

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

李富豪, 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 基于相机 RGB 预测物体光谱反射率的研究一直备受研究者的关注。传统方法都是通过单一光源下的信息进行光谱反射率恢复。最近, Zhang 等在 Color Research & Application 报道了一种基于单光源相机 RGB 信息预测物体光谱反射率的两步方法。首先基于单个光源下的相机响应 RGB 值, 挑选出一定量的训练数据, 采用多项式模型和伪逆的方法预测出不同光源下的 CIE XYZ 值; 然后根据预测的多光源下的 CIE XYZ 值及整体训练数据预估光谱反射率, 再通过预估的光谱反射率挑选一定量训练样本, 通过伪逆方法预测出物体光谱反射率。尽管仍然基于一个光源下的相机响应 RGB, 但通过映射到多光源下的色度值 XYZ, 提高输入信息的维度来优化光谱反射率的重建精度。受 Zhang 等工作的启发, 提出新的基于单一光源下相机的 raw RGB 响应信息, 通过三阶多项式模型扩展的加权最小二乘方法对多光源下的 CIE XYZ 值进行预测, 然后根据预测出的多光源下的 CIE XYZ 值再通过维纳估计的方法进行光谱反射率重建, 通过这样的两步方法实现从相机响应 RGB 到光谱反射率的重构。该新方法, 采用全体训练数据, 应用十分方便, 避免了 Zhang 等的方法需要挑选一定量的局部训练样本的问题。同时 Zhang 等的方法挑选出的局部训练样本同等重要, 而该方法在第 1 步中, 根据训练样本与给定的测试样本的接近程度, 赋予训练样本不同的权重, 以提高预测精度。通过采用 140 色色卡作为训练样本, 24 色色卡和自制的 44 色印刷品样本进行测试, 以判断预测和实测反射率接近程度的均方根误差(RMSE)和人感知色差为评价标准进行比较, 结果表明, 该方法明显优于 Zhang 等的方法, 而且预测精度随着光源数量的增加而提高, 当光源个数达到 6 时, 表现最佳。

关键词 多光源; 光谱反射率重建; 加权; 维纳估计

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)10-3281-05

引言

随着数字图像技术的迅猛发展, 如何精确的实现颜色复制, 是颜色科学领域的重要课题。为了能精确得到色度信息, 可以通过获取物体表面光谱反射率方法来判断物体的真实颜色^[1-2]。传统获取物体光谱反射率的方法是利用分光光度计准确地直接获取物体的光谱反射率, 但是难以对非平面的物体表面进行测量, 限制了其在复杂物体表面的应用。数码相机可以对物体表面进行非接触式的拍摄, 并且可以记录 RGB 信息^[3]。Cao 等^[4]设计了一种基于 RGB 图像的局部线性近似的估计方法。Amiri 和 Fairchild^[5]提出了加权非线性方法, 通过加权提高了重构精度。Liang 等^[6]通过对训练数

据进行加权最小二乘来预测光谱反射率。但此类方法都是通过单一光源下的 RGB 信息进行光谱反射率重建。Zhang 等^[7]提出基于单一光源下相机 RGB 对多光源下的 CIE XYZ 值进行预测, 再根据多光源下的 CIE XYZ 值估计光谱反射率。

Zhang 等的方法(以下简称 Zhang 方法)相比单光源下的光谱重构效果有所提高, 但两次自适应选取局部训练样本, 计算量较大, 在应用上不十分方便, 另外对选取的局部训练样本视为同等重要。受 Zhang 方法启发, 本工作沿用多光源的思想, 在单光源下的相机响应值预测不同光源下的 CIE XYZ 值这一过程进行加权来避免对训练样本的选取, 并采用维纳估计来重建光谱反射率。通过实测数据比较表明本方法的光谱反射率预测精度明显好于 Zhang 方法。

收稿日期: 2020-10-12, 修订日期: 2021-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575090, 61775169), 辽宁省科技厅自然科学基金项目(2019-ZD-0267), 辽宁省教育厅科研项目(2020LNCJ01)资助

