提出了基于均匀颜色样本的色度特征化目标样本优化方法。首先从大量真实物体的光谱反射比中挑选均匀的颜色样本,然后结合色度特征化模型在均匀颜色样本中优化目标样本,同时,针对不同的数据类型和色度特征化模型优化目标样本,并利用真实光谱图像测试和比较优化的目标样

本与典型目标样本的色度特征化性能。

2 理论与方法

2.1 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 \mathbf{P} , \mathbf{P} 包含由样本 RGB 值形成的向量 $\boldsymbol{\rho}_j = [R_j, G_j, B_j]$ ($j = 1, 2, \dots, n$),其对应的三刺激值为 \mathbf{M} ,则三刺激值与响应值之间的映射关系可以表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{C}\mathbf{P}. \quad (1)$$

其中转换矩阵 \mathbf{C} 可通过最小二乘法确定,即

$$\mathbf{C} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{M}, \quad (2)$$

式中:上标 T 和 -1 分别表示矩阵的转置和逆,(2)式即线性色度特征化模型。Hong 等^[6]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,由 RGB 值的不同组合可形成不同的多项式,例如 5、6、8、9 和 11 项多项式,向量 $\boldsymbol{\rho}_j$ 可扩展为含有相应项数元素的向量,即

$$\boldsymbol{\rho}_j^5 = [1, R_j, G_j, B_j, R_j G_j B_j], \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\rho}_j^6 = [R_j, G_j, B_j, R_j G_j, R_j B_j, G_j B_j], \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\rho}_j^8 = [1, R_j, G_j, B_j, R_j G_j, R_j B_j, G_j B_j, R_j G_j B_j], \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\rho}_j^9 = [R_j, G_j, B_j, R_j G_j, R_j B_j, G_j B_j, R_j^2, G_j^2, B_j^2], \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\rho}_j^{11} = [1, R_j, G_j, B_j, R_j G_j, R_j B_j, G_j B_j, R_j^2, G_j^2, B_j^2, R_j G_j B_j]. \quad (7)$$

此时,采用 n 个样本的多项式向量 $\boldsymbol{\rho}_j$ 重新构成响应值矩阵 \mathbf{P} ,利用(2)式可再次计算转换矩阵 \mathbf{C} ,得到多项式色度特征化模型。

2.2 目标样本优化方法

为了使基于目标样本建立的色度特征化模型对所有颜色都适用,且不偏向任何色区的颜色,本文提出了基于均匀颜色样本的目标样本优化方法,如图 1 所示,该方法属于自上而下型的方法,共分为两个步骤,首先选择均匀的颜色样本,然后在均匀颜色样本

中结合色度特征化优化目标样本。

1) 选择均匀颜色样本。为了保证优化的目标样本适用于真实物体的颜色获取,本文基于真实物体的光谱反射比选择均匀颜色样本,并未采用理论上的光谱反射比数据,因为理论光谱反射比在实际中可能并不常见,但会影响优化结果,优化得到的目标样本将不利于真实物体的色度特征化。同时,国内外相关研究机构在网上公布了大量真实物体的光谱反射比和光谱图像数据库,为真实物体光谱反射比的获取提供了条件。均匀颜色样本选择方法如图 1(a)所示,首先搜集大量真实物体样本的光谱反射比,然后计算光谱反射比的 $L^* C_{ab}^* h_{ab}$ (明度、彩度、色调角)值,并将样本散布于彩度-色调角平面,确定

每个色调角上需要选择的样本数量,在每个色调角上选择等量的样本,得到在彩度-色调角平面均匀分布的颜色样本。在确定每个色调角上需要选择的样本数量时,首先找到包含样本最少的色调角,然后在该色调角上选择两两之间色差 (ΔE_{76}) 大于 1 的样本,因为当 $\Delta E_{76} < 1$ 时,将察觉不到样本之间的颜色差异^[7],则得到的样本数量即为每个色调角上需要选择的样本数量。假设在每个色调角上需要选择的样本数量为 m ,在其他色调角选择样本时,将该色调角上样本的彩度值均匀划分为 $m-1$ 份,并按划分的彩度间隔均匀选择 m 个样本。假设色调角的数量为 k ,则选择的均匀颜色样本的数量为 $k \times m$ 。

