

样本特征对光谱图像重构影响的研究

于海琦, 刘真, 张雷洪, 吴光远, 田全慧

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 以光谱图像作为检测样本讨论不同训练样本数量、分布对光谱图像重构的影响。**方法** 选择 ColorChecker SG(140 色)和 ColorChecker Color Rendition Chart(24 色)以及 Munsell(1269 色)等 3 种色卡作为训练样本,对其光谱反射率进行主成分分析,利用提取的主成分对光谱图像进行重构。**结果** 采用 ColorChecker Color Rendition Chart(24 色)色卡的 7 个主成分重构光谱图像对图像的再现精度最高,其色差比其他 2 种色卡小,且最大色差小于 3。**结论** 在同一重构条件下,光谱图像的重构精度并不随着训练样本数量增多以及分布范围增大而提高,3 种训练样本对红紫色的重构精度相对较低。

关键词: 样本分布; 光谱图像; 主成分分析; 光谱重构

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)13-0144-06

Effects of Sample Characteristics on Spectral Image Reconstruction

YU Hai-qi, LIU Zhen, ZHANG Lei-hong, WU Guang-yuan, TIAN Quan-hui

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Objective The spectral image was chosen as a test sample, to discuss the effects of different number and distribution of training samples on the reconstruction of spectral image. **Methods** The spectral reflectance of ColorChecker SG, Color Rendition Chart and Munsell color cards were chosen as training samples and were analyzed by principal component analysis (PCA). And spectral image reconstruction was carried out using the principal component extracted by the analysis to color cards. **Results** Experimental results showed that the spectral image reconstructed using the seven principal components of the color card of ColorChecker Color Rendition Chart (24) had the highest precision, and the color difference was smaller than those of the other two color cards, with a largest color difference of less than 3. **Conclusion** The reconstruction precision of the spectral image did not increase with the increasing training sample number and distribution range under the same reconstruction condition. The reconstruction precision of red and purple was relatively low for the three kinds of training samples.

KEY WORDS: sample distribution; spectral image; principal component analysis; spectral reconstruction

光谱反射率是一种既与设备又与光照无关的颜色表示方法,是对颜色描述最好的选择。光谱反射率能够精确地表示物体的颜色,对颜色的定量描述具有重要意义。用光谱反射率描述颜色既可以减少同色异谱问题,又能够提高颜色的复制精度^[1]。获取的多

光谱图像是多维的,需要对多光谱图像进行光谱重构才能实现彩色图像的复制。目前用于光谱重构的方法有两大类,第 1 类是通过优化算法重构光谱反射率,如 Winner 估算法、伪逆法、神经网络算法、最小二乘法等;第 2 类是通过光谱降维获取训练样本相应的特征

收稿日期: 2014-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(41271446); 上海市研究生创新基金(JWCXSL1402)

作者简介: 于海琦(1991—),男,山东威海人,上海理工大学硕士生,主攻多光谱颜色复制。

通讯作者: 刘真(1953—),女,硕士,上海理工大学教授,主要研究方向为攻色彩管理和印刷数字化工作流程。

向量,通过特征向量重构光谱反射率,如主成分分析法(PCA)、独立成分分析法等。其中降维是光谱重构的主流方法,主成分分析因为效果良好而在光谱重构中被广泛使用^[2]。

丁国华等人^[1]采用主成分分析提取训练样本的主成分,对训练样本自身进行重构,其重构效果只是针对特定色块,而实际颜色复制中多以复制图像为主,目前鲜有以多光谱图像作为检测样本评价光谱重构效果的相关研究。陈奕艺^[3]利用伪逆法、主成分分析等方法分别对数码相机的物体表面色光谱重构,结果表明与其他方法相比,主成分分析法具有较高的精度。故文中采用主成分分析法分析不同训练样本对多光谱图像进行重构,分析不同训练样本对光谱图像重构的影响。

