

激光与光电子学进展

基于多光源维纳估计的光谱重建算法

王晗, 李长军*

辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

摘要 提出了一种基于多光源下彩色数码相机原始数据的物体反射率预测算法。通过测量获得彩色数码相机的灵敏度函数和每个光源的光谱,建立包括噪声项的相机原始数据与物体反射率的基本线性方程。通过训练色卡(X-Rite 140 色卡)估计系统噪声,并通过多光源维纳估计算法预测反射率。用两台不同品牌的专业数码相机对本算法进行评估。结果表明,本算法在 D65、U30 和 HZ 光源下的表现最优。相比分光光度计得到的光谱反射率,Canon 相机和 Nikon 相机对孟塞尔色卡的预测精度较高,平均 CIELAB 色差分别为 1.59 和 1.40,在非接触测色和颜色复制等领域具有重要应用价值。

关键词 视觉光学; 多光源; 光谱反射率重建; 维纳估计; 多光谱成像

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1933001

Spectral Reconstruction Algorithm Based on Multi-Light Source Wiener Estimation

Wang Han, Li Changjun*

School of Computer and Software Engineering, University of Science and Technology Liaoning,
Anshan 114051, Liaoning, China

Abstract This study proposes an algorithm for predicting objects' reflectance based on the color digital camera raw data under multi-light source. The color digital camera's sensitivity functions and each light source's spectrum are measured, and the basic linear equation linking the camera raw data under multi-light source and object reflectance, including the system noise term is developed. The training color card (X-Rite 140 color card) is employed to estimate the system noise, and the multi-light source Wiener estimation algorithm is used to predict the reflectance. Two different brands of professional digital cameras are used to evaluate the algorithm. The findings demonstrate that the algorithm has the best performance under D65, U30, and HZ light sources. The Canon and Nikon cameras exhibit higher prediction accuracy for the Munsell color chart compared with the spectral reflectance obtained by the spectrophotometer, and the average CIELAB color difference is 1.59 and 1.40, respectively. It has crucial applications value in the fields of noncontact color measurement and color reproduction.

Key words visual optics; multi-light source; spectral reflectance reconstruction; Wiener estimation; multispectral imaging

1 引言

光谱反射率是物体颜色的本质属性,通过重建光谱反射率可对颜色进行有效的复制,且能避免“同色异谱”问题。数码相机具有高分辨率、短曝光时间、使用环境基本不受限制等优点,用数码相机进行非接触测色是颜色科学领域的前沿课题之一。通常在单光源下通过彩色数码相机采集三通道数据,再通过伪逆

法、多项式回归法^[1]、根多项式回归法^[2]重建物体的反射率。

近年来,人们提出了多种有效的光谱反射率重建算法。Cao等^[3]提出了一种基于较小色差加权的算法,该算法采用sRGB(Standard Red, Green, Blue)^[4]协议,将数码相机的JPG数据转换到D65光源下的CIELAB空间后对物体的反射率进行加权重建,但该算法需要用全部Munsell样本作为训练集,数据采集工作量较

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-09-23; 录用日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61575090,61775169)

通信作者: *cjliustl@sina.com

大,使其应用受到了一定限制。Amiri等^[5]提出了一种加权非线性回归模型,该模型基于X-Rite公司生产的140色色卡进行训练,测试精度比多项式回归法高。Liang等^[6]提出了一种先将数码相机原始(RAW)数据扩展成1阶多项式再转换到CIELAB空间后进行高斯加权的算法,对色卡样本和纺织样本均得到了较好的结果。Wang等^[7]改进了高斯模型的加权方式,进一步提高了算法的重建精度。上述算法都是用数码相机在单光源下进行数据采集,对反射率重建精度的提升幅度有限。

高光谱成像^[8-9]具有精度高的优点,但成像时间长、造价高。相比高光谱成像,多光谱成像^[10-13]具有速度快、价格低廉的优点,包括使用多滤光片或多光源(如可调LED光源)和黑白相机以及彩色相机结合的多光源成像技术。Shrestha等^[10-11]搭建了使用LED和Canon 20D数码相机的多光谱成像系统,通过9个LED对光谱反射率进行重建,但只进行了仿真实验。褚金金等^[12]提出一种基于可调LED的光谱测量算法,通过16颗亮度可调的LED匹配出所需光源的相对光谱功率分布,使其与黑白相机的光谱灵敏度函数倒数成线性关系,以快速重建物体的反射率。实测结果表明,该算法预测的平均色差为2.3个CIELAB色差单位,反射率均方根误差为0.031。Zhang等^[14-15]用虚拟多光源成像技术提高预测反射率的精度,将实际光源下相机的RGB数据通过多项式算法转换到多个光源下的三刺激值(X 、 Y 、 Z),再联立多光源下的三刺激值预测反射率。该算法的原理比真实多光源成像简单,比单光源成像的加权多项式算法精度高,但精度提升幅度不大。