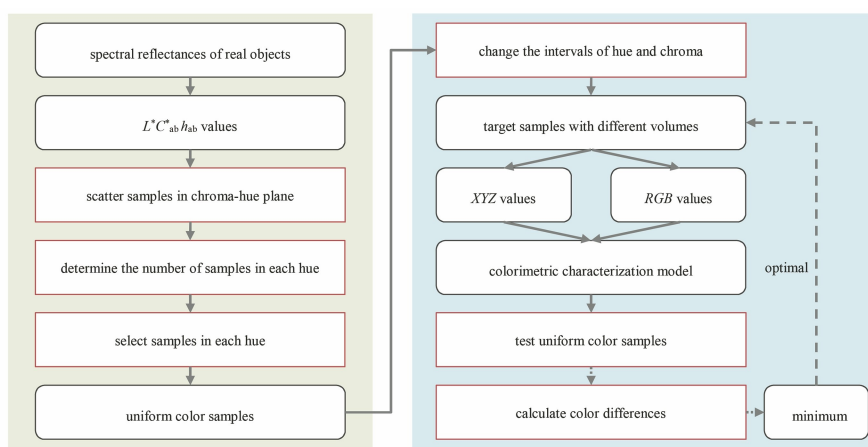


图 1 目标样本优化流程。(a)均匀颜色样本选择;(b)目标样本优化

Fig. 1 Flowchart of optimizing target samples. (a) Selection of uniform color samples; (b) optimization of target samples

2) 结合色度特征化优化目标样本。如图 1(b)所示,在彩度-色调角平面,逐渐改变色调角和彩度间隔,从而在均匀颜色样本中选择不同数量的目标样本。在每个色调角上选择指定彩度间隔的样本时,从该色调角上彩度最大的样本开始选择,因为彩度较大的颜色对该色调有较好的代表性,而彩度较小的颜色趋于中性色,对该色调的代表性较差。但该操作可能导致中性色样本未被选择,因此,对于未包含中性色的目标样本,将增加与目标样本包含的色调角数量相同的中性色样本,选择的中性色样本的反射比在所有中性色样本中从最小值到最大值均匀分布。基于目标样本的光谱反射比计算其 CIE XYZ 三刺激值和 RGB 值,本文生成了两种 RGB 值,一种是结合数码相机光谱灵敏度生成的相机 RAW 响应值,从而模拟数码相机 ISP 流程中利用色度特征化将 RAW 响应值转换为色度值。另一种为 sRGB 值,sRGB 值是大部分数码相机最终生成的彩色图像值,基于 sRGB 建立色度特征化模型,可

模拟数码相机作为成像式色度计。利用目标样本的 CIE XYZ 三刺激值和 RGB 值建立色度特征化模型,并测试步骤 1 中选择的均匀颜色样本的颜色恢复精度,计算其平均色差,将使均匀颜色样本平均色差最小的目标样本作为最优目标样本。

3 实验与分析

3.1 均匀颜色样本选择

按 2.2 节所述方法,本文从 114120 个真实物体样本的光谱反射比^[8]中选择均匀颜色样本,这些样本的提供者从大量光谱反射比数据库和光谱图像数据库中收集样本,然后通过聚类把一些高度相似的样本合并,并剔除含有脉冲噪声的样本。光谱反射比的采样范围为 400~700 nm、以 10 nm 为间隔。在彩度-色调角平面中,色调角从 0°到 350°以 10°为间隔均匀划分,则得到 36 个色调角。将所有样本散布于彩度-色调角平面中,经统计得到包含样本最少的色调角为 130°,该色调角上的样本数量为 59,选

择两两之间色差(ΔE_{76})大于 1 的样本后,样本数量为 56,则得到每个色调角上需要选择的样本数量为 56,最终选择的均匀颜色样本的数量为 $2016 = 36 \times 56$,图 2 在彩度-色调角平面展示了选择的均匀颜色样本。

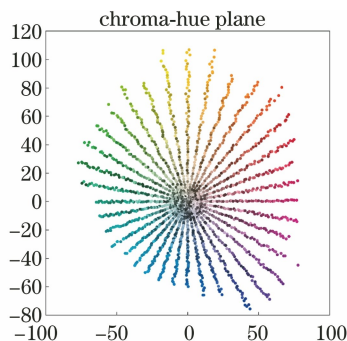


图 2 均匀颜色样本

Fig. 2 Uniform color samples

3.2 基于 RAW 数据的目标样本优化

本文采用彩色数码相机的光谱灵敏度数据模拟数码相机的 RAW 响应值,首先收集了 28 台彩色数码相机的光谱灵敏度数据^[9],然后计算这些相机 RGB 通道每一个通道的平均光谱灵敏度,并将其作为彩色数码相机的通用光谱灵敏度,如图 3 所示。基于样本的光谱反射比,结合通用光谱灵敏度和 D65 照明体的光谱功率分布,生成相机的 RGB

