

## 不同算法模型对光谱重构精度的影响

刘传杰<sup>1</sup>, 李玉梅<sup>1</sup>, 陈浩杰<sup>1</sup>, 何颂华<sup>2</sup>, 陈桥<sup>2</sup>

(1. 曲阜师范大学, 日照 276826; 2. 深圳职业技术学院, 深圳 518000)

**摘要:** **目的** 研究光谱颜色复制中原稿图像的光谱信息, 并对目标色的光谱反射率进行重构, 探究影响重构光谱精度的因素。**方法** 通过选取 Munsell Color Matt (1269 色块) 和 Color Checker Classic (24 色块) 2 种色卡作为光谱反射率数据样本, 建立不同的主成分分析线性重构模型, 选取不同的基向量个数分别重构光谱, 并对其精度进行评价, 取 Classic 色卡模拟多光谱图像中重建光谱反射率的目标色, 研究比较光谱重构模型和基向量数目对重构精度的影响。**结果** 实验表明, 降维模型 1 最终恢复的数据在 RMSE, GFC 和色差上均优于模型 2, 随着基向量数目的增加, 2 种降维模型差距在减小, 当基向量数目达到 13 以后, 2 种模型基本没差异。**结论** 文中提到光谱重建模型 1 和 7 个基向量是重构光谱图像的最佳方案。

**关键词:** 主成分分析; 协方差对角化; 图像光谱信息; 光谱重构

**中图分类号:** TS801.3; O432.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0168-06

### Influence of Different Algorithm Models on the Accuracy of Spectral Reconstruction

LIU Chuan-jie<sup>1</sup>, LI Yu-mei<sup>1</sup>, CHEN Hao-jie<sup>1</sup>, HE Song-hua<sup>2</sup>, CHEN Qiao<sup>2</sup>

(1. Qufu Normal University, Rizhao 276826, China; 2. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the spectral information of the original image during the spectrum color reproduction and reconstruct the spectral reflectance of the target color, so as to explore the factors affecting the accuracy of reconstructed spectra. With two kinds of color cards (Munsell Color Matt (1269 color lump) and Color Checker Classic (24 color lump)) selected as the spectral reflectance data samples, different linear reconstruction models of PCA were established and different numbers of base vectors were selected to separately reconstruct the spectra. Then, their accuracy was evaluated. Classic color card was taken to simulate the target color in the multispectral image that reconstructed the spectral reflectance, so as to study and compare the influence of the number of spectral reconstruction models and base vectors on the reconstruction accuracy. The experimental results showed that the finally restored data by dimension reduction model 1 were better than dimension reduction model 2 in RMSE, GFC and color difference. With the increase of the number of base vectors, the gap of two dimension reduction models was reducing. When the number of base vectors was more than 13, the two models were almost no difference. The proposed spectral reconstruction model 1 and 7 base vectors are the optimal scheme for reconstructing spectral images.

**KEY WORDS:** principal component analysis; covariance diagonalization; image spectrum information; spectral reconstruction

基于色度匹配的颜色复制技术已经很成熟并在广泛运用, 但这是在特定光源和标准色度观察者的条件下进行的同色异谱的颜色复制技术, 为了实现在改变观察环境条件下色彩再现的一致性<sup>[1-2]</sup>, 达到同色同谱的复制效果, 需要对多光谱图像目标色的光谱

反射率进行重构, 实现基于光谱的颜色复制技术<sup>[3]</sup>。

目前面向多光谱图像颜色复制的光谱重构模型有很多研究, 可以通过优化算法重构, 还可以通过光谱数据获取数据的特征向量, 再由基向量重构, 如主成分分析法 (PCA)、独立成分分析法 (ICA) 等。其

收稿日期: 2017-02-25

基金项目: 国家自然科学基金 (61108087)

作者简介: 刘传杰 (1992—), 男, 曲阜师范大学硕士生, 主攻图像信息处理及光谱颜色复制。

通讯作者: 陈浩杰 (1973—), 男, 曲阜师范大学副教授、硕导, 主要研究方向为色彩管理、数码打样及数字化工作流程。

中通过获取数据基向量法是光谱重构的主流方法, PCA 因效果良好而在光谱重构中被广泛使用<sup>[4-7]</sup>, 多维信息通过线性变换投影到低维空间后, 数据要在光谱和色度信息方面都较好的表征原图像, 即降维后数据不失真<sup>[8-12]</sup>, 这就需要对降维模型的建立方法和低维空间中基向量数目进行研究, 并通过重构光谱与原光谱进行精度评价, 以确保低维空间能准确包含原图像的光谱信息<sup>[13]</sup>。