1 主成分分析法

自然物体表面的光谱反射率大多是连续的,并能用几个基本向量的线性组合表示,由此光谱反射率能够通过有限维的线性模型重构,从而有效降低光谱维数^[4]。主成分分析法是提取颜色样品光谱反射率特征最常用的方法,光谱反射率样本集 \mathbf{r} 是 $n \times m$ 维的矩阵(m 表示样本数, n 表示光谱维数), $\mathbf{r}=(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \dots, \mathbf{r}_m)$,可以看作是 p 个彼此正交的 n 维特征向量 \mathbf{e}_i 的线性组合^[5-6]。

$$\mathbf{r} = \sum_{i=1}^p \mathbf{e}_i \mathbf{a}_i = \mathbf{E} \cdot \mathbf{A} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}=(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, \dots, \mathbf{e}_p)$ 为提取的 p 个特征向量,用向量组表示; \mathbf{A} 为对应的转换系数,可表示为 $\mathbf{A}=(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_p)^T$ 。可以通过主成分分析把求解 n 维光谱反射率的问题转换成求解 p 维主成分问题,由此降低了光谱维数,方便运算。在实际计算中为了提高精度,去除均值对重构精度的影响,先对数据去均值,对光谱反射率与均值的差值进行主成分分析,即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r} - \bar{\mathbf{r}} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{A} \quad (2)$$

式中: $\Delta \mathbf{r}$ 为一个与 \mathbf{r} 具有相同维数的矩阵。

2 基于主成分分析法光谱重构的关键技术

文中利用奇异值分解的方法提取主成分,对 $\Delta \mathbf{r}$ 进行奇异值分解:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (3)$$

式中: \mathbf{U} 为 $\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r}^T$ 的特征向量,即重构光谱时所使用的基向量 $\mathbf{U}=(u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$; \mathbf{V} 为 $\Delta \mathbf{r}^T \cdot \Delta \mathbf{r}$ 的特征向量; \mathbf{S} 为对角矩阵,它与矩阵 $\Delta \mathbf{r}$ 有相同的维数,对角线上的值是 $\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r}^T$ 和 $\Delta \mathbf{r}^T \cdot \Delta \mathbf{r}$ 特征值的平方根。

当矩阵 \mathbf{U} 的前 p 个特征向量的贡献率足够大时,光谱反射率就可认为是前 p 个特征向量的线性组合。根据式(4)累计贡献率计算公式确定所需主成分的个数,利用提取主成分对测试样本进行光谱重构。

$$V^p = \frac{\sum_{i=1}^p W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

根据式(2)求得转换系数为:

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{U}^* \cdot \Delta \mathbf{r} \quad (5)$$

式中: \mathbf{U}^* 为 \mathbf{U} 的伪逆矩阵。重构后的样本光谱反射率表示为:

$$\bar{\mathbf{r}} = \mathbf{U} \cdot \bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{r}} \quad (6)$$

采用均方根误差(RMSE)^[7]评价光谱反射率重构精度。设原始光谱反射率样本集 \mathbf{r} 中的某一样本表示为 \mathbf{r}_i ,重构光谱反射率样本集 $\bar{\mathbf{r}}$ 中的某一样本表示为 $\bar{\mathbf{r}}_i$ (\mathbf{r}_i 和 $\bar{\mathbf{r}}_i$ 都是 n 维列向量),定义均方根误差RMSE为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (\mathbf{r}_i - \bar{\mathbf{r}}_i)^2}{N}} \quad (7)$$

采用CIE1976的色差 ΔE_{ab}^* ^[8-10]来评价光谱反射率重建的色度精度。定义CIE1976色差公式 ΔE_{ab}^* 为:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (8)$$

3 仿真实验及结果分析

3.1 试验数据及其获取

选用 GretagMachbeth 公司 2 套标准色卡 Color-Checker Color Rendition Chart(以下简称 RC, 24 色)和 ColorChecker SG(以下简称 SG, 140 色)以及 Munsell 色卡(1269 色)色等 3 种色卡作为训练样本对多光谱图像进行重构。大多数情况下,对连续函数每隔 10 nm 采样对其准确性影响不大,故文中采用 10 nm 间隔对 400~700 nm 之间的光谱进行采样^[11]。3 种色卡^[12]的光谱反射率的波长范围为 400~700 nm,每隔 10 nm 进行采样。多光谱图像 fruits and flowers^[13]大小为 120 ×

160 像素,原图光谱范围为 380~780 nm,每隔 5 nm 取样,包含 81 个通道,文中在多光谱图像数据中取其中 400~700 nm 的光谱范围,间隔 10 nm 采样,共 31 个通道。

3.2 光谱重构结果及分析

通过 3 种色卡的光谱反射率计算其在 D50 光源下的 Lab 值,3 种色卡的 a, b 分布(a 轴从右到左表示颜色的红-绿变化, b 轴从上到下表示颜色的黄-蓝变化)见图 1。由图 1 可知,3 种色卡的总体分布趋势相似,RC 色卡分布最均匀,SG 色卡在一、二象限的分布范围较广,而 Munsell 色卡呈环状分布,分布最不均匀。