本文提出了一种用彩色数码相机获取多光源下原

始数据的算法。首先,用实测相机灵敏度函数和光源光谱建立包含噪声项的相机RAW数据与物体反射率的基本线性代数方程。然后,利用维纳估计算法^[16]预测反射率。基本线性代数方程中的误差项可以通过训练色卡估计,从而提高反射率的预测精度。因此,采用两台商用数码相机,以X-Rite公司生产的140色色卡作为训练样本,预测孟塞尔色系集中的172个颜色。实验结果表明,使用3个光源的成像效果最好,相比单光源成像的预测精度有显著提升。

2 实验数据的获取

实验在暗室内进行,相机传感器到样品的垂直距离为60 cm。Canon EOS 60D相机的设置:白平衡为6500 K;光圈为f4;感光度(ISO)为100;曝光时间为1/30 s。Nikon D610相机的设置:白平衡为6670 K;光圈为f4.2;ISO为100;曝光时间为1/30 s。

实验准备了两组样本,分别为美国X-Rite公司生产的140色专业色卡(ColorChecker Digital 140)和部分孟塞尔色卡册中的色卡,包括红(5R)、黄(5Y)、绿(5G)、蓝(5B)、紫(5P)5个主要色调页和中性(N)色页的所有色卡,共计172个样本。将140色专业色卡作为训练样本,孟塞尔色卡作为测试样本。用日本KONICAMINOLTA公司生产的CM-2600d分光光度计测量样本在360~740 nm波长范围内的反射率,采样间隔为10 nm。实验使用的均匀白板为美国X-Rite公司生产的白平衡色卡(ColorChecker White Balance),如图1(a)所示。实验样本如图1(b)和图1(c)所示。通过三次测量并取平均值减小随机噪声产生的测量误差,并在使用时截取400~700 nm的反射率用于后续实验。



图1 实验样本。(a)白平衡色卡;(b)140色专业色卡;(c)孟塞尔样本

Fig. 1 Experimental sample (a) ColorChecker White Balance; (b) ColorChecker Digital 140; (c) Munsell sample

在理想条件下拍摄一块均匀的白板,则该白板上任意位置的相机响应值是相同的。实际中由于拍摄时相机角度、灯箱光源位置的偏差、镜头畸变等因素的影响,对均匀白板采集数据时,不同像素点的相机响应值会出现不同程度的差异。因此,通过采集均匀白板数据对样本进行均匀性校正^[17]是必要的。均匀性的校正可表示为

$$(p_{u,i})^{(j)} = (p'_{u,i})^{(j)} \times \frac{(\bar{V}_i)^{(j)}}{(V_{u,i})^{(j)}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中: $(p'_{u,i})^{(j)}$ 和 $(p_{u,i})^{(j)}$ 分别为校正前后第 j 个光源下第 i 个通道第 u 个像素的响应值; $(\bar{V}_i)^{(j)}$ 为均匀白板第 i 个通道像素的平均响应值; $(V_{u,i})^{(j)}$ 为均匀白板第 i 个通道第 u 个像素的响应值。对所有样本(包括训练样本和测试样本)在各光源下图像的像

素点按式(1)进行处理,即可得到均匀性校正的图像。

实验中使用 SpectraLight QC 标准光源对色灯箱提供稳定光源,该灯箱可提供 6 个不同的光源,分别为 D65 光源、A 光源、U30 光源、TL84 光源、CWF 光源和 HZ 光源。用德国 JETI 公司生产的 spectraval 1501 光谱辐射计测量光源的相对光谱功率分布,6 个光源的相对光谱功率分布如图 2 所示。

