

# 基于遗传算法选择多光源下的光谱反射率重构研究

孔玲君<sup>1</sup>, 曾 茜<sup>2\*</sup>, 张雷洪<sup>2</sup>, 占文杰<sup>2</sup>, 曾文超<sup>3</sup>

1. 上海出版印刷高等专科学校印刷包装工程系, 上海 200093

2. 上海理工大学出版印刷与印术设计学院, 上海 200093

3. 南京城建环境投资有限公司, 江苏 南京 210000

**摘要** 为解决基于 RGB 三通道信息值重构光谱反射率精度不理想的问题, 提出了一种优化的基于 RGB 三通道信息的光谱反射率重构算法。首先编码产生随机选择多个光源的个体, RGB 三通道值通过多项式回归算法预测多个光源下的三刺激值, 并采用伪逆法进行多光源下的光谱反射率重构, 然后将样本的重构精度作为个体的适应度评估值, 以优胜劣汰, 适者生存为原则对个体进行选择、交叉、变异操作, 最后得到适用于颜色样本光谱重构的多个光源与基于这些光源重构得到的光谱反射率。实验选用 Munsell 颜色集作为训练样本集, RC24 色卡、SG140 色卡作为检测样本集, 8 个标准光源和 82 个发光二极管光源作为实验光源, 采用该算法从 90 个光源中选取最优的光源组合并重构得到样本的光谱数据, 并与 Zhang 提出的基于穷举法选择的多光源下的光谱重构方法和 A 光源下的伪逆法进行了重构精度对比。实验结果显示该研究提出的方法随着光源个数的增加, 光谱反射率重构精度提高, 特别是光源个数增加到 3 时, 光谱重构精度提高的幅度最大。在三种重构方法中, 该方法重构 RC24 的平均色差和平均光谱均方根误差分别为 0.332 4 和 0.002 9, 而 Zhang 的方法与伪逆法的平均色差分别为 0.429 3 和 3.266, 平均光谱均方根误差分别为 0.029 7 和 0.004 8; 该文方法重构 SG140 的平均色差和平均光谱均方根误差分别为 0.486 2 和 0.007 3, 而 Zhang 的方法与伪逆法的平均色差分别为 0.544 8 和 3.821 9, 平均光谱均方根误差分别为 0.035 6 和 0.013 3。结果表明基于多光源下的光谱反射率重构精度明显优于基于单个光源下的重构精度, 而基于遗传算法的多光源选择方法又优于穷举法, 它能够根据颜色样本自动寻找到最优光源组合, 从而基于最优多光源下的三刺激值重构样本的光谱反射率, 提高了光谱反射率重构的精度。

**关键词** 光谱反射率重构; 遗传算法; 多光源; 三刺激值; 最优组合

**中图分类号:** O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1162-07

## 引言

数码相机在日常生活中被广泛用于获取数字图像, 因为它们便携, 易于使用且经济实惠<sup>[1]</sup>。但是在光谱成像技术中, 用低维度的数字响应信号来重建高维度光谱反射率是一个病态的数学求解过程, 分析当前基于光学带通滤光片的光谱成像系统的工作原理可知, 其通过配合滤光片来增加数字图像采集的通道数, 为光谱重建提供更高维度的输入信息, 从而提高光谱重建的精度<sup>[2]</sup>。受此启发, 诸多学者开展利用彩色数码相机响应值扩展的方法实现物体表面光谱反射率重

建的相关研究。Dupont 等较早提出利用多项式扩展方法, 对三刺激值信号进行光谱重建<sup>[3-4]</sup>, HARIFI 等在 Dupont 的基础上做了改进, 他提出一个光源下的 CIE XYZ 值通过加权线性回归模型重构另一个光源下的 CIE XYZ 值, 然后基于主成分分析法对两组三刺激值信号进行光谱重建, 重建精度得到了提高<sup>[5-6]</sup>。Zhang 等提出对多个光源下的三刺激值信号进行光谱重建, 重建结果获得了理想的效果<sup>[7]</sup>。