作者简介: 李富豪, 1996 年生, 辽宁科技大学计算机与软件工程学院硕士研究生 e-mail: 1783951755@qq.com

* 通讯作者 e-mail: cjliustl@sina.com

1 相机成像原理

假定相机获取物体的响应值 RGB 构成的列向量为 d , 则相机的成像系统模型^[8]可以表示为

$$d = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} l(\lambda) s(\lambda) o(\lambda) r(\lambda) d\lambda + e \quad (1)$$

式(1)中, $l(\lambda)$ 为照明光源的光谱功率分布, $r(\lambda)$ 为所成像物体的光谱反射率, $o(\lambda)$ 为系统滤光片的光谱透过率, $s(\lambda)$ 为设备的光谱敏感函数, e 为系统所产生的噪声。当不考虑噪声时, 式(1)的代数离散表达式可以简写成如式(2)矩阵向量形式

$$d = Mr \quad (2)$$

式(2)中, M 为相机整体系统的光谱灵敏度矩阵, 列向量 r 为物体反射率在可见光范围内均匀离散取点得到, 通常 400~700 nm, 10 nm 间隔取点, 共 31 个分量。本文所述的相机响应值 RGB, 均为 rawRGB 数据。以下不再特别说明。

2 新方法介绍

2.1 基于 RGB 数据, 预测多光源下的 CIE XYZ 值

首先将相机响应向量 d 通过 3 阶多项式模型扩展为向量 v , 其表达式为

$$v = (1 \ R \ G \ B \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2 \ R^2G \\ R^2B \ G^2R \ G^2B \ B^2R \ B^2G \ RGB \ R^3 \ G^3 \ B^3)^T \quad (3)$$

这里的上标‘T’为向量或矩阵的转置。然后确定转换矩阵 Q 使得

$$u = Qv \quad (4)$$

其中, u 表示 m 个光源下的 $3m$ 个分量的三刺激值列向量。转换矩阵 Q 可由训练数据确定。假定训练样本个数为 n , 并令 $u^{(j)}$ 表示第 j 个训练样本在 m 个光源下的 CIE XYZ 构成的列向量; $v^{(j)}$ 表示第 j 个训练样本相机响应向量 $d^{(j)}$ 按三阶多项式拓展的列向量; $r^{(j)}$ 表示第 j 个训练样本的光谱反射率。定义如式(5)和式(6)矩阵

$$U = (u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(n)}) \quad (5)$$

$$V = (v^{(1)}, v^{(2)}, \dots, v^{(n)}) \quad (6)$$

所以由式(4)一式(6)可以得到

$$U = QV \quad (7)$$

式(7)中, $3m \times n$ 的矩阵 U , $20 \times n$ 矩阵 V 均已知, 因此可以通过式(7)采用伪逆或最小二乘方法确定出转换矩阵 Q , 其表达式为

$$Q = UV^+ \quad (8)$$

这里上标‘+’表示广义逆^[9]。按上述方法确定的转换矩阵, 假定训练数据同等重要。为根据给定的待测样本的相机响应向量 d 赋予训练数据不同的权重, 首先需要预估出该样本对应的 CIE D65 光源下的三刺激值。为此需要按上述方式, 仅在 CIE D65 一个光源下训练出转换矩阵, 记为 Q_{D65} 。因此对给定的待测样本的相机响应向量 d , 便可计算出其扩

展的向量 v , 待测样本的预估三刺激值向量为

$$u_{D65} = Q_{D65} v \quad (9)$$

对于每个(第 j 个)训练样本, 其在 CIE D65 光源下三刺激值已知, 记为 $u_{D65}^{(j)}$, 因此可以计算 u_{D65} 与 $u_{D65}^{(j)}$ 之间的 CIELAB 色差(记为 $cd(u_{D65}, u_{D65}^{(j)})$), 即

$$e^{(j)} = cd(u_{D65}, u_{D65}^{(j)}), j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