## 1 基于协方差对角化的光谱重构模型

主成分分析方法中, 根据求解特征向量的方法不同, 可分为奇异值分解法和协方差矩阵对角化法。部分研究学者通过奇异值分解法进行主成分分析, 即求取原光谱反射率数据矩阵的中心化矩阵, 然后对中心化矩阵进行奇异值分解得到特征向量, 如丁国华、于海琦、陈奕艺等都是利用奇异值分解的方式进行主成分分析<sup>[14]</sup>。文中利用协方差对角化的方法进行主成分分析, 通过求原光谱反射率矩阵的协方差, 对协方差对角化处理求特征值, 即对协方差矩阵特征值分解。一方面可以与其他研究学者利用奇异值分解法的主成分分析形成结果对比, 另一方面在光谱重构时用不同的算法重构模型, 对比分析重构模型对光谱重构精度的影响。

### 1.1 不同光谱重构模型的原理

物体表面光谱反射率是连续的曲线, 具有平滑的性质, 所以它可用有限的波段表示即用有限维的线性模型重构<sup>[15]</sup>。假设一个光谱反射率数据样本集  $\mathbf{R}$  为  $m \times n$  的矩阵,  $m$  为样本数,  $n$  为光谱维数  $\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ , 则它可表示为几个基向量和主成分系数的线性组合, 当  $\mathbf{R}$  的自由度小于  $n$  时, 其近似值  $\tilde{\mathbf{R}}$  可以看作是  $p$  个正交的  $n$  维单位基向量  $e_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) 的线性组合:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{m \times n} = \sum_{i=1}^p c_i e_i = \mathbf{C} \mathbf{V}^T \quad (1)$$

式中: 基向量  $e_i$  为特征向量, 用向量组  $\mathbf{V}$  表示  $\mathbf{V}_{n \times p} = (e_1, e_2, e_3, \dots, e_p)$ ,  $\mathbf{C}_{n \times p} = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_p)$  为主成分系数矩阵, 基向量个数足够多时, 系数矩阵表示为  $\mathbf{C}_{m \times n} = \mathbf{C}_{m \times n} \times \mathbf{V}_{n \times n}$ 。

在降维过程中为提取具有代表性的基向量提高重构精度, 先对原始反射率  $\mathbf{R}$  矩阵进行中心化处理:

$$\bar{r}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad \mathbf{A} = \mathbf{r}_{ij} - \bar{r}_j \quad (2)$$

矩阵降维便是降低维度间噪声和冗余数据, 协方差矩阵便可度量维度间的关系, 协方差矩阵是原矩阵每维与其他维的协方差组成, 主对角线上的元素是各个维度的方差, 其他元素是两两维度间的协方差 (即相关性):

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} S_1^2 & cov(1,2) & cov(1,3) & \dots & cov(1,p) \\ cov(2,1) & S_2^2 & cov(2,3) & \dots & cov(2,p) \\ cov(3,1) & cov(3,2) & S_3^2 & \dots & cov(3,p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ cov(p,1) & cov(p,2) & cov(p,3) & \dots & S_n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{(m-1)} (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \quad (4)$$

式中:  $cov(x, y) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]$ , 协方差矩阵还可通过中心化矩阵的转置与自身乘积来计算。

协方差矩阵  $\mathbf{Z}_{n \times n}$  是对称矩阵, 将其对角化处理即找到一个正交矩阵  $\mathbf{V}$  满足  $\mathbf{Z} \mathbf{V} = \mathbf{D} \mathbf{V}$  其中  $\mathbf{D}_{n \times n}$  是  $\mathbf{Z}$  的特征值。其非对角线元素为 0, 已将维度间的相关性降到最低;  $\mathbf{V}_{n \times n}$  是  $\mathbf{Z}$  的特征向量, 保留较大特征值对应的特征向量便达到“去冗余”的目的。对  $\mathbf{Z}$  特征值分解:

$$[\mathbf{V}, \mathbf{D}] = \text{eig}(\mathbf{D}) \quad (5)$$

通过计算特征值的累计贡献率确定保留的基向量数目, 特征值的贡献率和累计贡献率为:

$$a_i = \frac{D_i}{\sum D} \quad Aa_j = \sum_{i=1}^j D_i / \sum D \quad (6)$$

重构矩阵的系数为:

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{A}_{m \times n} \times \mathbf{V}_{n \times p} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_2 = \mathbf{R}_{m \times n} \times \mathbf{V}_{n \times p} \quad (8)$$

$\mathbf{C}_1$  和  $\mathbf{C}_2$  是分别通过中心矩阵  $\mathbf{A}$  和原始矩阵  $\mathbf{R}$  获得, 即重构矩阵的系数。在光谱重构用系数  $\mathbf{C}_1$  时要加上平均光谱  $\bar{r}$ , 重构光谱矩阵如下:

$$\text{模型 1: } \tilde{\mathbf{R}}_{m \times n} = \mathbf{C}_1 \times (\mathbf{V}_{n \times p})^T + \bar{r}_j \quad (9)$$

$$\text{模型 2: } \tilde{\mathbf{R}}_{m \times n} = \mathbf{C}_2 \times (\mathbf{V}_{n \times p})^T \quad (10)$$

### 1.2 光谱重构精度评价方法

光谱重构模型的精度评价主要从两方面, 色度精度和光谱精度。这里采用 CIE1976 色差来评价光谱重构的色度精度, 用均方根误差 RMSE 和拟合度系数 GFC 来评价光谱重构模型的光谱精度<sup>[16]</sup>。

$$\text{CIE1976 色差公式: } \Delta E = \sqrt{(\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)} \quad (11)$$

$$\text{均方根误差 RMSE: } \text{RMSE} = \sqrt{\sum (R - \tilde{R})^2 / n} \quad (12)$$

$$\text{拟合度系数 GFC: } G_{\text{FC}} = \frac{|\sum (R \times \tilde{R})|}{\sqrt{\sum (R^2)} \sqrt{\sum (\tilde{R}^2)}} \quad (13)$$

式中:  $R$  和  $\tilde{R}$  为色块在 400 ~ 700 nm 的每隔 10 nm 波长处的光谱反射率。

## 2 实验

### 2.1 实验环境

实验中, 选取 Color Checker Classic 色卡和 Munsell 色卡作为实验样本, 其中 Classic 的光谱反射

率用 Gretag Macbeth1pro 在 2°视场、D50 光源环境下测得,并用多光谱图像获取系统拍摄得到 7 通道的光谱图像和相机数码响应值, Munsell Color Matt 光谱数据源于 J. P. S. Parkkinen 文中所述<sup>[4]</sup>, 所得光谱反射率波长均在 400 ~ 700 nm 范围内, 每间隔 10 nm 进行采样, 得到 31 维的图像光谱数据矩阵。取 Classic 色卡和 Munsell 色卡光谱数据来研究分析光谱重构模型和基向量个数对重构精度的影响, 并进一步取最佳重构模型和最佳基向量个数及非最佳重构模型条件下, 取 Classic 色卡作为训练样本同时作为测试样本, 来探究验证文中提出的最佳光谱重构方案在实际应用中的实际重构效果。

### 2.2 实验步骤

1) 获取色卡光谱反射率  $R_{m \times n}$ , 并计算  $R$  的矩阵中心化矩阵  $A$ 。

2) 计算  $R$  的协方差矩阵  $Z$ , 将  $Z$  对角化处理, 求特征值  $D$  和特征向量  $V$ 。

3) 计算特征值的累计贡献率  $A_a$ , 确定  $p$  个特征向量  $U$ , 并求矩阵的主成分即系数矩阵,  $C_1 = A \times U$  或  $C_2 = A \times U$ 。

4) 训练样本与测试样本一致时, 重构 Classic 色卡和 Munsell 色卡的光谱反射率,  $\tilde{R}_{m \times n} = C_1 \times (V_{n \times p})^T + \bar{r}_j$  或  $\tilde{R}_{m \times n} = C_2 \times (V_{n \times p})^T$ 。

