

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.03.012

# 基于颜色属性的光谱重建训练样本正交优化

何成栋<sup>1</sup>, 黄新国<sup>1,2,3</sup>, 张姗姗<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430079; 2. 时代出版传媒股份有限公司, 安徽 合肥 230071;  
3. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 选择具有代表性的颜色作为光谱重建的训练样本可以有效减少样本冗余, 提高光谱重建精度。采用正交试验方法, 基于色相、明度和饱和度在 Munsell 颜色集中选择具有代表性的颜色样本, 并分析颜色三属性对光谱重建精度的影响。结果表明, 采用主成分分析 (PCA) 法重建得到的反射率与原反射率的平均均方差 (RMS) 最大可达 0.120 4, 而采用违逆 (PSE) 法和 R 矩阵 (R-matrix) 法重建得到的平均 RMS 相对较小。三属性的优先级别 R 极差分析中, 明度明显大于色相和饱和度。颜色三属性对 PCA 法的影响大于对 PSE 法和 R-matrix 法。明度对光谱重建精度的影响较大, 而色相和饱和度对光谱重建精度的影响相对较小。

**关键词:** 训练样本; 颜色三属性; 正交试验; 光谱重建

中图分类号: TS801.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)03-0066-05

## Orthogonal Optimization of Spectral Reconstruction Training Samples Based on Color Properties

HE Chengdong<sup>1</sup>, HUANG Xinguo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shanshan<sup>3</sup>

(1. School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Time Publishing and Media Co., Ltd., Hefei 230071, China;

3. School of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** It could effectively reduce sample redundancy and improve reconstruction accuracy by selecting representative colors as spectral reconstruction training samples. Representative colors were selected as training samples in the Munsell color set by orthogonal experimental method based on color properties, including hue, value and saturation, and the effects of color properties on reconstruction accuracy were analyzed. The results showed that the mean of reflectance RMS could be up to 0.120 4 by PCA method, while it was relatively smaller by PSE method and R-matrix method. Value priority level was greater than the hue and saturation by range analysis. In conclusion, the effects of color properties on PCA method were greater than PSE method and R-matrix method, and value exerted more effects on reconstruction accuracy than hue and saturation.

**Key words:** training sample; color property; orthogonal experiment; spectral reconstruction

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(14C0324), 安徽省博士后研究人员科研活动经费基金资助项目(2015B060), 湖南省印刷媒体虚拟仿真实验教学中心建设基金资助项目(湘教通[2015]274)

作者简介: 何成栋(1990-), 男, 湖北仙桃人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为颜色科学, E-mail: [heironhand@163.com](mailto:heironhand@163.com)

通信作者: 黄新国(1981-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事颜色科学和图像处理等方面的研究,

E-mail: [hxinguo919@126.com](mailto:hxinguo919@126.com)

## 0 引言

多光谱图像信息获取是指利用成像系统将物体表面的颜色信息以光谱数据的形式记录下来,其数据精度受成像系统设备特性和训练样本选择等因素的影响<sup>[1-2]</sup>。基于训练样本的光谱重建方法在光谱图像获取中应用广泛。训练样本作为光谱重建中建立多通道图像信号与光谱反射率之间转换矩阵的基础,其选择对光谱重建至关重要。

在光谱重建中,通常采用颜色覆盖范围广、代表性强的标准色卡作为训练样本,如Munsell色卡、NCS标题色卡、RAL色卡以及Pantone色卡等。但是这些色卡的颜色样本量均较大,如孟赛尔色卡有1 600多个色块,如果直接将其作为训练样本,则训练样本数量过多。样本数量过多,一方面会导致光谱重建的计算量大,耗时长;另一方面会出现训练样本冗余,反而可能降低重建精度,增大重建的波动性。因此,选择数量合适并具有代表性的训练样本对光谱重建的精度至关重要<sup>[3]</sup>。