通过主成分分析分别获取 RC, SG 和 Munsell 等 3 组样本的前 7 组主成分的特征值,其累计贡献率通过式(4)计算得到,前 7 组特征值及其累计贡献率见表 1。

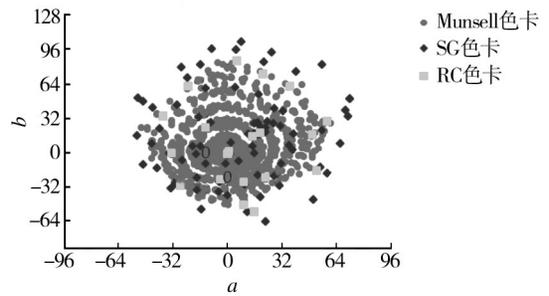


图 1 3 种色卡的 ab 分布

Fig.1 ab distribution of the three kinds of color cards

由表 1 可知,比较同一色卡的累计分贡献率与主成分数量的关系可以发现,累计贡献率随着主成分个数的增加而增加,当主成分增加到一定数量时,累计贡献率基本稳定在一定范围内,见图 2。前 3 个特征值的贡献率均已达到 98% 以上,前 6 个特征值的贡献率

表 1 3 种色卡的前 7 组特征值和累计贡献率

Tab.1 Top seven groups of characteristic values and accumulation contribution rates of the three kinds of color card

数量	RC 色卡		SG 色卡		Munsell 色卡	
	特征值	主成分累计贡献率	特征值	主成分累计贡献率	特征值	主成分累计贡献率
1	25.778 89	0.661 111	305.5954	0.827 55	1162.539	0.767 657
2	9.355 793	0.901 044	46.568 36	0.953 657	239.7622	0.925 978
3	3.191 264	0.982 885	13.399 62	0.989 943	90.265 79	0.985 583
4	0.384 673	0.992 751	1.965 075	0.995 265	11.459 35	0.993 15
5	0.153 639	0.996 691	0.939 945	0.997 81	5.588 846	0.996 841
6	0.056 332	0.998 135	0.267 683	0.998 535	1.800 14	0.998 029
7	0.042 123	0.999 216	0.224 793	0.999 144	1.358 699	0.998 927

均已达到 99.8% 以上。由图 2 可知,主成分数量大于 3,其累计贡献率的增长趋于平缓,并稳定在 99.8% ~ 99.9% 之间,3 种色卡中累计贡献率最高的是 SG 色卡。

通过累计贡献率的分析,3 种色卡 6 个主成分的累

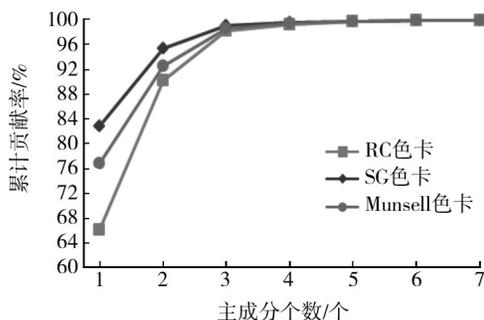


图 2 主成分数量与累计贡献率的关系

Fig.2 Relationship of principal component number and accumulation contribution rate

计贡献率皆达到 99.9% 以上。文献[14]的研究表明在艺术品复制中,5~8 个主成分能够准确地复制光谱,故文中分别选定 3~7 个主成分重构多光谱图像,并比较不同训练样本对光谱图像重构的影响。

首先分析 3 种色卡前 6 组特征向量代表的颜色信息^[15],在此基础上比较、分析 3 种色卡对光谱图像的重构效果。3 种色卡的前 6 组特征向量的颜色信息大致相同,第 1 组特征向量代表非彩色信息,SG 色卡对光谱图像非彩色信息的重构比较准确;第 2 组特征向量代表颜色的红-青信息;第 3 组特征向量代表颜色的黄-蓝信息;第 4 组特征向量代表颜色的黄-品红信息;第 5 组特征向量代表颜色的黄-绿信息。从各特征向量表现的颜色信息可知,重构图像在黄、绿等颜色再现效果较好。