5) 用以上 2 种模型分别在不同基向量数目条件下, 进行重构光谱并对其精度进行评价, 确定最佳光谱重构模型及合适的基向量数目。

6) 在最佳光谱重构方案基础上, 取 Classic 色卡作为训练样本同时作为测试样本, 来验证在实际应用中通过多光谱相机获取的图像数码响应值到光谱反

射比转换的实际颜色重构效果。

### 2.3 特征向量的选取

求取矩阵的特征值、特征向量和贡献率以及累计贡献率, 并用折线图表示前 15 个特征值的贡献率和累计贡献率。

从图 1 可以明显看出随着两色卡基向量数目增多, 对应特征值的贡献率在减小, 累计贡献率在增加但增加幅度减小, 反应的光谱数据信息在减少, 由第 4 个到第 5 个特征向量累计贡献率增幅都为千分之几, 之后的贡献率增幅可以忽略, 累计贡献率趋于稳定。

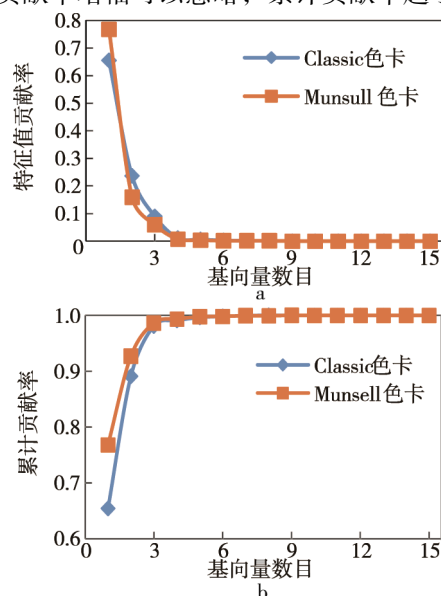


图 1 特征值对应的贡献率和累计贡献率  
Fig.1 Contribution rate and cumulative contribution rate of characteristic value

Munsell 色卡和 Classic 色卡前 6 个特征向量及平均光谱数据所对应的的光谱曲线见图 2。观察这些基向

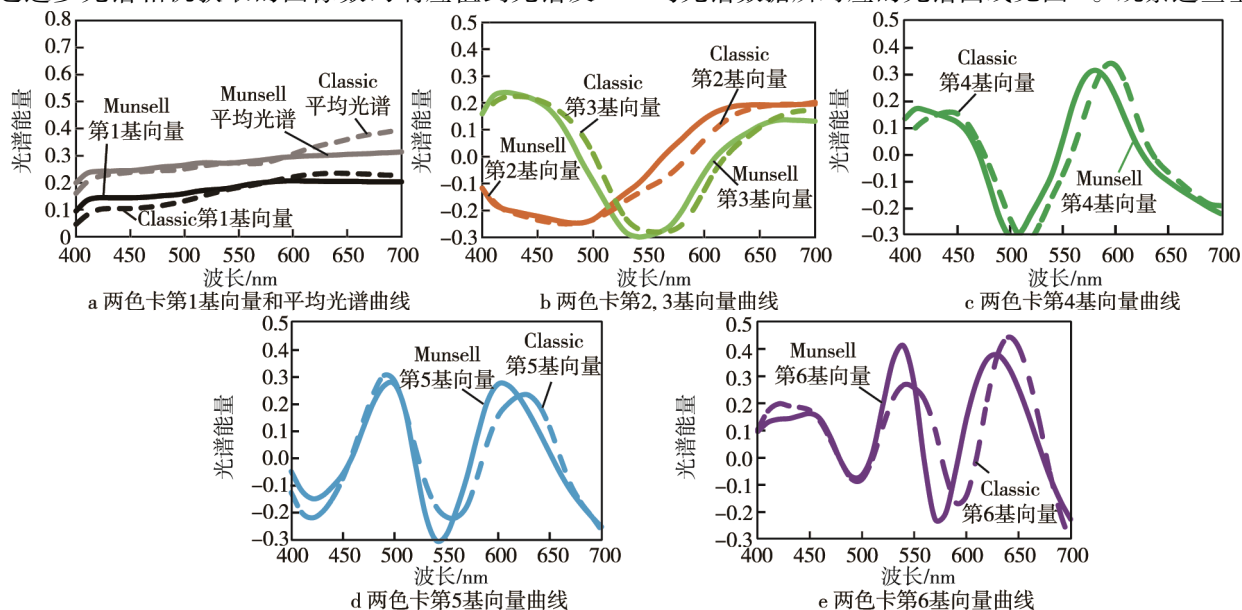


图 2 前 6 个特征根光谱曲线  
Fig.2 The spectral curves corresponding to the first 6 characteristic roots