因此基于多个光源下的三刺激值重构光谱反射率确实能够有效地提高重构精度, 但是增加光源个数的同时也造成数据量的增加, 如何选择最优光源组合是一个需要解决的问题。Harifi 等选择光源 D65 与 CIEA 光源组合, 而 Zhang 等

收稿日期: 2018-07-13, 修订日期: 2018-12-16

基金项目: 国家新闻出版署重点实验室“柔版印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题(ZBK T201706), 上海市自然科学基金项目(14ZR1428400, 18ZR1425800), 国家自然科学基金面上项目(61875125)资助

作者简介: 孔玲君, 1972 年生, 上海出版印刷高等专科学校教授 e-mail: 908641376@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail: 1015198189@qq.com

利用穷举法发现光源 CIEA, D65 与 D90 组合时重构精度最好。实际上不同的重构样本选择的光源应是不同的,然而穷举法效率较低,无法满足这一要求。因此本文提出基于遗传算法选择光源,能够根据不同样本的特征迅速而准确地找到不同数量的光源的最优组合,从而提高光谱反射率重构精度。

## 1 基于遗传算法选择多光源的光谱反射率重构方法

基于遗传算法选择多光源下的光谱反射率重构方法主要步骤包括:

步骤 1: 随机个体的产生。首先将  $n$  个光源编码为 1 到  $n$ , 每个个体为一条含有  $n$  个基因组成的染色体, 被选择的光源的基因值为 1, 未被选择的光源的基因值为 0, 假设从  $n$  个光源中选择  $e$  个光源, 即每个个体代表  $e$  个光源, 写成向量形式如式(1)所示,

$$c = (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots) \quad (1)$$

步骤 2: 形成初始种群。初始种群由所有个体组成<sup>[11]</sup>, 因此初始种群可表示为

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,n} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \dots & c_{N,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中,  $N$  表示种群的规模。

步骤 3: 将基于多光源下的三刺激值的光谱反射率重构精度作为个体的适应度值。适应度值小的个体被淘汰的几率较大, 反之亦然; 基于多光源下的三刺激值的光谱反射率重构方法: 首先假设相机是理想的线性光电转换系统, 在实际照明环境下一个色块的 RGB 响应值可以由式(3)得到

$$d_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) l(\lambda) \tau(\lambda) r(\lambda) d(\lambda) \quad (3)$$

其中,  $d_k$  表示三个通道的响应值,  $k$  的范围为 1~3,  $l(\lambda)$  表示相机 CCD 的灵敏度,  $S(\lambda)$  表示照明光源的光谱功率分布,  $\tau(\lambda)$  表示相机滤色片的透过率,  $r(\lambda)$  表示物体表面的光谱反射率。已知光源和 CIE 观察者匹配函数的样本可以通过式(4)计算该光源下的三刺激值

$$T_j^i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{ij} o_{\lambda} r_{\lambda} d_{\lambda} \quad (j = 1, \dots, e) \quad (4)$$

其中,  $T_j^i$  表示个体中第  $j$  个光源下的 X, Y 和 Z 值,  $j$  的范围为个体的光源数量 1~ $e$ 。  $S_{ij}$  表示第  $j$  个光源的光谱相对分布能量,  $o_{\lambda}$  表示 CIE 观察者匹配函数  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  的值,  $r_{\lambda}$  表示光谱反射率。假设有  $m$  个训练样本, 样本通过式(1)和式(2)可分别得到相机的 RGB 三通道信息值  $D$  与  $e$  个光源下的 CIEXYZ 值, 采用多项式回归模型预测检测样本在多个光源下的 CIEXYZ 值<sup>[8]</sup>。如式(5)所示

$$T = MD \quad (5)$$

其中,  $T$  是一个  $m \times 3e$  的矩阵,  $D$  是一个  $m \times h$  的矩阵,  $h$  为多项式模型的扩展项,  $M$  是一个  $h \times 3e$  的矩阵, 表示多项式模型的系数。则光谱反射率重建可如式(6)所示

$$\hat{r} = QT_{\text{test}} \quad (6)$$

其中,  $T_{\text{test}}$  表示测试样本在多个光源下的 CIEXYZ 值,  $Q$  是光谱反射率与多光源下的三刺激值的变换矩阵, 当前研究采用基于训练方式的伪逆光谱重建方法<sup>[9]</sup>, 并采用基于欧氏距离法选择训练样本, 光谱反射率重建如式(7)所示

$$\hat{r}^c = r_{\text{train}} [t_{\text{train}}]^{-1} T_{\text{test}} \quad (7)$$