用美国 Edmund 公司生产的手动迷你单色仪测量数码相机的光谱灵敏度函数^[18],相机的光谱灵敏度函数如图 3 所示。

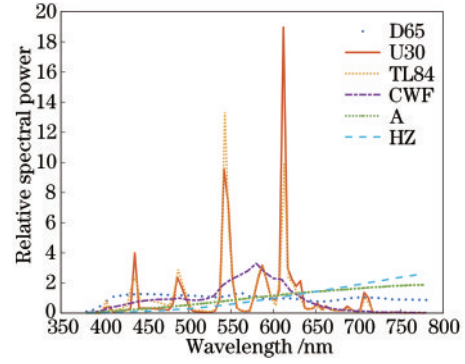


图 2 SpectraLight QC 提供的光源
Fig. 2 Light sources provided by SpectraLight QC

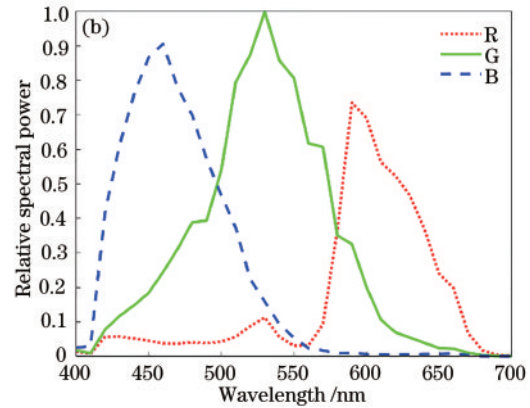
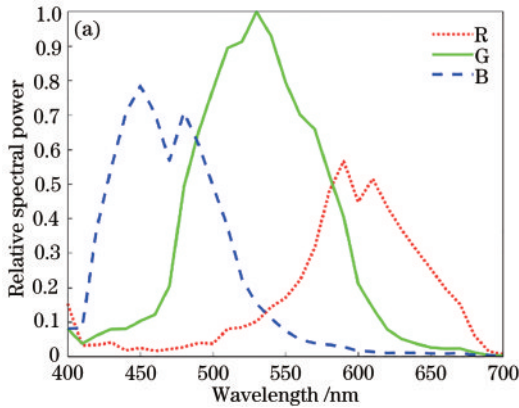


图 3 数码相机的光谱灵敏度函数。(a) Canon EOS 60D; (b) Nikon D610
Fig. 3 Spectral sensitivity function of the digital camera. (a) Canon EOS 60D; (b) Nikon D610

3 相机的基本成像原理

数码相机的理论成像过程可表示为

$$(p_i)^j = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (\omega_i)^j(\lambda) r(\lambda) d\lambda + (n_i)^j, i = 1, 2, 3, (2)$$

式中: $(p_i)^j$ 为第 j 个光源下成像系统第 i 个通道经过均匀性校正的原始响应值; $(\omega_i)^j$ 由光源的相对光谱功率分布 $E^{(j)}(\lambda)$ 和数码相机的光谱灵敏度函数 $s_i(\lambda)$ 组合得到; $r(\lambda)$ 为成像物体的光谱反射率; $(n_i)^j$ 为系统噪声。考虑到大部分物体的反射率在 400~700 nm 范围内是平滑变化的,且在实际测量中的采样间隔为 10 nm,可将式(2)转换为代数方程

$$\mathbf{p}^{(j)} = \mathbf{W}^{(j)} \mathbf{r} + \mathbf{n}^{(j)}, j = 1, \dots, J, (3)$$

式中: $\mathbf{p}^{(j)}$ 为第 j 个光源下任何一个像素彩色数码相机经均匀校正后的 RAW 数据响应列向量,由 $(p_1)^j$ (R 通道)、 $(p_2)^j$ (G 通道)、 $(p_3)^j$ (B 通道) 构成; \mathbf{r} 为该像素对应的物体反射率列向量,共 31 个分量; $\mathbf{W}^{(j)}$ 为基于相对光谱功率分布 $E^{(j)}(\lambda)$ 和相机灵敏度函数 $s_i(\lambda)$ ($i = 1, 2, 3$) 构成的映射矩阵,与像素位置无关; $\mathbf{n}^{(j)}$ 为系统噪声列向量,由 $(n_1)^j$ 、 $(n_2)^j$ 、 $(n_3)^j$ 构成。

需要说明的是,在数码相机的图像信号处理过程中,由 RAW 数据到最后的 JPG 数据中包含多个不同

阶段的数据,实验中使用的是去马赛克后的数据。实际中去马赛克后还需要经过白平衡,再转换到线性 sRGB 空间等。

4 基于多光源的维纳估计算法

传统维纳估计 (WE) 算法是基于单个光源下的式(3)进行的,为提高预测精度,联立多个光源下的基本方程,得到

$$\mathbf{p} = \mathbf{W}\mathbf{r} + \mathbf{n}, (4)$$

其中:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p^{(1)} \\ \vdots \\ p^{(J)} \end{pmatrix}; \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{W}^{(J)} \end{pmatrix}, \mathbf{n} = \begin{pmatrix} n^{(1)} \\ \vdots \\ n^{(J)} \end{pmatrix}. (5)$$

该模型的核心在于确定一个转换矩阵 \mathbf{M} , 将其作用到多光源下的数码相机 RAW 数据响应列向量 \mathbf{p} , 再重建物体的光谱反射率 \mathbf{r}_p , 可表示为

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{M}\mathbf{p}. (6)$$

式(5)中,数码相机的 RAW 数据响应列向量 \mathbf{p} 和映射矩阵 \mathbf{W} 是已知的,但噪声列向量 \mathbf{n} 是未知的,因此在给出转换矩阵 \mathbf{M} 前,需要确定噪声列向量 \mathbf{n} 。维纳估计算法大多基于仿真进行的,通常将 \mathbf{n} 视为零,这对实际拍摄过程中的噪声估计并不准确,因此,实验中的