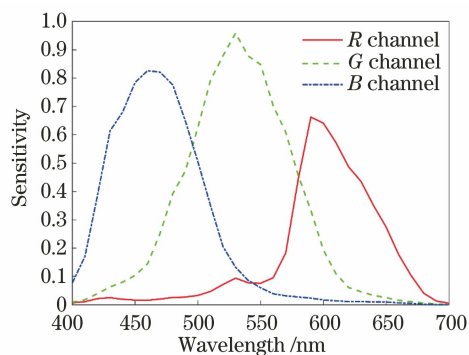


图 3 通用彩色数码相机光谱灵敏度

Fig. 3 General spectral sensitivities of digital color cameras

RAW 响应值。

图 4 展示了基于线性和多项式色度特征化模型分别优化得到的目标样本。表 1 列出了不同色度特征化模型对应的优化目标样本数量,其中 L 表示基于线性色度特征化模型优化得到的目标样本,P5、P6、P8、P9、P11 分别表示基于不同项数多项式色度特征化模型优化得到的目标样本,项数依次为 5 项、6 项、8 项、9 项和 11 项,表中给出了每种目标样本包含的彩色样本数量、色调角数量、每个色调角上的样本数量、中性色样本数量以及样本总量,样本总量等于彩色样本数量加中性色样本数量。

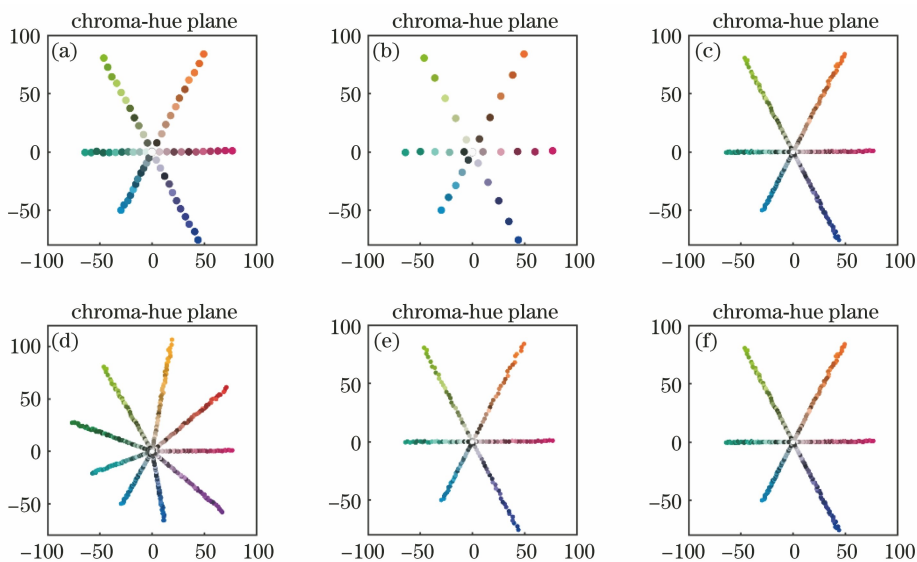


图 4 基于 RAW 数据优化得到的目标样本。(a)基于线性特征化模型优化得到的目标样本;(b)~(f)基于不同项数多项式色度特征化模型优化得到的目标样本,项数依次为 5 项、6 项、8 项、9 项和 11 项

Fig. 4 Optimized target samples with RAW data. (a) Optimized target samples based on linear characterization model; (b)~(f) optimized target samples based on polynomial colorimetric characterization model with different terms, and the number of terms is 5, 6, 8, 9, and 11, respectively

表 1 基于 RAW 数据优化得到的目标样本数量

Table 1 Number of optimized target samples with RAW data

Parameter	L	P5	P6	P8	P9	P11
Color samples	72	30	168	504	336	168
Hue	6	6	6	9	6	6
Samples in each hue	12	5	28	56	56	28
Neutral samples	6	6	6	9	6	6
Total	78	36	174	513	342	174