色差 $e^{(j)}$ 体现对于给定的待测样本与第 j 个训练样本的接近程度, 越接近的训练样本, 权重应该越大, 本工作采用如式(11)计算权重

$$w^{(j)} = \frac{1}{e^{(j)} + \sigma}, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

其中 σ 取值 0.01, 代表补偿系数, 以防色差为零时计算权重为无穷大。通过 $w^{(j)}$ 建立加权矩阵

$$W = \begin{bmatrix} w^{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w^{(2)} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w^{(n)} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (12)$$

有了加权矩阵 W , 式(7)可以改写为

$$UW = QVW \quad (13)$$

因此通过伪逆法便可获得转换矩阵 Q 为

$$Q = UW(VW)^+ \quad (14)$$

需要说明的是, 权重矩阵 W [式(12)], 和转换矩阵 Q [式(14)] 是随着待测样本的改变而改变, 而转换矩阵 Q_{D65} [式(9)] 适合所有样本。

还需要说明的是 Zhang 方法在 RGB 空间计算与每个训练样本的欧氏距离, 挑选 N 个对应最小距离的训练数据构成矩阵 U 和 V , 利用式(8)计算出转换矩阵 Q 。 N 究竟选多大需要探索, 本工作是使用所有训练数据, 避免了挑选训练数据的问题, 根据测试样本赋予不同训练数据不同的权重, 确定转换矩阵 Q , 以提高预测精度。

2.2 基于预测的 m 个光源下的三刺激值向量 u , 预测光谱反射率

基于预测的 u , 采用维纳估计^[10-11] 预测样本的光谱反射率 r 。首先注意到, 三刺激值 u 与物体反射率 r 还有多光源下的加权表 A ^[12-14] 满足关系式

$$u = Ar \quad (15)$$

维纳估计基于方程(15)和训练数据确定转换矩阵 G , 预测出给定待测样本的反射率 \tilde{r} , 即

$$\tilde{r} = Gu \quad (16)$$

令 S 为由 n 个训练样本的反射率 $(r^{(j)})$ 构成的矩阵

$$S = (r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(n)}) \quad (17)$$

转换矩阵 G 的表达式为

$$G = [K_s A^T][AK_s A^T]^{-1} \quad (18)$$

其中 K_s 为光谱反射率 S 的自相关矩阵, 由式(19)和式(20)给出

$$K_s = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r^{(j)} - \bar{r})(r^{(j)} - \bar{r})^T \quad (19)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r^{(j)} \quad (20)$$

说明, 上述的转换矩阵 G 适合所有测试样本, 因此 G 仅

需要计算一次。Zhang 方法采用自适应伪逆法计算转换矩阵 G ，也就是先通过伪逆法计算出一个整体转换矩阵 G_r ，通过 G_r 用预测出 m 个光源下的三刺激值向量 u ，便得到反射率的预估值 r_p ，根据 r_p 计算出与每个训练样本在反射率空间的欧氏距离挑选出一定数量训练数据，当然选取多少训练数据需要探索，应用上也不方便。本方法利用全体训练数据，避免了这一过程。

3 实验部分

(1) 实验样本：训练样本选用 X-Rite 公司的标准 140 色色卡。测试样本选用 X-Rite 公司的标准 24 色色卡和自制的覆盖色域较广的 44 个印刷色块。

(2) 测量仪器：采用尼康 D610 数码相机和 KONICAMINOLTA 生产的光分光光度计 (CM-2600d)。

(3) 测量条件：采用美国 X-Rite 公司生产的 Spectra Light QC 标准光源箱提供稳定的 D65 光源。将摄像机固定在三脚架上，拍摄距离为 70 cm，照明与被摄物角度为 45° ，数码相机镜头与测量目标垂直，其余参数固定，闪光灯、亮

度优化及量光校正均为禁用。手动设置相机的焦距以捕获清晰的图像，相机曝光时间为 $1/60$ s，光圈大小为 f4.5，感光度 ISO 为 320，白平衡采用人工输入色温 6 500 K。实验光源为 CIE 光源 D65, A, F11, D50, F2, F7。通过测量的光谱反射率及 CIE1931 年配色函数计算出在各光源下的三刺激值。