噪声 \mathbf{n} 通过训练色卡数据进行计算,从而提高算法的预测精度。

假定训练色卡样本共包含 K 个色块,第 k 个色块的反射率向量为 \mathbf{r}_k ,该色块在 J 个光源下的 RAW 数据响应列向量为 \mathbf{p}_k ,对应的误差项为 \mathbf{n}_k ,则反射率训练矩阵 $\mathbf{R}_{\text{Train}}$ 、相机 RAW 数据训练矩阵 $\mathbf{P}_{\text{Train}}$ 和系统噪声矩阵 $\mathbf{N}_{\text{Train}}$ 可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{Train}} = (\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_k), \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{\text{Train}} = (\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k), \quad (8)$$

$$\mathbf{N}_{\text{Train}} = (\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_k). \quad (9)$$

需要说明的是,矩阵 $\mathbf{R}_{\text{Train}}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{Train}}$ 是已知,但 $\mathbf{N}_{\text{Train}}$ 是未知的,可通过式(5)和训练矩阵 $\mathbf{R}_{\text{Train}}$ 和 $\mathbf{P}_{\text{Train}}$ 获得,可表示为

$$\mathbf{N}_{\text{Train}} = (\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_k) = \mathbf{P}_{\text{Train}} - \mathbf{W}\mathbf{R}_{\text{Train}}, \quad (10)$$

令

$$\mathbf{G} = (g_1, \dots, g_m) = (\mathbf{R}_{\text{Train}})^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = (h_1, \dots, h_{3J}) = (\mathbf{N}_{\text{Train}})^T, \quad (12)$$

式中, m 为样本反射率的采样数,实验中取 $m = 31$ 。转换矩阵 \mathbf{M} 可定义为

$$\mathbf{M} = \mathbf{K}_r \mathbf{W}^T (\mathbf{W} \mathbf{K}_r \mathbf{W}^T + \mathbf{K}_n)^{-1}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{K}_r 为训练样本反射率的协方差矩阵; \mathbf{K}_n 为系统噪声的协方差矩阵。可分别表示为

$$\mathbf{K}_r = \begin{bmatrix} \text{cov}(g_1, g_1) & \dots & \text{cov}(g_1, g_m) \\ \vdots & & \vdots \\ \text{cov}(g_m, g_1) & \dots & \text{cov}(g_m, g_m) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{K}_n = \begin{bmatrix} \text{cov}(h_1, h_1) & \dots & \text{cov}(h_1, h_{3J}) \\ \vdots & & \vdots \\ \text{cov}(h_{3J}, h_1) & \dots & \text{cov}(h_{3J}, h_{3J}) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式(14)和式(15)中的协方差 $\text{cov}(x, y)$ 可表示为

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{Q-1} \sum_{l=1}^Q (x_l - \bar{x})(y_l - \bar{y}), \quad (16)$$

式中: Q 为 x, y 的数量; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为 x 和 y 的平均值。

5 分析与讨论

反射率的重建精度用均方根误差 (RMSE)^[19] 评价,可表示为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_t)^T (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_t)}, \quad (17)$$

式中: \mathbf{r}_p 为重建的光谱反射率; \mathbf{r}_t 为原始的光谱反射率。反射率的均方根误差只能反映光谱曲线形状上的差异,不能很好地反映人眼视觉上的感知差异。因此,用 CIELAB 色差公式^[20] 在 D65 光源条件下计算颜色的差异。此外,还使用了相对分析误差 (RPD)^[21] 对模型的预测性能进行评价,RPD 可表示为

$$X_{\text{RPD}} = X_{\text{SD}} / R_{\text{MSE}}, \quad (18)$$

式中, X_{SD} 为样本的标准差 (SD)。RPD 表征了一个模型

的预测能力,RPD 值越大,表明模型的预测性能越好。

实验使用的灯箱共有 6 种不同的光源以及多种不同的组合方式,不同光源组合对实验结果的影响不同,经多次实验筛选后将光源按表 1 进行组合。

表 1 光源的组合

Table 1 Combinations of light sources

No.	D65	U30	HZ	TL84	CWF	A
1	✓	×	×	×	×	×
2	✓	✓	×	×	×	×
3	✓	✓	✓	×	×	×
4	✓	✓	✓	✓	×	×
5	✓	✓	✓	✓	✓	×
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓

表 2 为 Canon 相机的光谱反射率重建结果。可以发现:当光源数量由 1 增加到 2 后,色差迅速减小;当光源数量达到 3 时,平均、中值、最大色差均达到最优;光源数量继续增加后色差逐渐变差,平均、中值、最大反射率均方根误差在 5 个光源下达到最优。

表 2 Canon 相机的反射率重建结果

Table 2 Reflectance reconstruction results for Canon camera

No.	Chromatic aberration			RMSE		
	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max
1	3.0960	2.4898	14.8674	0.0374	0.0334	0.1252
2	1.8643	1.6632	6.6934	0.0340	0.0293	0.1263
3	1.5866	1.3988	6.1191	0.0290	0.0234	0.0892
4	1.8381	1.6050	13.8084	0.0289	0.0226	0.0875
5	1.8400	1.5868	13.6595	0.0267	0.0220	0.0822
6	2.7866	2.4804	15.5774	0.0309	0.0262	0.0852