基于线性色度特征化模型优化得到了 78 个目标样本,包含 72 个彩色样本,6 个中性色样本,彩色样本分布于 6 个色调角上,每个色调角上包含 12 个样本,6 个色调角分别为 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 和 300° 。基于不同项数的多项式色度特征化模型优化得到了不同的目标样本,5 项、6 项、8 项、9 项、11 项多项式对应的优化目标样本数量分别为 36、174、513、342、174。5 项、6 项、9 项、11 项多项式对应的目标样本中都包含 6 个中性色样本,彩色样本数量分别为 30、168、336、168,如图 4 所示,彩色样本所在的色调角与线性色度特征化模型相同,但每个色调角上的样本数量不同,分别为 5、28、56、28,同时,6 项和 11 项多项式优化得到的目标样本相同。8 项多项式对应的彩色目标样本数量为 504,分布在 9 个色调角上,分别为 0° 、 40° 、 80° 、 120° 、 160° 、 200° 、 240° 、 280° 和 320° ,每个色调角上有 56 个样本,同时,对应的中性色样本数量为 9。

可见,对于 RAW 数据,目标样本的优化受色度特征化模型影响,不同色度特征化模型优化得到了不同的目标样本。最少的目标样本数量为 36,最多的为 513,都是由多项式色度特征化模型获得,但目标样本的数量并未随多项式项数的增加而增加,当项数较少时,目标样本的数量较少,随着项数的增加,目标样本数量增加,当项数超过 9 时,目标样本的数量又下降。此外,除了 8 项多项式色度特征化模型,其他 5 个色度特征化模型优化的彩色目标样

本分布在相同的色调角上,即 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 和 300° ,表明这 6 个色调角上的样本有利于基于 RAW 数据的色度特征化。

采用 35 幅光谱图像^[10]测试目标样本的色度特征化性能,大部分光谱图像的空间分辨率为 500×500 ,每个像素包含一条范围在 $420 \sim 720 \text{ nm}$ 、以 10 nm 为间隔的光谱反射比,则每幅图像包含 250000 条光谱反射比或颜色样本。由于目标样本和通用光谱灵敏度的光谱反射比采样范围为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,可以利用样条插值将光谱图像的光谱反射比插值到相同光谱范围。同样利用通用光谱灵敏度和 D65 照明体的光谱功率分布,结合光谱图像的光谱反射比模拟相机的 RGB RAW 响应值,利用优化的目标样本建立色度特征化模型,将 RAW 响应值转换为 CIE XYZ 三刺激值,与基于光谱图像的光谱反射比直接计算得到的 CIE XYZ 三刺激值计算色差(ΔE_{00})对比,从而测试优化的目标样本的色度特征化性能。同时,测试 3 种典型目标样本的色度特征化精度,分别为 X-Rite Digital SG ColorChecker(缩写为 DSG),包含 140 个颜色样本; Gretag Macbeth Digital ColorChecker DC Chart(缩写为 DC),包含 237 个颜色样本; X-Rite ColorChecker Classic(缩写为 CL),包含 24 个颜色样本。利用每种目标样本建立的两种色度特征化模型分别计算 35 幅光谱图像的平均色差(Mean)、最大色差(Max.)及色差的标准偏差(Std.),结果如表 2 所示。

表 2 基于 RAW 数据的各目标样本的色度特征化精度

Table 2 Accuracy of colorimetric characterization for different target samples with RAW data

ΔE_{00}	Linear model				Polynomial model							
	DSG	DC	CL	L	DSG	DC	CL	P5	P6	P8	P9	P11
Mean	1.02	1.03	1.00	0.97	0.91	1.01	0.93	1.14	1.00	1.13	0.89	0.99
Max.	2.71	2.54	2.69	2.42	2.04	2.00	1.83	2.60	2.32	2.30	1.89	2.00
Std.	0.55	0.57	0.58	0.48	0.47	0.52	0.47	0.47	0.36	0.34	0.38	0.40

由于 9 项多项式色度特征化模型对应的目标样本色度特征化精度最高,对于其他 3 种典型目标样本,仅给出了 9 项多项式色度特征化模型的精度。

对于 DSG 和 CL,精度最高的同样是 9 项多项式色度特征化模型,对于 DC,6 项多项式色度特征化模型获得了最高精度,平均色差为 $0.92\Delta E_{00}$,因此不