(4) 评价标准：为比较本方法与 Zhang 方法，用文献[7]中使用的均方根误差 (RMSE) 和 D50 光源下 CIEDE2000 (ΔE_{00}) 色差公式评价光谱反射率的重构精度。

4 结果与讨论

在报道的 Zhang 方法中训练样本的数量为 1296 个打印色块，工作量大，不方便应用。我们采用标准 140 色卡作为训练样本进行实验比较。

图 1(a) 和 (b) 分别给出了按平均 RMSE 和平均色差 ΔE_{00} 度量，利用 24 色色卡的测试数据进行比较的结果。由图 1(a) 可以看出，随着光源个数 (横轴) 由 1 个增加到 6 个，两种方法的光谱反射率的重构精度 (纵轴) 都在提高。光源个数为 1 时，Zhang 方法要略优于本方法，但随着光源个数的

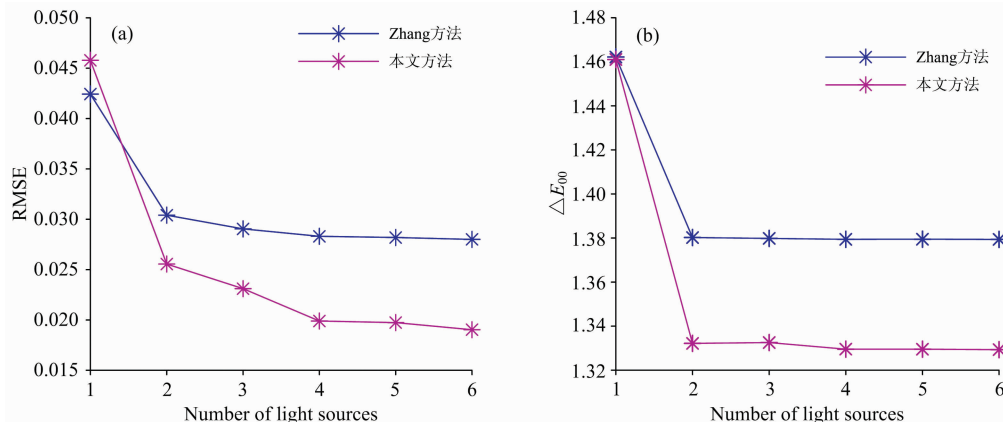


图 1 利用 24 色色卡作为测试样本时本方法和 Zhang 方法的结果对比

Fig. 1 Performance comparison of RMSE and ΔE_{00} between Zhang's method and our method using Color Checker Classic Chart

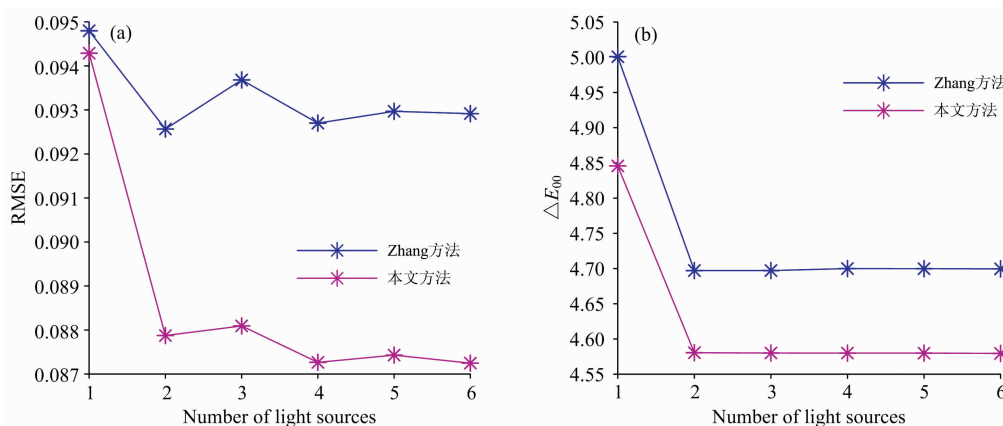


图 2 印刷样品作为测试样本时本方法和 Zhang 方法的结果对比

Fig. 2 Performance comparison of average RMSE error and colour difference ΔE_{00} between the method proposed in this paper and Zhang's method using 44 printed samples