表 3 为 Nikon 相机的光谱反射率重建结果。可以发现:Nikon 相机与 Canon 相机的结果类似,随着光源数量的增加,CIELAB 色差和光谱反射率均方根误差逐渐减小;除了最大反射率均方根误差在 5 个光源下达到最优外,平均色差和中值色差等指标均在 3 个光源下达到最优。这也反映出反射率均方根误差与色差的变化趋势并不完全一致。结合表 2 和表 3 可以发现,本算法 (DWE 算法) 在 3 个光源下的表现最佳,因此,

表 3 Nikon 相机的反射率重建结果

Table 3 Reflectance reconstruction results for Nikon camera

No.	Chromatic aberration			RMSE		
	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max
1	3.3601	3.0749	13.1925	0.0362	0.0319	0.1387
2	1.8247	1.4737	9.3410	0.0328	0.0282	0.1274
3	1.4011	1.2474	4.8099	0.0241	0.0210	0.1106
4	1.8562	1.6505	6.4203	0.0314	0.0291	0.1111
5	1.6759	1.5061	5.5561	0.0282	0.0255	0.1064
6	1.5756	1.3573	5.3628	0.0277	0.0249	0.1099

后续实验均采用 3 个光源。

不同算法利用 Canon 相机和 Nikon 相机的重建结果如表 4 和表 5 所示。对比算法包括本算法、单光源下的 WE 算法、非线性回归算法 (Nonlin)^[1]、加权非线性

回归算法 (Wt-nonlin)^[5]、Liang 等^[6] 提出的算法 (ALWL) 以及 Zhang 等^[14] 提出的虚拟多光源算法 (ZHANG)。表 4 和表 5 中有 6 个评价指标, 括号中的数字为对应指标下每个算法的排名。

表 4 不同算法基于 Canon 相机的光谱反射率重建结果

Table 4 Spectral reflectance reconstruction results of different algorithms based on Canon cameras

Algorithm	Chromatic aberration			RMSE		
	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max
WE	3.10(6)	2.49(6)	14.87(6)	0.037(6)	0.033(6)	0.125(6)
Nonlin	1.99(5)	1.78(5)	6.19(3)	0.038(5)	0.035(5)	0.110(5)
Wt-nonlin	1.84(3)	1.71(2)	7.21(4)	0.031(3)	0.031(3)	0.082(1)
ALWL	1.88(4)	1.73(4)	12.70(5)	0.029(1)	0.026(2)	0.084(2)
ZHANG	1.79(2)	1.72(3)	5.78(1)	0.034(4)	0.032(4)	0.085(3)
DWE	1.59(1)	1.40(1)	6.12(2)	0.029(1)	0.023(1)	0.089(4)

表 5 不同算法基于 Nikon 相机的光谱反射率重建结果

Table 5 Spectral reflectance reconstruction results of different methods based on Nikon cameras

Algorithm	Chromatic aberration			RMSE		
	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max
WE	3.36(6)	3.07(6)	13.19(5)	0.036(5)	0.032(6)	0.139(6)
Nonlin	2.09(5)	1.73(5)	8.12(3)	0.036(5)	0.031(5)	0.113(5)
Wt-nonlin	1.85(4)	1.59(3)	8.82(4)	0.029(3)	0.028(3)	0.091(3)
ALWL	1.73(2)	1.47(2)	13.33(6)	0.026(2)	0.023(2)	0.073(1)
ZHANG	1.77(3)	1.61(4)	5.94(2)	0.032(4)	0.029(4)	0.085(2)
DWE	1.40(1)	1.25(1)	4.81(1)	0.024(1)	0.021(1)	0.111(4)

从表 4 和表 5 可以发现, 本算法的色差、均方根误差度量均值和中值 4 个指标均排名第 1, ZHANG、ALWL 和 Wt-nonlin 算法总体相差不大, 排名第 2, Nonlin 算法排名第 3, 最差的是 WE 算法。从最大色差指标来看: 采用 Canon 相机时, ZHANG 算法排名第 1, 本算法排名第 2; 采用 Nikon 相机时, 本算法排名第 1, ZHANG 算法排名第 2。从最大均方根误差指标来看: 采用 Canon 相机时, Wt-nonlin 算法排名第 1, 本算法排名第 4; 采用 Nikon 相机时, ALWL 算法排名第 1, 本算法排名第 4。