目前,J. Y. Hardeberg等<sup>[4]</sup>提出了一种基于最小条件数的颜色选择方法,该方法侧重样本之间的无关性;V. Cheung等<sup>[5]</sup>提出了基于样本之间的欧几里得距离最大原则的颜色选择方法;M. Mohammadi等<sup>[6]</sup>提出了聚类分析方法,即将距离最小的聚为一类,再通过反射率向量夹角最小选择最具代表性的样本。以上方法都只考虑了颜色样本在色度空间或者反射率空间中的分布,而没有考虑其颜色视觉特性,因而对物体的色知觉来说未必是最优的。为此,本文采用正交试验方法,并基于色相、明度和饱和度对Munsell颜色集选择具有代表性的颜色样本,并分析颜色三属性对光谱重建精度的影响,探讨颜色样本与颜色视觉特性的关系。

## 1 光谱重建原理

光谱重建是建立相机数字输出值信号和物体表面光谱特性之间的函数关系,并获取拍摄原稿的反射光谱数据的过程。

假设用于数字输出值信号获取的装置由单色CCD相机与 $m$ 个滤色片组成,并且CCD单色通道的光谱响应灵敏度为 $s(\lambda)$ ,带通滤色片的光谱透射率为 $v_i(\lambda)$ ,其中 $i=1, 2, 3, \dots, m$ ;光源的光谱功率分布为 $e(\lambda)$ ,物体的表面反射率为 $r(\lambda)$ ,则通过第 $i$ 个滤色片获得的数字信号为

$$c_i(\lambda) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda)v_i(\lambda)e(\lambda)r(\lambda)d\lambda. \quad (1)$$

式中: $\lambda_{\min}$ 为CCD响应的波长最小值;

$\lambda_{\max}$ 为CCD响应的波长最大值。

实际计算中,上式常采用求和来近似积分,即

$$c_i(\lambda) = \sum_{\lambda} s(\lambda)v_i(\lambda)e(\lambda)r(\lambda)\Delta\lambda. \quad (2)$$

令 $C$ 表示 $m \times 1$ 的相机数字输出值列矢量; $S$ 表示 $n \times n$ 的光谱响应灵敏度对角矩阵,其中各波长的光谱响应灵敏度位于矩阵对角线上; $V$ 表示 $n \times m$ 的滤色片光谱透射率矩阵; $E$ 为 $n \times n$ 的光源的光谱功率分布对角矩阵,其中各波长的光谱功率位于矩阵对角线上; $R$ 为 $n \times 1$ 的光谱反射率列矢量,则上式用矩阵表示即为

$$C = (SV)^T ER, \quad (3)$$

令 $M = (SV)^T E$ ,则上式变为:

$$C = MR. \quad (4)$$

其中 $M = (SV)^T E$ 为相机数字输出值信号和物体表面光谱特性之间的转换矩阵。式(4)即为相机的成像模型。

光谱重建算法就是建立成像模型的反转模型,即利用光谱反射率-相机信号转换矩阵,重建光谱反射率。光谱重建算法可表示为:

$$R' = WC. \quad (5)$$

式中: $R'$ 为重建光谱反射率;

$C$ 为相机数字输出值信号;

$W$ 为光谱反射率-相机信号转换矩阵。

目前用于获取光谱反射率-相机信号转换矩阵 $W$ 的方法主要有维纳法、主成分分析法,这些算法都是基于训练样本计算 $W$ 。

在实际计算中,物体颜色三刺激值 $T$ 和反射率 $r$ 存在以下关系:

$$\begin{cases} X = K \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} e(\lambda)r(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Y = K \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} e(\lambda)r(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda, \\ Z = K \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} e(\lambda)r(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda. \end{cases} \quad (6)$$

式中: $K$ 为调整因子;

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ 为标准色度观察者光谱三刺激值,矩阵形式用 $U$ 表示。

同样,将上式用矩阵形式表示即为:

$$T = KUER. \quad (7)$$

三刺激值是引起视网膜对某种颜色感觉的3种原色的刺激程度之量的表示,即为人眼对光谱的感应值<sup>[7]</sup>,故直接使用三刺激值 $T$ 替代CCD响应值 $C$ ,由公式(5)~(7),可将光谱重建算法表示为

$$R' = WT. \quad (8)$$

## 2 颜色三属性正交试验方案

在孟塞尔颜色体系中,色相分为10种,包括5个主色相和5个中间色相,而每个色相又分为10个等级(1~10)。如:色相为Y,等级为5,即为纯正的黄色。明度(V)等级的分布从0(黑)~10(白)共11个等级。饱和度(C)也被分成许多视觉上相等的等级,主要从0~14,个别可达到20,等级值越大,颜色的饱和度越大。