分别用3种色卡的3~7个主成分重构光谱图像,

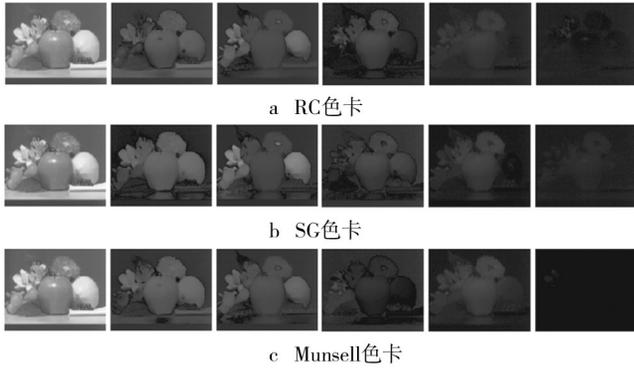


图3 色卡前6组特征向量代表的颜色信息

Fig.3 Color information from the top six eigenvectors

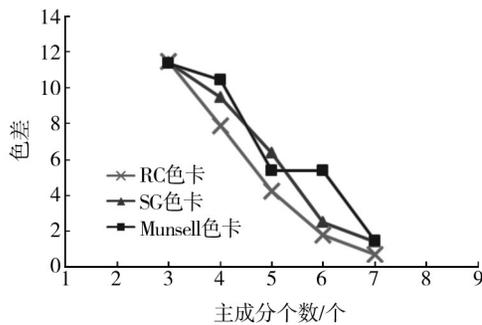


图4 3种色卡重构光谱图像的平均色差对比

Fig.4 Comparison of mean color difference of spectral image reconstructed by the three kinds of color cards

重构结果见图4—6。D50光源下重构图像与原图像的色差对比见表2,重构图像与原图像的RMSE对比见表3。从色差的角度分析,RC色卡重构光谱图像的平均色差最小,说明RC色卡重构图像的色度精度最高,且7个主成分时,RC色卡的最大色差小于3,故利用RC色卡的7个主成分对光谱图像重构能够达到较高的色度精度。从RMSE的角度分析,3种色卡重构的光谱吻合度相差不大,且重构精度仅与主成分数量有关。结合3种色卡的样本分布特征以及其样本数量特征可知,光谱图像重构的光谱精度和重构精度与训练样本数量没有必然联系,RC色卡的样本分布最均匀,其色度精度最高。

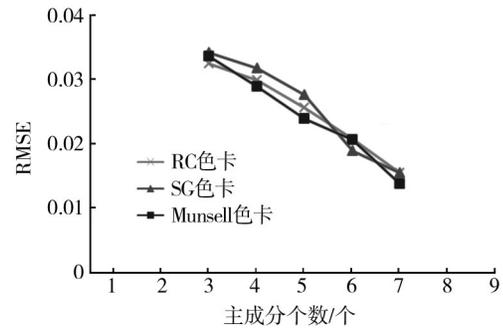


图5 3种色卡重构光谱图像的平均RMSE对比

Fig.5 Comparison of mean RMSE of spectral image reconstructed by the three kinds of color cards

表2 3种色卡重构光谱图像的色差对比

Tab.2 Comparison of color difference of spectral image reconstructed by the three kinds of color cards

主成分	RC色卡			SG色卡			Munsell色卡		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
3	0.2535	11.4578	47.8481	0.2055	11.4264	52.3495	0.2393	11.3714	36.8045
4	0.0940	7.8931	22.2195	0.4296	9.4531	28.6448	0.0390	10.4683	34.3291
5	0.0654	4.2604	12.0850	0.3188	6.3549	16.7610	0.0372	5.3785	16.8427
6	0.0302	1.7678	15.1593	0.0179	2.4960	23.5505	0.0234	5.3574	16.8492
7	0.0338	0.6932	2.9626	0.0108	1.3955	8.4766	0.0251	1.4823	7.3625

表3 3种色卡重构光谱图像的RMSE对比

Tab.3 Comparison of RMSE of spectral image reconstructed by the three kinds of color cards

基函数	RC色卡			SG色卡			Munsell色卡		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
3	0.0085	0.0324	0.1170	0.0093	0.0341	0.1254	0.0072	0.0335	0.1282
4	0.0078	0.0298	0.1031	0.0090	0.0316	0.1185	0.0060	0.0289	0.1041
5	0.0066	0.0256	0.0816	0.0082	0.0276	0.0958	0.0055	0.0239	0.0765
6	0.0033	0.0207	0.0771	0.0054	0.0189	0.0642	0.0053	0.0206	0.0666
7	0.0030	0.0154	0.0653	0.0034	0.0155	0.0631	0.0026	0.0138	0.0653