需要说明的是, 均方根误差大, 并不对应色差也大。图 4 为 DWE 算法预测的所有样本结果中最大均方根误差和最大色差对应的两对样本。从图 4(a) 可以发现, 实测和预测反射率的主要差别在 650 nm 以上的长波范围, 对应的均方根误差为 0.111, 尽管这个数值较大, 但由于颜色配色函数在较长波和较短波范围时几乎接近 0, 对颜色的感知影响不大, 因此色差仅为 1.72。图 4(b) 中实测和预测的反射率在 650 nm 以上的长波范围非常接近, 在 650 nm 以下的波长范围存在一定差异, 尽管均方

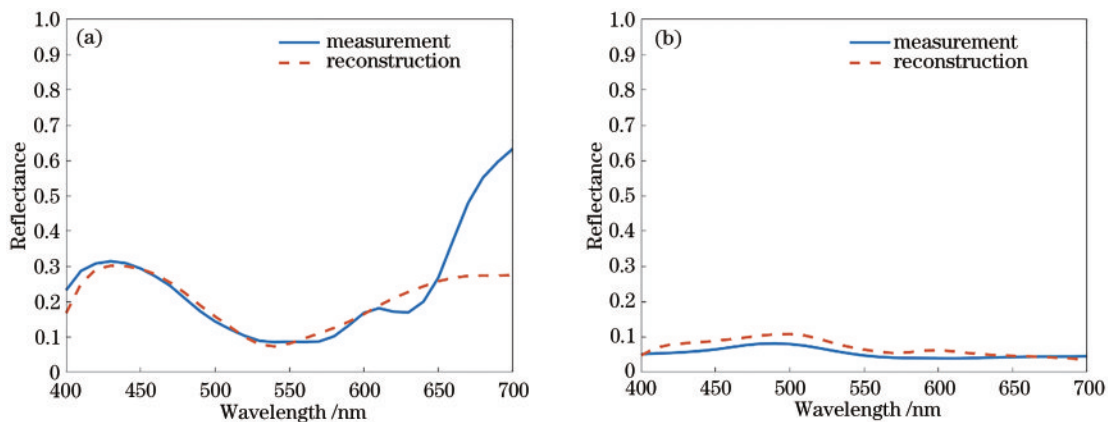


图 4 DWE 算法重建的最大 RMSE 和最大色差对应的样本。(a) 最大 RMSE; (b) 最大色差

Fig. 4 DWE algorithm reconstructs the sample corresponding to the maximum RMSE and maximum chromatic aberration.

(a) Maximum RMSE; (b) maximum color difference

根误差为 0.017, 但色差却相差 4.81。这都充分说明色差与均方根误差并不完全正相关。

对表 4 中每个算法的指标排名进行相加, 得到 WE、Nonlin、Wt-nonlin、ALW、ZHANG、DWE 算法的排名总和分别为 36、28、16、18、17、10。这表明对于 Canon 相机, 算法的表现从最好到最差依次为 DWE、Wt-nonlin、ZHANG、ALWL、Nonlin 和 WE 算法。类似地, 对表 5 中每个算法的指标排名进行相加, 得到 WE、Nonlin、Wt-nonlin、ALW、ZHANG、DWE 算法的排名总和分别为 34、28、20、15、19、9。这表明对于 Nikon 相机, 算法的表现从最好到最差依次为 DWE、ALWL、ZHANG、Wt-nonlin、Nonlin 和 WE 算法。综上所述, 本算法采用 Nikon 相机的表现更好, 而其他算法采用两种相机的表现变化不大。

将每种算法在表 4 和表 5 中的排名加在一起, WE、Nonlin、Wt-nonlin、ALW、ZHANG 和 DWE 算法的排名总和分别为 70、56、34、33、36 和 19。总体来看, 5 种算法可分成四类: 第一类为本算法, 排名总和为 19; 第二类算法有 Wt-nonlin、ALWL 和 ZHANG 算法, 排名总和分别为 34、33 和 36, 相差不大, 但与第一类算法的排名总和相差超过 10; 第三类算法为 Nonlin 算法, 与第二类算法的排名总和相差接近 10; 第四类算法为 WE, 表现最差。

表 6 为两台相机在不同算法下的相对分析误差。

表 6 不同算法的 RPD
Table 6 RPD of different algorithms

Algorithm	Canon			Nikon		
	Mean	Median	Min	Mean	Median	Min
WE	2.3957	2.1295	0.0392	2.5604	2.2019	0.0426
Nonlin	2.6444	2.138	0.0097	2.8382	2.2899	0.0097
Wt-nonlin	3.3276	2.1832	0.0263	3.6124	2.4314	0.0268
ALWL	3.5693	2.5322	0.0321	3.864	2.8086	0.0325
ZHANG	2.8741	2.1368	0.0166	3.0679	2.3753	0.0147
DWE	3.5968	2.7597	0.041	4.0249	2.9989	0.0410

相对分析误差越大, 表明模型的预测能力越强, 而最小相对分析误差可评价在最坏情况下哪个算法更占优势。可以发现, 对于不同的两台相机, 本算法的平均相对分析误差和中值相对分析误差与常见算法相比仍为最优。这验证了本算法具有良好的预测能力。