式(8)中,  $r_{\text{train}}$ ,  $t_{\text{train}}^c$  分别表示训练样本的光谱反射率和在多个光源下训练样本的 CIE XYZ 值。

因此选择多光源的问题可以优化成如下的优化问题

$$g = \operatorname{argmax}\{\Phi(r, \hat{r}^c)\} \quad (8)$$

其中  $\Phi(r, \hat{r}^c)$  表示测试样本的光谱反射率重构值与实际测量值之间的误差。定义如式(9)

$$\Phi(r, \hat{r}^c) = \frac{1}{u} \sum_{j=1}^u \frac{1}{\operatorname{RMSE}(r_j, \hat{r}_j^c)} \quad (9)$$

其中  $u$  为测试样本的数量,  $\operatorname{RMSE}(r_j, \hat{r}_j^c)$  表示第  $j$  个样本的实际测量值与重构值的光谱均方根误差。最后适应度函数表示为如式(10)表示

$$f = \Phi(r, \hat{r}^c) = \frac{1}{u} \sum_{j=1}^u \frac{1}{\operatorname{RMSE}(r_j, \hat{r}_j^c)} \quad (10)$$

步骤 4: 选择、交叉、变异。利用轮盘赌选择法从  $N$  个个体中选择两个父体, 适应度大的个体容易被选中, 反之亦然。交叉操作按一定的交叉概率交换选择的两个父体的二值基因值, 以产生新的子代, 交叉概率根据种群中所有个体的适应度值调整, 如式(11)所示

$$p_c = \begin{cases} k_1 \frac{(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & (f \geq f_{\text{avg}}) \\ k_2, & (f < f_{\text{avg}}) \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $k_1$  和  $k_2$  分别是小交叉常数和大交叉常数,  $f_{\max}$  和  $f_{\text{avg}}$  分别是种群中最大适应度值和平均适应度值, 变异操作按一定的变异概率改变随机选择的一个基因值, 变异概率  $p_m$  也是根据整个种群的适应度调整, 如式(12)所示

$$p_m = \begin{cases} k_3 \frac{(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & (f \geq f_{\text{avg}}) \\ k_4, & (f < f_{\text{avg}}) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $k_3$  和  $k_4$  分别是小变异常数和大变异常数。为了保证在交叉与变异期间个体的光源数量不变, 对两个个体交叉与变异时的规则进行了设计。图 1 是假设从 11 个光源中选择 3 个光源为例演示整个操作过程。

假设个体 1 和个体 2 表示通过轮盘赌选择出来的两个父体, 首先对这两个父体进行交叉操作。在两个父体中找出对应基因值不同的位置, 在图 1 中分别为位置 1, 2, 9, 11, 然后在这四个位置中随机选择两个基因值不同的位置, 假设选择位置 2、9 进行交叉, 最后得到 new Individual 1, 此时光源个数仍然是 3。然后对新个体进行变异操作, 为了保持要选择的光源数量不变, 需要从个体的 11 个基因位置中随机找出基因值不同两个位置, 然后互换这两个位置的基因值。在图 1 中 new Individual 1 的位置 1 和 3 互换得到 new Individual 2, 交叉和变异后产生新的个体, 从而产生新的子代。



表 2 SG140 在不同数量的光源下的组合结果

Table 2 Combined results of SG140 under different numbers of light sources

数量	A	B	C	D50	D65	F2	F8	F11	L1	L2	L3
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
5	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
6	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
7	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
8	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