本试验基于颜色的三属性相互独立,研究颜色属性对光谱重建的影响。首先,从Munsell色卡中的1600个色块中,选择具有代表性的色块。色相(Y)标定其等级为5(如5Y为纯正的红)和10(如10Y为偏绿的黄色)2个等级;明度(V)等级选择具有代表性的2(偏黑),5,8(偏白)3个等级;饱和度(C)选择2(饱和度偏差),6,10(饱和度偏好)3个等级。

本试验中设定3个影响因子,即色相、明度和饱和度。3个影响因子的等级分为2个水平,色相水平表示为5和5&10(包含色相等级为5和10),明度水平表示为5和2&5&8(包含明度等级为2,5,8),饱和度水平表示为6和2&6&10(包含饱和度等级为2,6,10);即可生成二水平正交表 $L_4(2^3)$ <sup>[8]</sup>。试验号代表不同的色块组合,如实验号为2时代表其在

Munsell体系中色相等级为5,明度等级包含2,5,8,饱和度等级包含2,6,10;其中,1号试验的色块数量为10个,2号试验的色块数量为65个,3号试验的色块数量为58个,4号试验的色块数量为49个。

正交试验设计方案如表1所示。

表1 正交试验设计表

Table 1 Orthogonal experimental table

试验号	色相	明度	饱和度
1	5	5	6
2	5	2&5&8	2&6&10
3	5&10	5	2&6&10
4	5&10	2&5&8	6

## 3 正交化实验与结果分析

目前,常见多光谱重建算法可分为基于训练样本的光谱重建算法和基于模型的光谱重建算法两种类型。基于训练样本的光谱重建算法中具有代表性的算法有逆法(pseudo-inverse, PSE)<sup>[9-10]</sup>,R-矩阵(R-matrix)法<sup>[11-12]</sup>等,而基于模型的光谱重建算法主要包含主成分分析法(principal component analysis, PCA)法<sup>[13-16]</sup>等。本文采用逆法、R-矩阵法和主成分分析法3种光谱重建算法,并基于光谱均方差(root mean square, RMS)分析颜色三属性对光谱重建精度的影响。表2列出了颜色三属性的不同组合在3种不同算法下的光谱重建精度正交试验结果。

表2 3种不同算法下的光谱重建精度比较

Table 2 Comparison of reconstruction accuracy among three different algorithms

试验号	均 方 差								
	逆 法			主成分分析法			R-矩阵法		
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差
1	0.028 2	0.194 9	0.025 2	0.120 4	0.343 1	0.075 4	0.026 8	0.187 4	0.024 5
2	0.025 9	0.190 5	0.023 3	0.026 1	0.190 5	0.023 2	0.024 9	0.183 1	0.023 1
3	0.029 3	0.190 3	0.024 0	0.049 3	0.190 7	0.032 5	0.028 0	0.183 0	0.023 3
4	0.027 2	0.195 5	0.024 5	0.027 3	0.195 6	0.024 5	0.026 2	0.187 9	0.024 2

分析表2中的数据可以得知,基于三属性组合的样本,在使用PCA法重建光谱反射率时,会随着组合的不同产生较大的变化,其最大的平均均方差为0.1204,最小的平均均方差为0.0261;特别是1号试验组合,其重建得到的光谱反射率与原始反射率相差较大,在550 nm和670 nm附近的波动性也非常大,标准差达到了最高值,为0.0754;3号试验组合也出现了较大的波动,而2号试验组合和4号试验组合的重建效果相似,波动性相对较小。而使用PSE法重建光谱反射率时,其最大的平均均方差为0.0293,最小的平均均方差为0.0259;使用R-matrix法重建光谱