同目标样本对应的最优色度特征化模型不同。

从表 2 可以看到,对于线性色度特征化模型,优化得到的目标样本的平均色差、最大色差以及标准偏差都小于其他三种目标样本,表明优化的目标样本可以得到更好的线性色度特征化性能。对于多项式色度特征化模型,9 项多项式色度特征化模型优化得到的目标样本精度最高,且优于线性色度特征化模型的最优目标样本,同时,对于 DSG 和 CL,9 项多项式色度特征化模型也获得了最高精度,表明对于 RAW 数据,9 项多项式色度特征化模型可以较好地拟合 RGB 值与 CIE XYZ 三刺激值之间的映射关系,而其他多项式色度特征化模型则存在一定程度的欠拟合或过拟合。此外,对于仅有 24 个样本的 CL,其线性色度特征化模型的平均色差小于 DSG 和 DC,且对于多项式色度特征化模型,DSG 的平均色差小于 DC,而 DSG 的样本数量少于 DC,表明对于 RAW 数据,目标样本数量的增加并不一定提高色度特征化性能。

3.3 基于 sRGB 数据的目标样本优化

基于光谱反射比、D65 照明体的光谱功率分布和配色函数生成 XYZ 三刺激值,再转换为 sRGB 数据。由于 sRGB 数据生成过程引入了非线性运算^[11],线性色度特征化模型对 sRGB 数据的效果较差^[12],因此,对于 sRGB 数据,仅基于多项式色度特

征化模型优化得到了目标样本,如图 5 所示,不同多项式色度特征化模型对应的目标样本数量见表 3。5 项、6 项、8 项、9 项、11 项多项式对应的优化目标样本数量分别为 144、90、180、1026、513,其中 5 项、6 项、9 项多项式的彩色样本都分布在 18 个色调角上,色调角范围为 $0^{\circ}\sim 340^{\circ}$,以 20° 为间隔。8 项多项式的彩色样本分布在 12 个色调角上,色调角范围为 $0^{\circ}\sim 330^{\circ}$,以 30° 为间隔。11 项多项式的目标样本包含 504 个彩色样本,9 个中性色样本,彩色样本分布于 9 个色调角上,每个色调角上包含 56 个样本,9 个色调角分别为 0° 、 40° 、 80° 、 120° 、 160° 、 200° 、 240° 、 280° 、 320° 。

对于 sRGB 数据,目标样本的优化同样与色度特征化模型相关,不同多项式色度特征化模型优化得到了不同的目标样本。最少的目标样本数量为 90,由 6 项多项式所得;最多的为 1026,由 9 项多项式所得。目标样本的数量同样并未随多项式项数的增加而增加,11 项多项式的目标样本数量较少。对于 RAW 数据,最少的色调角数量为 6,最多的色调角数量为 9,而对于 sRGB 数据,最少的色调角数量为 9,最多的色调角数量为 18,相比 RAW 数据,基于 sRGB 数据优化得到的目标样本分布于更多的色调角上,表明对于 sRGB 数据,多项式色度特征化模型需要分布更均匀的颜色样本才能准确拟合 RGB 值与 CIE XYZ 三刺激值之间的映射关系。