增加本方法的 RMSE 要明显优于 Zhang 方法,并且在光源个数达到 6 时结果最好。同样,由图 1(b)可以看出,不论本方法还是 Zhang 方法两个光源明显好于一个光源的色差预测精度,光源多于 2 个的预测色差精度与两个光源下的精度基本一致。比较而言,一个光源下,两种方法一样好,当 2 个或更多光源时,本方法要好于 Zhang 方法。

在图 2 中,给出印刷品为测试样本的平均 RMSE 和平均色差 ΔE_{00} 比较结果。从图 2(a)和图 2(b)可以看出 Zhang 方法的曲线都高于本方法的曲线,不管用几个光源,本方法都优于 Zhang 方法。对于 Zhang 方法,采用两个光源达到最佳,而本方法,尽管多于 2 个光源时,预测的色差已经不能

再提高,但采用 6 个光源时 RMSE 度量为最好。

表 1 为 6 个光源下,采用 24 色色卡和印刷样本两种测试数据,分别按平均、最大和中值均方根误差和色差的比较结果。对应用加黑表达的数字的方法占优。当采用色差度量时,采用色卡和印刷测试数据,本方法有两种指标占优,而 Zhang 方法有一种指标占优。若两种度量共有 6 个指标,不论采用色卡还是印刷测试数据,本方法都有 5 种指标占优,而 Zhang 方法有 1 种指标占优。因此本方法明显优于 Zhang 方法。24 色色卡的精度要高于印刷品的精度,这主要是因为 24 色色卡与 140 色训练色卡有相同材质,而印刷样品与训练样本材质不同。

表 1 光源个数为 6 个时,采用 24 色色卡和 44 个印刷样本经测试,两种方法重构精度的比较结果

Table 1 Performance of the proposed and Zhang methods tested using Color Checker Classic Chart and self-made 44 printed samples under 6 illuminants

| 测试样本 | 方法 | RMSE | | | ΔE_{00} | | |
|--------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | Ave | Max | Median | Ave | Max | Median |
| 24 色色卡 | Zhang 方法 | 0.028 0 | 0.064 1 | 0.024 6 | 1.379 4 | 3.030 9 | 1.226 7 |
| | 本方法 | 0.019 0 | 0.041 4 | 0.017 4 | 1.329 3 | 2.594 1 | 1.304 5 |
| 印刷样品 | Zhang 方法 | 0.092 9 | 0.421 8 | 0.083 0 | 4.699 6 | 11.610 3 | 4.445 3 |
| | 本方法 | 0.087 2 | 0.326 7 | 0.081 4 | 4.579 6 | 11.830 9 | 4.375 0 |

5 结 论

受 Zhang 方法的启发,提出了新的 2 步方法,基于相机 raw RGB 数据重建物体反射率。第 1 步,采用加权三次多项回归算法,映射 raw RGB 数据 d (通过扩展向量 v)到多光源下的三刺激值向量 u ;第 2 步是利用维纳估计预测物体光谱

反射率。本方法的 2 步过程中,采用全体训练数据,避免了 Zhang 方法中需要从训练数据中挑选一定数量的样本,在应用上十分方便。通过 140 色卡为训练样本,24 色色卡和 44 色印刷样本的实际数据进行测试表明本方法要明显优于 Zhang 的方法。同时比较结果表明本方法在 6 个光源下达到最佳。