图 5 为 Canon 相机用不同反射率重建算法的最小相对分析误差对应的光谱反射率。可以发现, 不同算法的最小相对分析误差都对应同一种中性色的反射率。其中, Nonlin 算法的表现最差, 而本算法的最小相对分析误差优于其他算法, 这表明本算法在中性色的预测上也优于其他算法。Nikon 相机的最小相对分析误差对应的光谱反射率与 Canon 相机相同, 因此不再重复展示。

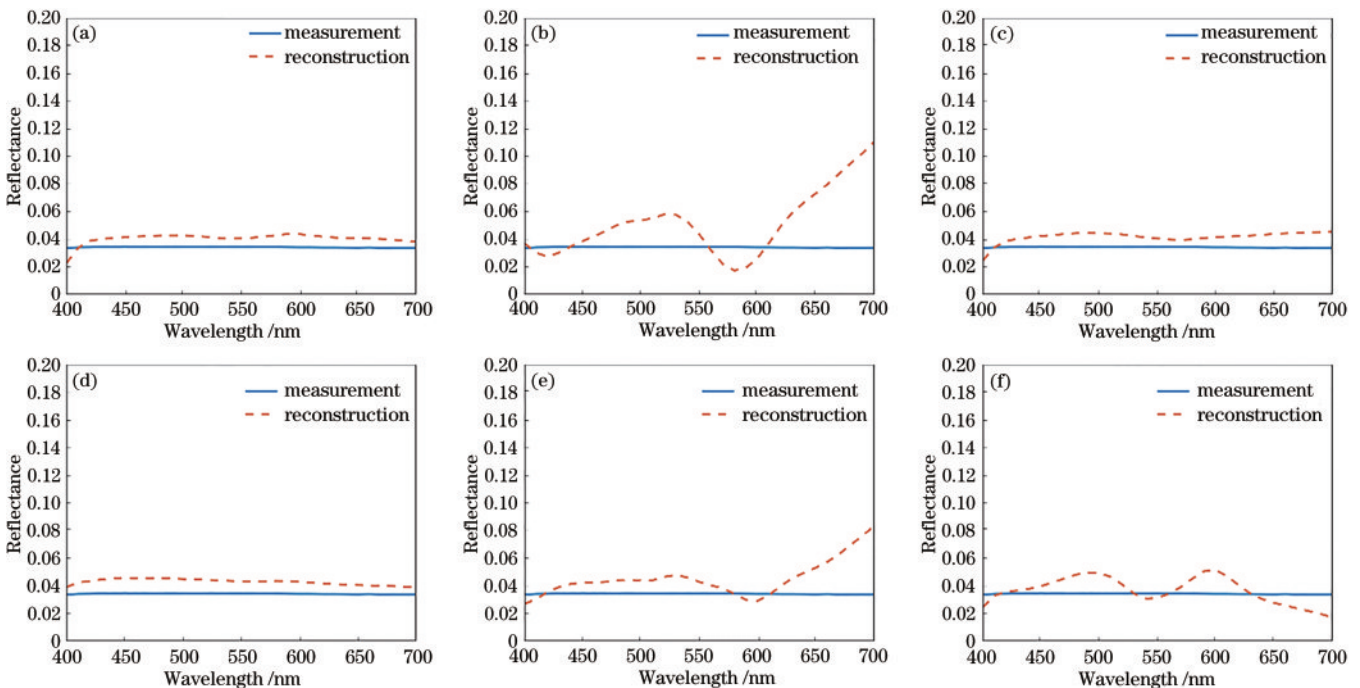


图 5 不同算法最小 RPD 对应的光谱反射率。(a) WE; (b) Nonlin; (c) Wt-nonlin; (d) ALWL; (e) ZHANG; (f) DWE

Fig. 5 Spectral reflectance corresponding to the minimum RPD of different algorithms. (a) WE; (b) Nonlin; (c) Wt-nonlin; (d) ALWL; (e) ZHANG; (f) DWE

6 结 论

提出了一种使用彩色数码相机在多光源下成像预

测物体反射率的算法。首先, 利用测量的数码相机光谱灵敏度函数以及各光源光谱, 建立每个光源下包括噪声项在内的相机 RAW 数据与物体反射率的基本方

程。然后,通过训练色卡准确估计系统噪声。最后,通过 DWE 算法预测物体反射率。用两台不同商用彩色数码相机对本算法进行测试,并与常用的单光源算法以及虚拟多光源算法进行对比。结果表明,当 DWE 算法使用的光源组合为 D65 光源、U30 光源和 HZ 光源时,两台相机的平均 CIELAB 色差分别为 1.59 和 1.40,平均反射率均方根误差为 0.029 和 0.024,平均相对分析误差为 3.5968 和 4.0249,明显优于其他对比算法。