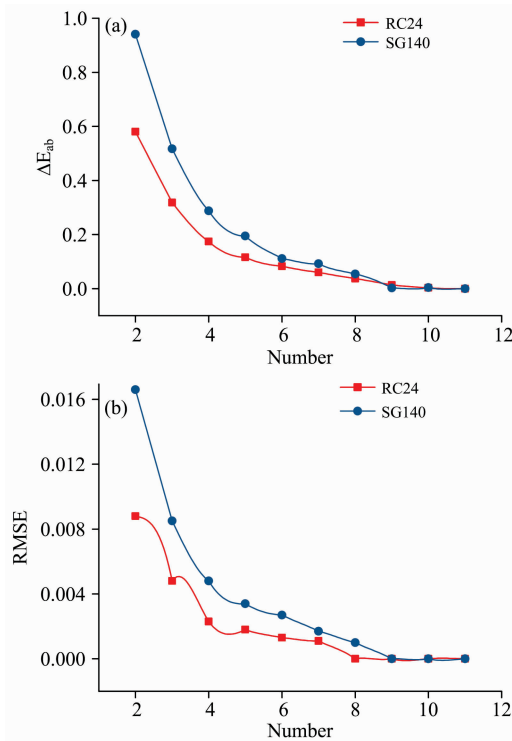


图 2 不同数量光源下得到的重构光谱色差 (a) 和均方根误差 (b)

Fig. 2 Color Differences (a) and RMS errors (b) of the reconstructed spectral under different numbers of light sources

3.2 光源组合对重构精度的影响

除了光源的个数会影响本算法的重构精度以外,光源的组合也会影响重构的精度,为了找到适用于样本的光谱重构的最优光源组合,实验首先从 90 个照明光源中找到 3 个最优光源,结果显示:当选择的光源为 LED14, LED39, LED48 时 RC24 样本的重构精度最好,当选择的光源为 A, LED45, LED48 时 SG140 样本的重构精度最好。两组最佳光源的光谱曲线如图 3 所示。

实验同时采用 Zhang 基于穷举法选择的三个光源 (CIEA, D65, D90) 下的光谱反射率重构方法与 A 光源下的伪逆法分别重构两组检测样本的光谱反射率。由三种方法重

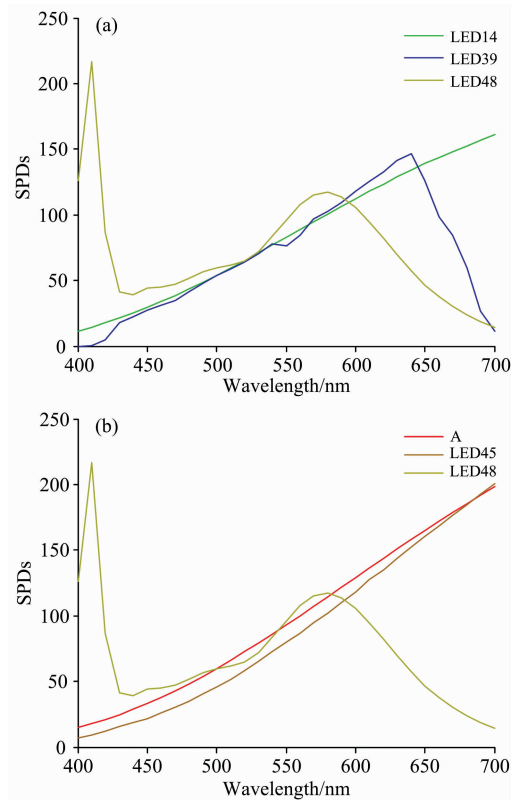


图 3 两个样本选择的最优光源组合 (a): RC24; (b): SG140

Fig. 3 Optimal source combination for two sample selections

(a): RC24; (b): SG140

表 3 三种方法的重构精度

Table 3 Reconstruction accuracy of three method

样本	方法	$\Delta E_{ab}$			RMSE		
		Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
RC24	伪逆法	3.266 6	22.97	0.451 8	0.029 7	0.2	0.006 3
	Zhang	0.429 3	8.423	0.004 2	0.004 8	0.017 2	0.000 13
	本方法	0.332 4	7.205 0	0.001 1	0.002 9	0.013 10	0.000 071
SG140	伪逆	3.821 9	13.71	0.414 4	0.035 6	0.486 2	0.007 3
	Zhang	0.544 8	9.34	0.008 3	0.013 3	0.051 3	0.000 4
	本方法	0.486 2	8.02	0.005 2	0.007 3	0.028 1	0.000 2