量曲线，两色卡的各基向量变化趋势大致相同，第 1 基向量曲线趋势平缓和本的平均光谱走势相似，表征光谱中的黑白变化，第 2 基向量在青色和红色范围波动较大，第 3 基向量代表蓝色和黄绿之间的变化，第 4、5 基向量波动幅度较大，表示蓝紫-黄绿范围以及青绿-橙红范围的变化，第 6 基向量波动范围更广代表整个光谱范围的颜色。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 光谱重构模型及基向量数目的分析讨论

分别用上述的 2 种重构模型对 Munsell 色卡和 Classic 色卡的前 15 个基向量进行重构光谱，将重构光谱与原始光谱在色度精度和光谱精度两方面进行比较。

对 Munsell 色卡和 Classic 色卡分别用 2 种重构模型和不同基向量个数重构后的光谱色度评价结果见表 1。将两者光谱反射率在 D50 光源及 2°观察视场条件下转成  $L^*a^*b^*$  后用 CIE1976 色差公式来衡量重构光谱的色度精度。从表 1 可看出，随着特征向量数量增加，2 种色卡用 2 种模型重构的光谱和原始光谱的平均色差都在减小，且色块数多的 Munsell 色卡的重构色差要小于 Classic 色卡，每种色卡的重构结果比较都是重构模型 1 的色差小于重构模型 2。若以 1 个色差单位为分界点，当 Munsell 色卡的特征向量个数为 5 时重构模型 1 的色差差异小于 1，而重构模型 2 的特征向量个数为 7 时其色差才小于 1，Classic 色卡

当基向量数目达到 6 时重构模型 1 的色差小于 1，重构模型 2 基向量数达到 7 时色差小于 1，但 2 种模型使用 6 个基向量和 7 个色色差有大于 0.5 的下降幅度，且随着基向量的数目增多 2 种模型的色差差异也在减小，当基向量到达 13 个以后，两模型的色差几乎一致。故从色差这个指标来看在基向量数目较少的情况下重构模型 1 的精度更高，基向量数目选择 7 个重构结果会更好。

用均方根误差评价 2 种模型重建光谱的光谱精度及不同基向量数目对光谱重建精度的影响见表 2，可知随着重构光谱的特征向量数量增加，2 种模型的平均均方根误差都在减小，两色卡均方根误差也在减小，且色块数越多重构后均方根误差的差别比较小，但重构模型 1 重构的光谱精度都要优于重构模型 2，Munsell 色卡模型 1 的基向量数目达到 5 个以后，Classic 色卡模型 1 的基向量数目达到 6 个以后，重构光谱与原光谱的精度便可下降到千分之几，而模型 2 的基向量数目要达到 7 个以后其重构精度才能达到千分之几。故从均方根误差这个指标来看重构模型 1 的精度更高，基向量数目选取 6 个比较合适。

表 2 2 种色卡用 2 种模型重构后的平均 RMSE  
Tab.2 The average RMSE of two kinds of cards after the reconstruction with two models

特征向量个数	重构模型1		重构模型2	
	Classic 色卡	Munsell 色卡	Classic 色卡	Munsell 色卡
1	0.123 99	0.076 73	0.130 47	0.0801
2	0.065 52	0.041 44	0.072 63	0.043 04
3	0.029 66	0.018 94	0.031 73	0.0203
4	0.020 13	0.012 64	0.023 18	0.014 91
5	0.013 35	0.009 01	0.016 08	0.011 69
6	0.009 51	0.007 23	0.012 86	0.010 25
7	0.0065	0.005 14	0.009 94	0.007 01
8	0.005 07	0.004 07	0.008 57	0.006 16
9	0.003 75	0.002 86	0.006 37	0.003 46
10	0.002 55	0.002 11	0.003 95	0.002 42
11	0.001 55	0.001 63	0.002 76	0.001 98
12	0.001 12	0.001 32	0.002 48	0.001 71
13	0.000 86	0.001 06	0.002 36	0.001 28
14	0.000 52	0.000 81	0.001 35	0.001 01
15	0.000 41	0.000 67	0.000 62	0.000 88

表 1 两色卡用 2 种模型重构光谱后的平均色差  
Tab.1 The average color difference of two kinds of cards after spectral reconstruction with two models