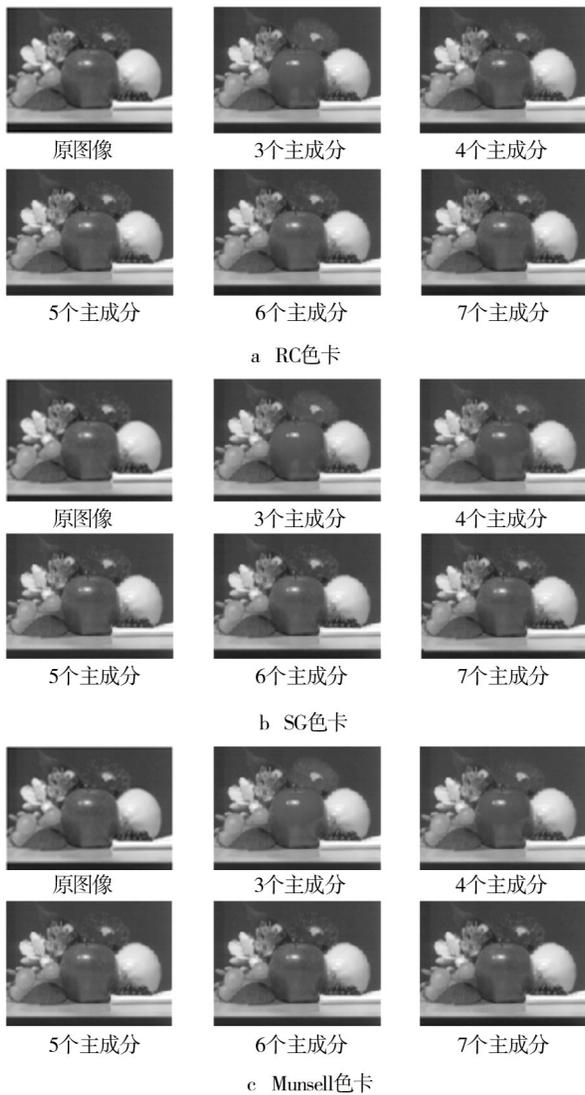


图6 3种色卡重构的光谱图像

Fig.6 Spectral images reconstructed by the three kinds of color cards

比较图6可知,图像色差主要集中在图像中苹果和花的部分。总体上看,RC色卡重构对光谱图像的重构效果最好,再现精度最高。以6个主成分为例,整幅图像19 200个像素点,重构图像色差大于3的像素点 ab 分布分别见图7。RC色卡重构图像与原图像色差大于3的像素点分布范围较小,主要分布在一、四象限,说明存在色差的颜色主要是红、紫色,这与图像中色差集中在红紫色的苹果等区域相吻合。除上述区域外,SG色卡在第二象限靠近 b 轴的区域重构精度较差,即用SG色卡对黄色再现效果较差。

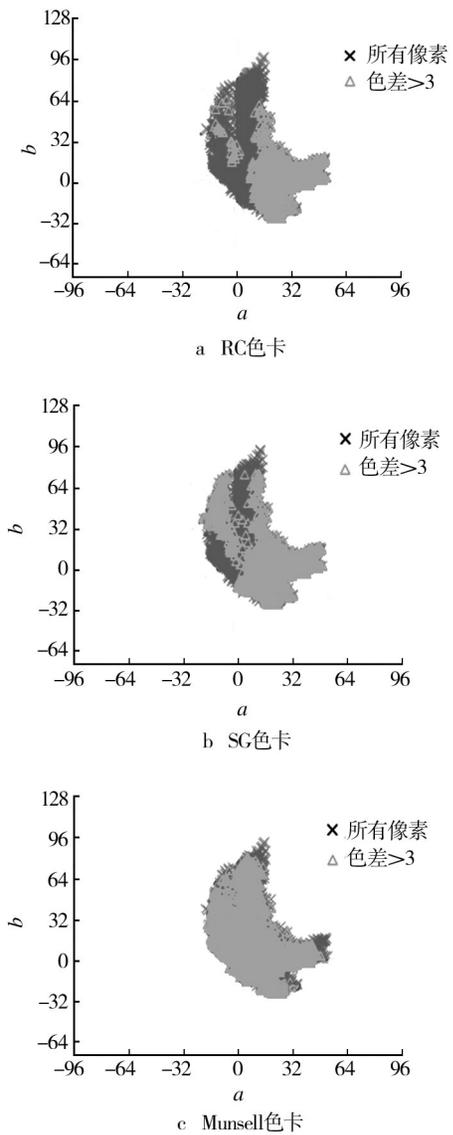


图7 3种色卡重构的光谱图像像素点 ab 分布

Fig.7 ab distribution of spectral image reconstructed by the three kinds of color cards