构得到的光谱与实测光谱之间的色差和光谱均方根误差数据分别统计于表 3 中，两个检测样本集中所有样本的光谱均方根误差如图 4 所示。

根据表 3 和图 4 可以得到如下结论：(1)本方法和 Zhang 的方法重构 RC24 和 SG140 的光谱曲线的精度都明显优于伪逆法得到的结果，说明基于多光源下的光谱反射率重构算法相比于单一光源，能够显著提高重构精度。(2)本算法比

Zhang 的方法在平均色差和最大色差、平均均方误差和最大均方误差等方面都有一定的提高，说明本文提出的基于遗传算法相比穷举法选择的光源组合更加适用于颜色样本的光谱反射率重构，具有精度高，效率快的优点。

图 5 演示了 RC24 色卡和 SG140 色卡中饱和度较高的色块光谱重构效果。图中的 4 条曲线分别是样本的实测光谱曲线和由三种方法重构得到的光谱曲线。

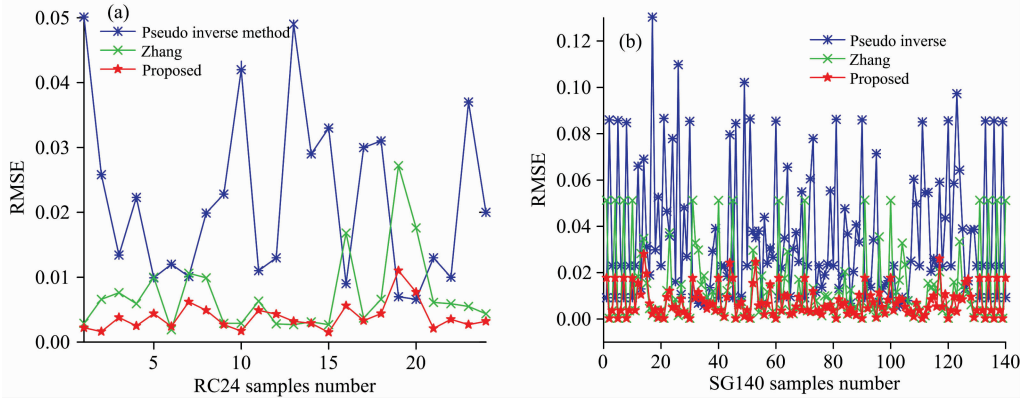


图 4 三种方法的均方根误差

(a): RC24; (b): SG140

Fig. 4 RMS error of three methods

(a): RC24; (b): SG140

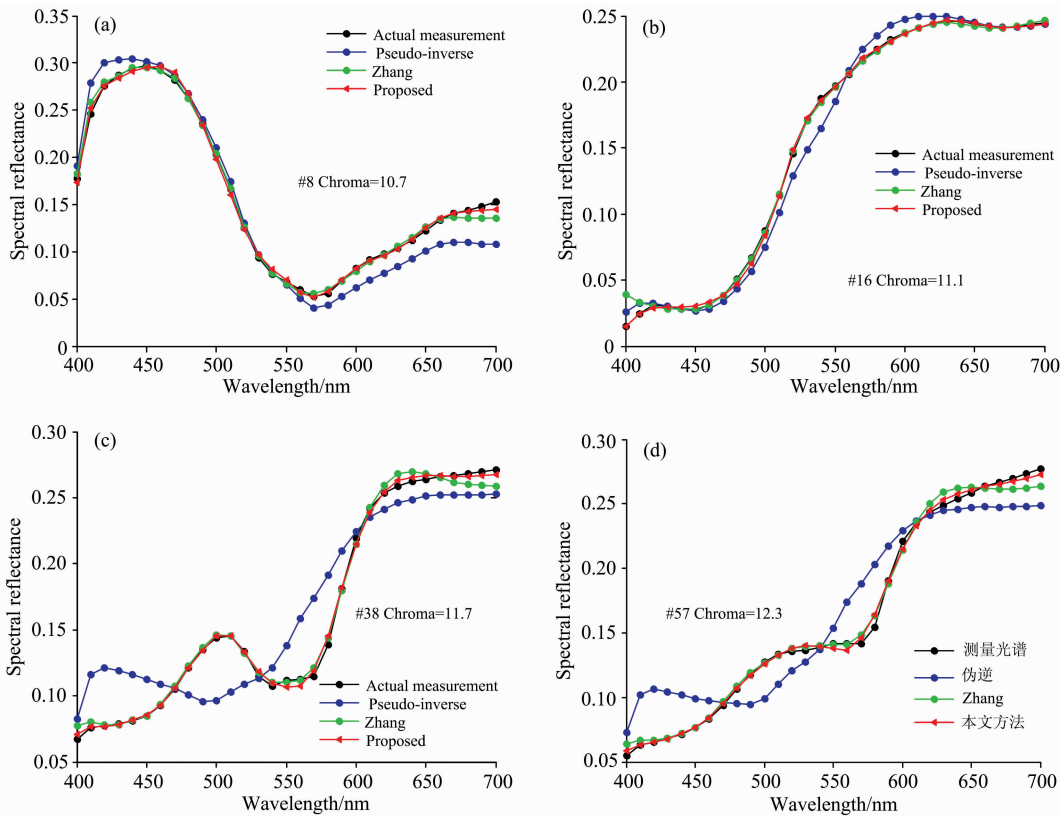


图 5 三种方法重构得到的光谱反射率曲线

(a), (b): RC24; (c), (d): SG140

Fig. 5 Spectral reflectance curves obtained by three reconstruction methods

(a), (b): RC24; (c), (d): SG140

从图 5 可以看出本算法与 Zhang 的方法得到的光谱反射率曲线均与实测得到的光谱曲线的耦合度高,但是在波长两端即 300~450 nm 和波长为 650~700 nm 时,本算法得到的光谱曲线耦合度要优于 Zhang 的方法。结合图 3 中本方法选择的三个光源的 SPDS 分布情况分析可得:本研究选择的光源的相对光源能量在波长两端分布较高,在中间波段分布较低,因此这可能与光源的相对光谱能量分布有关,相对光谱能量分布高的重构效果较好。

## 4 结 论

提出了基于遗传算法选择多光源下的光谱反射率重构方

法,使用遗传算法从 90 个光源中选取一个最优光源组合,并基于该最优光源组合进行光谱反射率重构,同时将本方法与基于穷举法选择的多光源下的光谱重构方法以及 A 光源下伪逆法的光谱重构方法的精度进行对比分析。结果表明本文提出的方法在光源数量达到 3 时具有最佳的算法精度和效率,且针对不同的颜色样本可自适应选择三个最佳光源组合,从而具有比穷举法等方法更快速更精确的优点。本工作有效地解决了光源选择问题,可实现利用数码相机拍摄的 RGB 三通道信息获得精确的多光谱图像。