反射率时,其最大的平均均方差为0.0280,最小的平均均方差为0.0249;由此可见,在这4组试验组合中,以PSE法和R-matrix法重建得到的光谱反射率与原始反射率相比,其波动性较小。以上结果表明,颜色三属性对PCA法的影响大于对PSE法和R-matrix算法的。

针对3种分析法重建光谱中颜色三属性的优先级和主次关系做极差分析, $K_1$ 和 $K_2$ 分别为各影响因素在每个水平下均方差的算术累加和, $R$ 为极差(即 $K_1$ 和 $K_2$ 中3个值中的最大值减去最小值)。极差反映了该影响因素的取值变化对光谱反射率重建精

度的影响程度,极差值越大,说明该影响因素的作用越强。

图1是不同样本组合在PCA法重建2.5B6/8色块和10R7/10色块的反射率效果图。

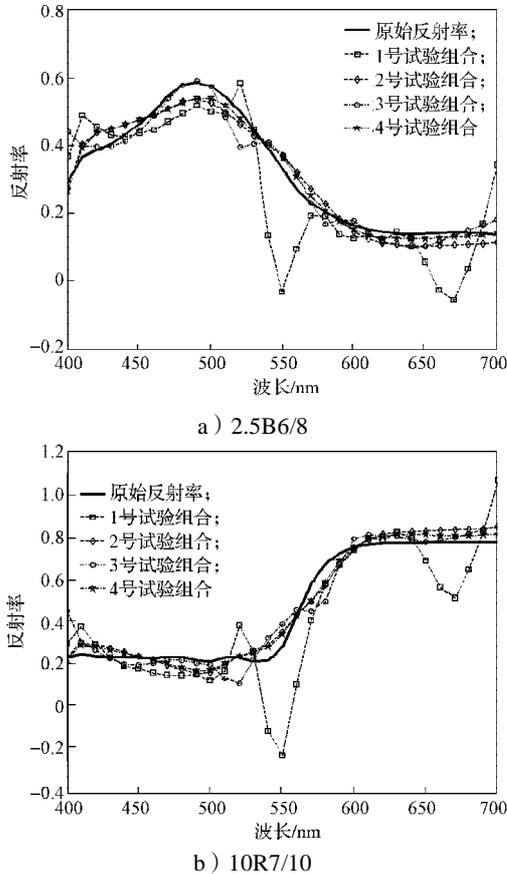


图1 部分色块的光谱反射率曲线

Fig. 1 Part of color block spectral reflectance curve

由图1可以看出,对于1号试验组合,其在波长为在550 nm和670 nm附近的重建反射率偏离原始反射率较大,其次为3号试验组合;2号、4号实验组合重建效果较好,说明不同的试验组合均对PCA重建有很大的影响,表3所示为PCA法的重建效果极差分析。

表3 PCA法重建效果极差分析

Table 3 Range analysis for reconstruction of PCA

试验号	色相	明度	饱和度	均方差
1	5	5	6	0.120 4
2	5	2&5&8	2&6&10	0.026 1
3	5&10	5	2&6&10	0.049 3
4	5&10	2&5&8	6	0.027 3
$K_1$	0.146 5	0.169 7	0.147 7	
$K_2$	0.076 6	0.053 4	0.075 4	
R	0.069 9	0.116 3	0.072 3	
优水平	H2	V2	S2	
主次性	V>C>H			
最优组合	H2V2C2			

分析表3中的数据,在PCA重建方法中,通过对 $K_1$ 和 $K_2$ 的比较,可以得出优水平关系是三属性信息越多,优水平越大,即最优组合为色相等级为5&10,明度等级为2&5&8,饱和度等级为2&6&10;对R极差分析,可以得出 $R_V > R_C > R_H$ 。

同样可以得出,在违逆法和R-matrix法中,均有 $R_V > R_H > R_C$ 。这一结果说明,样本选择中,针对明度的选择比其他两个要素更重要,色相和饱和度的选择重要性类似。

### 4 结论

本文基于颜色三属性正交优化选择光谱重建训练样本,并采用不同的光谱反射率重建算法对重建精度进行了比较分析。结果表明:

1) 主成分分析(PCA)法重建得到的反射率与原反射率的平均均方差(RMS)最大可达0.120 4,而违逆(PSE)法和R矩阵(R-matrix)法重建得到的平均RMS相对较小。