4 结语

文中用3种不同色块数量的色卡作为训练样本提取主成分对光谱图像进行重构。首先,提取特征向量,对比特征向量的累计贡献率,SG色卡的累计贡献率最高。其次,分析了不同主成分代表的颜色信息,利用提取3种色卡的主成分对多光谱图像重构,通过计算色差、均方根误差以及分析重构图像的特征,比较三者对光谱图像的色度精度以及重构精度的影响。结果显示,3种色卡都对红、紫色的再现精度较

低,RC色卡重构图像的色差最小,色度精度最高;3种色卡重构的光谱吻合度相差不大,且重构精度仅与主成分数量有关。最后分析以6个主成分为例分析整幅图像的 ab 色度分布,RC色卡色差大于3的像素点分布范围较小,且主要分布在一、四象限,这一结果与对重构图像的分析吻合。综上所述,光谱图像重构精度并不随训练样本数量增多以及分布范围增大而提高。从颜色复制精度的角度分析,采用RC色卡的7个主成分对光谱图像重构是达到较高颜色复制精度的最优选择。

参考文献:

- [1] 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(2):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(2): 14—18.
- [2] 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. Key Technologies Review of the Spectral Color Management System[J]. China Printing and Packing Study, 2013, 5(1): 10—17.
- [3] 陈奕艺.基于数码相机的物体表面色光谱重构[D].杭州:浙江大学,2008.
CHEN Yi-yi. Spectrum Reconstruction of Surface Color Based on the Digital Camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [4] TZENG D Y, BERNIS R S. A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology[J]. Color Research & Application, 2004, 29(2): 104—110.
- [5] FAIRMAN H S, MICHAEL H B. The Principal Components of Reflectances[J]. Color Research & Application, 2005, 30(2): 84—98.
- [6] 许淑娜,李长坡.对主成分分析法三个问题的剖析[J].数学理论与应用,2011,31(4):116—121.
- XU Shu-na, LI Chang-po. Dissection to Three Typical Issues of Principal Component Analysis[J]. Mathematical Theory and Applications, 2011, 31(4): 116—121.
- [7] TZENG D. Spectral-based Color Separation Algorithm Development for Multiple Ink Color Reproduction[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 1999.
- [8] CHEN Qiao-hong, MACDONALD L W. Comparison Study of Estimation Methods for Digital Camera's Spectral Sensitivity [A]. Tokyo Japan, 2002.
- [9] 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.
- [10] 刘浩学. CIE均匀颜色空间与色差公式的应用[J].北京印刷学院学报,2003,11(3):3—9.
LIU Hao-xue. The Application of CIE Uniform Color Space and Its Color Difference Formula[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2003, 11(3): 3—9.
- [11] TRUSSELI H J, KULKAMI M S. Sampling and Processing of Color Signals[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(4): 677—681.
- [12] Spectral Database, University of Eastern Finland Color Group [EB/OL]. [http://www.uef.fi/spectral/spectral database](http://www.uef.fi/spectral/spectral%20database).
- [13] Spectral Image Database, University of Eastern Finland Color Group [EB/OL]. [http://www.uef.fi/spectral/spectral image database](http://www.uef.fi/spectral/spectral%20image%20database).
- [14] IMAI F H, BERNIS R S. Spectral Estimation Using Trichromatic Digital Cameras[C]// Proceedings of the International Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives, Wiley, 1999: 42.
- [15] FLINKMAN M, LAAMANEN H, TUOMELA J, et al. Eigenvectors of Optimal Color Spectra[J]. Optical Society of America, 2013, 30(9): 1806—1813.
- [18] 琚晓晖,齐鲁.有机硅改性三聚氰胺甲醛树脂的研究[J].热固性树脂,2006,21(3):14—17.
JU Xiao-hui, QI Lu. Study on Melamine-formaldehyde Resin Modified with Silicone[J]. Thermosetting Resin, 2006, 21(3): 14—17.

(上接第70页)

性能[J].高分子材料与工程,2008,24(1):147—150.

YANG Zhong-xing, QI Lu, DI Hai-yan. Performance of Modified Melamine-formaldehyde Resin and Fiber[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(1): 147—150.