## References

- [ 1 ] Zhang L, Liang D, Pan Z, et al. *Optical & Quantum Electronics*, 2015, 47(7): 1679.
- [ 2 ] LIANG Jin-xing, WAN Xiao-xia(梁金星, 万晓霞). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2017, 37(9): 0933001.
- [ 3 ] Dupont D. *Color Research & Application*, 2002, 27(2): 88.
- [ 4 ] Ayala F, Echávarri J F, Renet P, et al. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2006, 23(8): 2020.
- [ 5 ] Harifi T, Amirshahi S H, Agahian F. *Optical Review*, 2008, 15(6): 302.
- [ 6 ] Amiri M M, Amirshahi S H. *Optical Review*, 2014, 21(6): 816.
- [ 7 ] Zhang X, Wang Q, Li J, et al. *Color Research & Application*, 2017, 42(1): 68.
- [ 8 ] Martinkauppi J B, Shatilova Y, Kekäläinen J, et al. *Computational Color Imaging*, Springer Berlin Heidelberg, 2009: 198.
- [ 9 ] Elrifai M I A, Mahgoub M H, Magdy M A, et al. *Computer Science Journals*, 2013, 7(3): 278.
- [ 10 ] Liang J, Wan X, Liu Q, et al. *Color Research & Application*, 2015, 41(6): 585.
- [ 11 ] Karaman S, Shima T, Frazzoli E. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2012, 16(4): 489.