2) 以PCA法重建颜色三属性中,对比色相和饱和度而言,明度对光谱重建精度的影响较大,而色相和饱和度的影响相对较小,且色相和饱和度的主次性比较接近。

3) 在违逆法和R-matrix重建算法中,颜色三属性中主次关系没有PCA分析法中的表现明显。

本文所提出的正交优化样本选择方法,不同的重建算法,其重建效果不同,因而有利于光谱重建算法中有限数量训练样本的针对性优化选择。

### 参考文献:

[1] 刘 振, 万晓霞, 黄新国, 等. 基于宽带多通道的光谱反射率重建方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1076-1081.  
LIU Zhen, WAN Xiaoxia, HUANG Xinguo, et al. The Study on Spectral Reflectance Reconstruction Based on Wideband Multi-Spectral Acquisition System[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1076-1081.

[2] 王海文, 李 杰, 万晓霞, 等. 基于光谱的印刷颜色复制技术研究[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 40-42, 95.  
WANG Haiwen, LI Jie, WAN Xiaoxia, et al. Research on Printing Color Reproduction Technology Based on Spectral Imaging[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 40-42, 95.

[3] 沈会良, 张哲超, 忻浩忠. 光谱反射率重建中代表颜色分步选取方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4):

- 1050-1055.  
SHEN Huiliang, ZHANG Zhechao, XIN John H. Sequential Selection of Representative Color Samples for Spectral Reflectance Reconstruction[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(4): 1050-1055.
- [4] HARDEBERG J Y, SCHMITT F J M, BRETTEL H. Multispectral Color Image Capture Using a Liquid Crystal Tunable Filter[J]. Optical Engineering, 2002, 40(10): 2532-2548.
- [5] CHEUNG V, WESTLAND S. Methods for Optimal Color Selection[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(5): 481-488.
- [6] MOHAMMADI M, NEZAMABADI M, BEMS R S, et al. Spectral Imaging Target Development Based on Hierarchical Cluster Analysis[C]//12th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems. Scottsdale: [s. n.], 2004: 59-64.
- [7] 刘武辉, 胡更生, 王 琪. 印刷色彩学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, 77-80.  
LIU Wuhui, HU Gengsheng, WANG Qi. Printing Color Science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008, 77-80.
- [8] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2003, 10-26.  
REN Luquan. Optimum Design and Analysis of Experiments [M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2003, 10-26.
- [9] 谢德红, 李 蕊, 万晓霞, 等. 基于迭代Tikhonov正规化的三刺激值重建光谱方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 201-205.  
XIE Dehong, LI Rui, WAN Xiaoxia, et al. Iterated Tikhonov Regularization for Spectral Recovery from Tristimulus[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1): 201-205.
- [10] 闫丽霞, 吴 凡. 线性与非线性成像系统下的多光谱重建研究[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(3): 207-210.  
YAN Lixia, WU Fan. Study on Multispectral Reconstruction Based on Linear and Nonlinear Imaging System[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(3): 207-210.
- [11] 刘 振. 面向复制的多光谱图像获取技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.  
LIU Zhen. Research on Reproduction-Oriented Multispectral Image Acquisition Technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [12] ZHAO Y, BERNS R S. Image-Based Spectral Reflectance Reconstruction Using the Matrix R Method[J]. Color Research and Application, 2007, 32(5): 343-351.
- [13] TZENG D Y, BERNS R S. A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology[J]. Color Research and Application, 2005, 30(2): 84-98.
- [14] 王一帆, 唐正宁. 基于PCA和ICA的多光谱数据降维方法[J]. 光学技术, 2014, 40(2): 180-183.  
WANG Yifan, TANG Zhengning. Dimensionality Reduction Method Based on Combination of PCA and ICA [J]. Optical Technique, 2014, 40(2): 180-183.
- [15] 杨晓莉. 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 Xiaoli. 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.
- [16] FAIRMAN H S, BRILL M H. The Principal Components of Reflectances[J]. Color Research and Application, 2004, 29(2): 104-110.

(责任编辑: 廖友媛)