特征向量个数	重构模型1		重构模型2	
	Classic 色卡	Munsell 色卡	Classic 色卡	Munsell 色卡
1	36.9	23.2	39.1	24.3
2	29.5	15.5	31.8	15.9
3	7.48	2.9	6.76	2.95
4	2.31	1.99	2.63	2.15
5	1.03	0.87	1.19	1.08
6	0.97	0.85	1.11	1.07
7	0.49	0.18	0.5	0.29
8	0.2	0.15	0.38	0.26
9	0.12	0.13	0.22	0.19
10	0.12	0.08	0.22	0.1
11	0.05	0.06	0.11	0.08
12	0.04	0.05	0.12	0.08
13	0.04	0.01	0.11	0.01
14	0.01	0.01	0.02	0.01
15	0.01	0.01	0.01	0.01

用 GFC 拟合度系数来评价原光谱与重建光谱的光谱精度见表 3。分析表 3 可知，随着重构光谱特征向量的增加，2 种模型和 2 种色卡重构的光谱和原始光谱的平均拟合度系数都在增大，且 Munsell 色卡用 2 种模型重构的光谱与原光谱相比拟合度都要高于 Classic 色卡重构结果，随着基向量数目和色块数目的

增加都使重构拟合度增加。从拟合度系数的数值上看,光谱重构模型1的重构拟合程度稍优于模型2, Munsell色卡使用模型一基向量数目达到6个,拟合度便能提升到0.999。模型2要使用7个基向量才能达到相同的重构结果。Classic色卡使用重构模型1和模型2的重构结果在拟合度系数上2模型的优劣并不明显,但模型1的精度稍高且基向量数目选择7个重构比较合适。

表3 2种色卡2种模型重构后的平均GFC  
Tab.3 The average GFC of two kinds of cards after the reconstruction with two models

特征向量个数	重构模型1		重构模型2	
	Classic色卡	Munsell色卡	Classic色卡	Munsell色卡
1	0.897	0.946 24	0.875 881	0.939 643
2	0.952 56	0.981 05	0.954 311	0.979 642
3	0.988 95	0.995 05	0.989 952	0.994 497
4	0.994 21	0.997 48	0.993 978	0.996 98
5	0.997 36	0.998 82	0.997 281	0.998 328
6	0.998 64	0.9992	0.998 368	0.998 724
7	0.999 05	0.9996	0.999 002	0.999 378
8	0.999 19	0.999 71	0.999 226	0.999 495
9	0.999 58	0.999 89	0.999 518	0.999 846
10	0.999 78	0.999 94	0.999 779	0.999 919
11	0.999 91	0.999 96	0.999 893	0.999 943
12	0.999 92	0.999 97	0.999 902	0.999 954
13	0.999 94	0.999 99	0.999 919	0.999 977
14	0.999 99	0.999 99	0.999 969	0.999 984
15	0.999 99	0.999 99	0.999 995	0.999 987

### 3.2 实例应用的分析讨论

在光谱颜色复制中,对多光谱成像系统获取的光谱图像进行光谱反射率的重构是必须的。这里取Classic色卡作为光谱图像颜色复制中需重构光谱反射率的图像,通过上述分析光谱重构模型1和7个基向量重构光谱能得到较高的复制精度,在此方案基础上,取Classic色卡作为已知的训练样本,并获取其多光谱图像的数码响应值,来重构Classic色卡目标色的光谱反射率,并与原光谱在RMSE, DE指标下评价实际重构效果。Classic色卡在不同重构方案下的重构效果:模型1和7个基向量的平均色差,均方根误差和拟合度分别为2.57, 0.0201, 0.998;模型2和7个基向量的平均色差,均方根误差和拟合度分别为3.19, 0.0239, 0.997。再次证明光谱重构模型1的复制精度要高于光谱重构模型2。