References

- [1] SI Zhan-jun, LI Yu, GU Chong(司占军,李煜,顾翀). Packaging Engineering(包装工程), 2013, (5): 98.
- [2] YANG Ping, LIAO Ning-fang, Abed F M, et al(杨萍,廖宁放, Abed F M, 等). Optical Technique(光学技术), 2008, 34(6): 870, 876.
- [3] CHEN Yi-yi, XU Hai-song, ZHANG Xian-dou, et al(陈奕艺,徐海松,张显斗,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2009, (5): 1416.
- [4] Cao B, Liao N, Cheng H. Color Research & Application, 2016, 42(3), 327.
- [5] Amiri M M, Fairchild M D. Color Research & Application, 2018, 43: 675.
- [6] Liang J, Xiao K, Pointer M R, et al. Optics Express, 2019, 27(4): 5165.
- [7] Zhang X, Wang Q, et al. Color Research & Application, 2017, 42: 68.
- [8] LIANG Jin-xing, WAN Xiao-xia(梁金星,万晓霞). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, (9): 363.
- [9] YIN Zhao, JIA Shang-hui(尹钊,贾尚晖). Mathematics in Practice and Theory(数学的实践与认识), 2009, 39(9): 239.
- [10] LIANG Dong, ZHANG Lei-hong, LI Bei(梁东,张雷洪,李贝). Packaging Engineering(包装工程), 2016, 37(11): 164.
- [11] WANG Li-mei, KONG Ling-jun(王丽梅,孔玲君). Packaging Engineering(包装工程), 2015, (19): 125.
- [12] Li C J, Luo M R, Wang G. Proc. of SPIE, 2006, 6033: 198.
- [13] Li C J, Luo M R, Rigg B. Color Research & Application, 2010, 29(2): 91.
- [14] Li C J, Luo M R, Melgosa M, et al. Color Research & Application, 2016, 41(2): 125.

Spectral Reflectance Reconstruction Based on Camera Raw RGB Using Weighted Third-Order Polynomial and Wiener Estimation

LI Fu-hao, LI Chang-jun*

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

Abstract The research on predicting the spectral reflectance information of objects based on the camera RGB value has always attracted researchers' attention. The traditional method is to restore spectral reflectance through the information under a single light source. Recently, Zhang et al. [Color Research & Application, 2017, 42: 68] proposed a two-step method for predicting reflectance based on camera RGB information under a single light source. Firstly, the camera response RGB value under a single light source is transformed to CIE XYZ values under different light sources through a polynomial model with local training samples using a pseudo-inverse method. Then the reflectance can be estimated based on the predicted CIE XYZ values under multiple light sources using local training samples and pseudo-inverse method. Though the method still uses camera RGB information under a single light source, obtaining CIE XYZ values under multiple illuminants improves the reconstruction accuracy of the spectral reflectance. Motivated by Zhang et al., a new two-step method is proposed for reconstructing spectral reflectance based on the raw camera RGB. Firstly, camera raw RGB is transformed to CIE tristimulus values under multi-illuminants via polynomial expansion of order 3 and weighted least square approach. Reflectance of the object is predicted based on the transformed CIE tristimulus values under multi-illuminants using the Wiener estimation. The proposed method uses the full set of training samples in order to avoid selecting a certain number of training samples that existed with the method of Zhang et al. Hence the proposed method is easy to be applied. Furthermore, in the method of Zhang et al., selected training samples are considered as equalimportant, while the proposed method assigns different weights to each of the training samples depending on the closeness to the given test sample in the first step so that prediction accuracy is increased. Comparison between the proposed method and the method given by Zhang et al. is considered. Both methods are trained using the X-Rite Color Checker Standard Digital (SG) chart and tested using the Color Checker Classic Chart and self-made 44 printed samples. Comparison results have shown that the proposed method outperforms the method given by Zhang et al. in terms of root mean square error (RMSE) and CIEDE2000 colour difference. Furthermore, the prediction accuracy of the proposed method is improved with the increase of the number of illuminants used, and the proposed method performs the best with 6 illuminants.

Keywords Multi-illuminants; Spectral reflectance reconstruction; Weighting coefficients; Wiener estimation

(Received Oct. 12, 2020; accepted Feb. 3, 2021)

* Corresponding author