参 考 文 献

- [1] 王勇, 徐海松. 基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1135-1138.
Wang Y, Xu H S. Colorimetric characterization for scanner based on polynomial regression models[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1135-1138.
- [2] Finlayson G D, Mackiewicz M, Hurlbert A. Color correction using root-polynomial regression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(5): 1460-1470.
- [3] Cao B, Liao N F, Cheng H B. Spectral reflectance reconstruction from RGB images based on weighting smaller color difference group[J]. Color Research & Application, 2017, 42(3): 327-332.
- [4] Stokes M, Anderson M, Chandrasekar S, et al. A standard default color space for the internet-sRGB[EB/OL]. [2021-05-03]. <https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>.
- [5] Amiri M M, Fairchild M D. A strategy toward spectral and colorimetric color reproduction using ordinary digital cameras[J]. Color Research & Application, 2018, 43(5): 675-684.
- [6] Liang J X, Xiao K D, Pointer M R, et al. Spectra estimation from raw camera responses based on adaptive local-weighted linear regression[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5165-5180.
- [7] Wang X, Jiang H, Zhang J J. Spectral reflectance reconstruction from camera responses by adaptively constructing weight matrix combining colorimetric and lightness similarities[C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC), July 27-29, 2020, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2020: 6072-6076.
- [8] Blanch-Perez-del-Notario C, Saeys W, Lambrechts A. Hyperspectral imaging for textile sorting in the visible-near infrared range[J]. Journal of Spectral Imaging, 2019, 8(1): a17.
- [9] Baek P, Blommaert J, Delalieux S, et al. High resolution vegetation mapping with a novel compact hyperspectral camera system[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture, July 31-August 4, 2016, St. Louis, Missouri, USA. [S.l.:s.n.], 2016.
- [10] Shrestha R, Hardeberg J Y. Multispectral imaging using LED illumination and an RGB camera[J]. Color and Imaging Conference, 2013, 2013(1): 8-13.
- [11] Shrestha R, Hardeberg J Y. Evaluation and comparison of multispectral imaging systems[J]. Color and Imaging Conference, 2014, 2014(2014): 107-112.
- [12] 褚金金, 崔桂华, 柳耀武, 等. 一种基于光谱可调 LED 光源和多光谱成像技术的物体表面颜色测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0833001.
Chu J J, Cui G H, Liu Y W, et al. A method for measuring surface color based on spectral tunable LED light source and multispectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0833001.
- [13] 王雪培, 赵虹霞, 李青会, 等. 多光谱成像技术分析彩色艺术品的相关基础研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1030003.
Wang X P, Zhao H X, Li Q H, et al. Relevant fundamental research of colored artworks by multispectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1030003.
- [14] Zhang X D, Wang Q, Li J C, et al. Estimating spectral reflectance from camera responses based on CIE XYZ tristimulus values under multi-illuminants[J]. Color Research & Application, 2017, 42(1): 68-77.
- [15] 李富豪, 李长军. 基于相机 rawRGB 通过加权多项式和维纳估计方法重建光谱反射率[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3281-3285.
Li F H, Li C J. Spectral reflectance reconstruction based on camera raw RGB using weighted third-order polynomial and Wiener estimation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10): 3281-3285.
- [16] 梁东, 张雷洪, 李贝. 基于最优化维纳估计算法的多光谱图像重构[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 164-170.
Liang D, Zhang L H, Li B. Multispectral image reconstruction based on optimized Wiener estimation[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 164-170.
- [17] 严旭, 刘小波, 崔桂华, 等. 数字相机传感器光谱灵敏度的测量[J]. 光学技术, 2017, 43(2): 148-152, 157.
Yan X, Liu X B, Cui G H, et al. Measurement of sensor spectral sensitivity of digital camera[J]. Optical Technique, 2017, 43(2): 148-152, 157.
- [18] 余晖, 吕玮阁, 邱珏沁, 等. 商用数码相机的光谱灵敏度测量及评价[J]. 光学仪器, 2017, 39(5): 15-21.
She H, Lü W G, Qiu J Q, et al. Spectral sensitivity measurement and evaluation of commercial digital cameras[J]. Optical Instruments, 2017, 39(5): 15-21.
- [19] 张天羽, 刘志伟, 张磊, 等. 近红外激光甲烷同位素丰度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1030001.
Zhang T Y, Liu Z W, Zhang L, et al. Near-infrared laser sensor for detection of methane isotope abundance [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1030001.
- [20] 潘洁, 黄敏, 李钰, 等. 三维打印球体的色差计算方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2333001.
Pan J, Huang M, Li Y, et al. Color difference calculation method for three-dimensional printed spheres [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2333001.
- [21] 徐凯源, 李大海, 刘昂, 等. 基于小波变换的平板波前死条纹噪声滤除方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904008.
Xu K Y, Li D H, Liu A, et al. Filtering method of fixed pattern noise in window wavefront based on wavelet transform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904008.