# Research on Spectral Reflectance Reconstruction Based on Genetic Algorithm for Selecting Multi-Illuminants

KONG Ling-jun<sup>1</sup>, ZENG Xi<sup>2\*</sup>, ZHANG Lei-hong<sup>2</sup>, ZHAN Wen-jie<sup>2</sup>, ZENG Wen-chao<sup>3</sup>

1. Department of Printing and Packaging Engineering, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China

2. School of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

3. Nanjing Urban Construction Environmental Investment Co., Ltd., Nanjing 210000, China

**Abstract** In order to solve the problem that the accuracy of the spectral reflectance reconstruction based on RGB three-channel values is not ideal, an optimized spectral reflectance reconstruction algorithm based on RGB three-channel information was proposed. Firstly we coded to generate individuals with multiple illuminants selected randomly, and RGB three-channel values were used to predict CIE XYZ values under multi-illuminant by polynomial regression algorithm, and the pseudo-inverse method was used to reconstruct the spectral reflectance. Then the reconstruction accuracy of the sample was taken as the fitness evaluation value of the individual, and the individuals were selected, crossed, and mutated based on the principle of survival of the fittest. Finally, the combination of multiple illuminants which were suitable for spectral reconstruction of color samples were obtained, and then used to reconstruct the spectral of color samples. Munsell color set was used as training samples, RC24 chart and SG140 chart were used as test samples, and 8 standard illuminants and 82 LED light sources were used as experimental light sources. The proposed method was used to select the optimal combination from the 90 illumination sources and reconstruct the spectral reflectance of the test samples, and compared with the method based on multi-illuminant selected by exhaustive method proposed by Zhang and the pseudo-inverse method under A light source. The experimental results show that the spectral reflectance reconstruction accuracy is improved as the number of light sources increases, and the increase achieves the most when the number of light sources reach to 3. Among the three reconstruction methods, the average color difference and average root mean

square error of the proposed method are 0.332 4 and 0.002 9 respectively for the RC24 chart, while the average color difference of the Zhang and pseudo-inverse methods are 0.429 3 and 3.266 respectively, and their average root mean square error are 0.029 7 and 0.004 8. For the SG140 chart, the average color difference and average root mean square error of the proposed method are 0.486 2 and 0.007 3 respectively, while the average color differences of the Zhang and pseudo-inverse methods are 0.544 8 and 3.821 9 respectively, and the average root mean errors are 0.035 6 and 0.013 3 respectively. The results show that the spectral reconstruction accuracy obtained under multi-illuminant is obviously superior to the one obtained under a single light source, and the results of the multi-illuminant selection method based on genetic algorithm is better than those of the exhaustive method. The genetic algorithm can automatically find the optimal illuminant combination according to the color samples, so as to reconstruct the spectral reflectance of the sample based on the optimal combination improving the accuracy of spectral reconstruction.

**Keywords** Spectral reflectance reconstruction; Genetic algorithm; Multi-illuminants; CIE XYZ values; Optimal combination

(Received Jul. 13, 2018; accepted Dec. 16, 2018)

\* Corresponding author

---

## 《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者,本刊要求作者重写,这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文,要求言简意明、确切地论述文章的主要内容,突出创新之处。
2. 应拥有与论文同等量的主要信息,包括四个要素,即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素,例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据,如检测限、相对标准偏差等;结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。
3. 句型力求简单,尽量采用被动式,建议经专业英语翻译机构润色,与中文摘要相对应。用 A4 复印纸单面打印。
4. 摘要不应有引言中出现的内容,换言之,摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号,除相邻专业的读者也能清楚地理解外,在首次出现时必须加以说明,例如用括号写出全称。