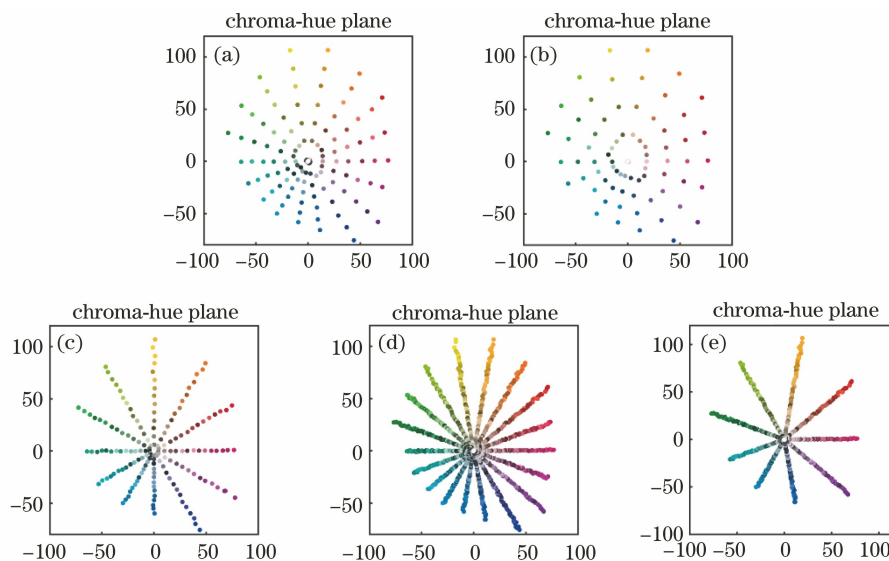


图 5 基于 sRGB 值和多项式色度特征化模型优化得到的目标样本。(a)~(e)基于不同项数多项式色度特征化模型优化得到的目标样本,项数依次为 5 项、6 项、8 项、9 项和 11 项

Fig. 5 Optimized target samples based on sRGB values and polynomial colorimetric characterization models. (a)~(e) Optimized target samples based on polynomial colorimetric characterization model with different terms, and the number of terms is 5, 6, 8, 9, and 11, respectively

表 3 基于 sRGB 数据优化得到的目标样本数量

Table 3 Number of optimized target samples with sRGB data

Parameter	P5	P6	P8	P9	P11
Color samples	126	72	168	1008	504
Hue	18	18	12	18	9
Samples in each hue	7	4	14	56	56
Neutral samples	18	18	12	18	9
Total	144	90	180	1026	513

同样利用 35 幅光谱图像^[10]测试不同目标样本的多项式色度特征化性能,即 DSG、DC、CL、P5、P6、P8、P9、P11,结果如表 4 所示,此处的 P5、P6、P8、P9、P11 指利用 sRGB 数据和不同多项式色度特征化模型优化得到的目标样本,项数依次为 5 项、

6 项、8 项、9 项和 11 项。由于 11 项多项式色度特征化模型对应的目标样本色度特征化精度最高,对于其他 3 种典型目标样本,仅给出了 11 项多项式色度特征化模型的精度,同时,相对于其他项数多项式,11 项多项式色度特征化模型获得了最高精度。

表 4 基于 sRGB 数据的各目标样本的色度特征化精度

Table 4 Accuracy of colorimetric characterization for different target samples based on sRGB data

ΔE_{00}	Polynomial model							
	DSG	DC	CL	P5	P6	P8	P9	P11
Mean	1.77	1.64	1.88	8.98	7.95	8.19	2.05	1.64
Max.	5.49	4.06	6.30	13.49	11.28	13.03	4.44	3.82
Std.	1.37	1.02	1.45	2.29	1.77	2.05	0.99	0.88

从表 4 可以看到,P11 和 DC 的平均色差相同,且小于 DSG 和 CL,但 P11 的最大值和标准偏差小于 DC,表明优化得到的目标样本可以获得更稳定的色度特征化性能。对于 4 种目标样本的整体色度特征化性能,CL < DSG < DC < P11,而 4 种目标样本的样本数量依次增加,因此,对于 11 项多项式色度特征化模型,样本数量较多的目标样本将有利于获得较好的色度特征化性能。同时,P5、P6、P8 的色差在 8 左右,而 P9 下降到 2 左右,P11 则下降到 2 以下,因此,9 项和 11 项多项式色度特征化模型优化的目标样本的精度有较大提升,对于三种典型目标样本也是如此,表明对于多项式色度特征化模型,不恰当的多项式将不能获得较好的色度特征

化性能,从(3)~(7)式可知,9 项和 11 项多项式增加了 R^2 、 G^2 、 B^2 项,说明 R^2 、 G^2 、 B^2 项对拟合 sRGB 数据与 CIE XYZ 三刺激值之间的非线性映射关系有重要作用。此外,对比表 2 可知,对于每种目标样本,基于 sRGB 数据的多项式色度特征化精度均小于基于 RAW 数据,表明多项式色度特征化模型虽然能够得到较好的色度特征化性能,但并未精准地拟合 sRGB 数据与 CIE XYZ 三刺激值之间的非线性映射关系。