## 4 结语

通过选取Classic色卡和Munsell色卡的光谱数据来研究分析了光谱重构模型和基向量个数对光谱

重构精度的影响,通过分别使用2种光谱重构模型和不同数目的基向量进行提取主成分并重构光谱,分析重构结果的再现精度。经过上述实验及数据分析得出结论:不同的重构模型会影响光谱的重构精度,相同基向量数目重构时,文中提到的重构模型1其光谱再现精度优于光谱重构模型2。模型1中对训练样本的光谱数据进行了零均值化处理提高了重构光谱精度,不同基向量数目也会影响重构光谱精度,随着基向量数目的增加2个模型的光谱重构精度不断提高,当基向量数目增加到7时Classic色卡和Munsell色卡重构色差均小于1,均方根误差RMSE均小于0.01,光谱拟合度GFC均大于0.999,重构基向量数目大于7以后重构精度变化不大。在实际应用中多光谱图像数码响应值到光谱反射率的重构中,使用模型1和7个基向量重构时其色差为2.57,均方根误差RMSE为0.0201,拟合度能达到0.998。文中提出的光谱重构模型1和7个基向量重构光谱能得到较高色彩再现精度,这对光谱颜色复制中多光谱图像色彩的光谱重建有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 王莹. 多光谱图像色彩再现关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.  
WANG Ying. A Study of Key Technology in Multi-spectral Image Color Reproduction[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [2] 何颂华, 高媛, 陈桥, 等. 光谱颜色复制中对基色料线性混合空间的建立[J]. 光学学报, 2016(3): 304—313.  
HE Song-hua, GAO Yuan, CHEN Qiao, et al. The Establishment of the Color Pigment Mixed Linear Space in Spectral Color Copy[J]. Acta Optica Sinica, 2016(3): 304—313.
- [3] 邹文海, 徐海松, 王勇. 基于彩色扫描仪的图像光谱重构[J]. 光学学报, 2007(5): 859—863.  
ZOU Wen-hai, XU Hai-song, WANG Yong. Spectral Reconstruction of Images Based on Color Scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2007(5): 859—863.
- [4] 万晓霞, 易尧华. 全彩色遥感影像彩色合成效应的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 203—207.  
WAN Xiao-xia, YI Yao-hua. Color Compound Domino Effect of True Color Remote Sensing Imagery[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(2): 203—207.
- [5] 张显斗. 光谱颜色管理系统关键技术综述[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(1): 10—17.  
ZHANG Xian-dou. Research on the Key Technologies of Spectrum Color Management System[J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(1): 10—17.
- [6] 何颂华, 陈桥, 段江. 基于人眼视觉特性的光谱降维

- 模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015(6): 1459—1463.
- HE Song-hua, CHEN Qiao, DUAN Jiang. The Research of Spectral Dimension Reduction Method Based on Human Visual Characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6): 1459—1463.
- [7] WANG Y, ZENG P, LUO X, et al. Low-dimensional Multi-spectral Space for Color Reproduction Based on Nonnegative Constrained Principal Component Analysis[J]. Journal of Southeast University, 2009, 2(4): 486—490.
- [8] LI Jie, WANG Hai-wen, CHEN Guang-xue. Study on Key Technologies of Multi-spectral Color Reproduction[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 8006(1): 502—508.
- [9] WANG Hai-wen, CHEN Guang-xue, LI Jie. Study on Spectral Image Fusion Technology Based on High-fidelity Reproduction[J]. Journal of Computational Information System, 2012, 8(5): 2107—2115.
- [10] PHILIPP U. Spectral-based Image Reproduction Workflow from Capture to Print[C]// Society for Imaging Science and Technology, 2008: 165—172.
- [11] 任鹏远, 廖宁放, 柴冰华, 等. 基于多光谱成像的光谱反射率重建[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 427—429.
- REN Peng-yuan, LIAO Ning-fang, CHAI Bing-hua, et al. Spectral reflectance Recovery Based on Multispectral Imaging[J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 427—429.
- [12] 王海文, 李杰. 多光谱颜色复制技术研究发展[J]. 浙江科技学院学报, 2014, 26(1): 46—51.
- WANG Hai-wen, LI Jie. Research Development of Multi-spectral Color Reproduction Technology[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2014, 26(1): 46—51.
- [13] 杨晓丽. 结合 PCA 与 ICA 的 Munsell 色卡光谱反射比重建[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2010, 28(2): 150—153.
- YANG Xiao-li. Spectral Reflectance Reconstruction of Munsell Color Chips Based on a Combination of PCA and ICA[J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2010, 28(2): 150—153.
- [14] 丁国华, 朱元泓, 李博, 等. 基于不同色块数量的光谱重构对比[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 14—18.
- DING Guo-hua, ZHU Yuan-hong, LI Bo, et al. Comparison of Spectrum Reconstruction on Different Number of Color Block[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 14—18.
- [15] TZENG D, BERNS R S. A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology[J]. Color Research & Application, 2004, 29(2): 104—110.