图 6 展示了基于 11 项多项式色度特征化模型和两种目标样本 sRGB 值恢复的色度图像的色差图,原始图像为 35 幅光谱图像中的 doll 图像。

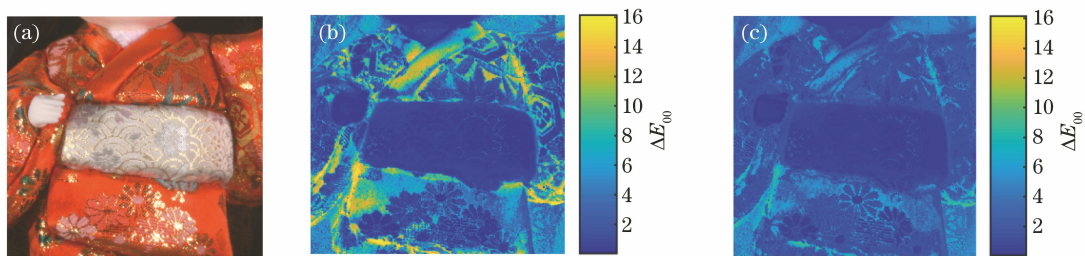


图 6 利用两种目标样本分别恢复的色度图像的色差图。(a)以 sRGB 图像表示的原图;(b)利用 DC 恢复的色度图像的色差图;(c)利用 P11 恢复的色度图像的色差图

Fig. 6 Color difference maps of the recovered colorimetric images with two targets respectively. (a) Original image represented by sRGB image; (b) color difference map of the recovered colorimetric image with DC target; (c) color difference map of the recovered colorimetric image with P11 target

色差图中每一个像素表示原始的 XYZ 值与利用目标样本和多项式色度特征化模型计算的 XYZ 值之间的 CIE DE2000 色差。利用 DC 和 P11 恢复的色度图像的平均色差分别为 3.64 和 2.14, 从图中还可以看到, 利用 P11 恢复的色度图像的整体色差小于 DC。

4 结 论

本文基于均匀颜色样本优化得到了不同的数码相机色度特征化目标, 数据类型和色度特征化模型均对目标样本优化有影响。对于 RAW 数据, 基于线性色度特征化模型优化得到的目标样本可以获得较好的色度特征化精度, 而 9 项多项式色度特征化模型的精度最高, 说明 9 项多项式色度特征化模型可以更准确地拟合 RGB RAW 响应值与 CIE XYZ 三刺激值之间的映射关系, 且目标样本数量的增加并不一定导致色度特征化性能的提高。对于 sRGB 数据, 11 项多项式色度特征化模型优化得到的目标样本的色度特征化精度最高, 对于 11 项多项式色度特征化模型, 样本数量较多的目标样本将有利于色度特征化性能的提升。同时, 多项式中的 R^2 、 G^2 、 B^2 项对拟合 sRGB 数据与 CIE XYZ 三刺激值之间的非线性映射关系有重要影响。此外, 相对于 RAW 数据, 多项式色度特征化模型并不能精准地拟合 sRGB 数据与色度值之间的非线性映射关系。

参 考 文 献

- [1] Gaurav S. Digital color imaging handbook[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [2] Cheung V, Westland S. Methods for optimal color selection [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(5): 481-488.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Eckhard T, Valero E M, Andrés J H, et al. Adaptive global training set selection for spectral estimation of printed inks using reflectance modeling [J]. Applied Optics, 2014, 53(4): 709-719.
- [6] Hong G W, Luo M R, Rhodes P A, et al. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. Color Research & Application, 2001, 26(1): 76-84.
- [7] Mokrzycki W S, Tatol M. Colour difference δE : a survey[J]. Machine Graphics and Vision, 2011, 20(4): 383-411.
- [8] Qin J. Spectral reflectance database from hyperspectral images[EB/OL]. (2016-12-10) [2020-11-16]. <https://ridiqlous.com/spectral-reflectance-database/>.
- [9] Jiang J, Liu D Y, Gu J W, et al. What is the space of spectral sensitivity functions for digital color cameras?[C]//2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), January 15-17, 2013, Clearwater Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2013: 168-179.
- [10] Monno Y, Kikuchi S, Tanaka M, et al. A practical one-shot multispectral imaging system using a single image sensor [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(10): 3048-3059.
- [11] I. E. Commission. Multimedia systems and equipment-colour measurement and management-part 2-1: colour management-default RGB colour space-sRGB: IEC 61966-2-1 [S]. Geneva: I. E. Commission, 1999.
- [12] Xu P, Zhang K Q, Zhang H J, et al. Colorimetric characterization of digital reflection microscope based on non-RAW data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0133001.
徐鹏, 张克奇, 章海军, 等. 基于非 RAW 数据的数码反射显微镜色度特征化[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0133001.