

# 基于数码相机的光谱重构研究

陈奕艺<sup>1</sup> 徐海松<sup>1</sup> 张显斗<sup>1</sup> M. Ronnier Luo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027  
<sup>2</sup>Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

**摘要** 由数码相机信号直接重构物体表面的光谱信息对不同照明条件下颜色的复现十分重要。基于普通商用数码相机分别摄取两种 CIE 标准光源 D65 和 A 下颜色样品的 RGB 信号,采用主元分析法(PCA)和多项式模型的综合算法进行物体表面色光谱反射比的重构研究。实验结果表明,同时应用两种光源下的 RGB 信号可有效提高光谱重构精度,并能较好地再现色样的同色异谱特性。

**关键词** 光谱学; 光谱重构; 主元分析法; 多项式模型; 数码相机信号; 双光源

**中图分类号** TP334.2<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092905.1416

## Study of Spectral Reconstruction Based on Digital Camera

Chen Yiyi<sup>1</sup> Xu Haisong<sup>1</sup> Zhang Xiandou<sup>1</sup> M. Ronnier Luo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China  
<sup>2</sup>Department of Colour Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

**Abstract** Directly recovering the spectral information of surface colors using digital camera signals is important for color reproduction under various illuminating conditions. The RGB signals for color samples were obtained by a commercial digital camera under two different CIE illuminants, D65 and A, to reconstruct their corresponding spectral reflectance based on the algorithm combining principal component analysis(PCA) and polynomial model. The experimental results indicate that the spectral reconstruction accuracy could be improved by simultaneously utilizing the RGB signals under the two illuminants, in which case the metameric characteristics of color pairs could also be well reproduced.

**Key words** spectroscopy; spectral reconstruction; principal component analysis(PCA); polynomial model; digital camera signals; dual illuminants

## 1 引 言

作为物体表面颜色信息最全面准确描述方式的光谱反射比适于保真传输和再现,在远程传输、纺织印染、彩色印刷、艺术品维护和还原等方面具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。自然物体表面的光谱反射比大多是连续的,并能用几个基本向量的线性组合来表示<sup>[2]</sup>,由此可通过有限维的线性模型来重构颜色的光谱反射比,从而有效降低预测空间的维数,减少重构过程

的复杂程度。主元分析法能充分提取颜色样品光谱反射比的特征,并成功应用于多种成像设备的颜色光谱重构<sup>[3]</sup>,为该类方法的典型代表。

分光光度计可准确地直接获取色样的光谱反射比,但难以对非平面表面进行非接触式的测量,而且即使能测量小面积的色块但工作效率很低,因此限制了其在复杂图像方面的应用。另一方面,数码相机能在多种光照条件下进行物体表面的非接触式拍

**收稿日期:** 2008-04-14; **收到修改稿日期:** 2008-09-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(60578011)资助课题。

**作者简介:** 陈奕艺(1983—),男,硕士研究生,主要从事颜色与影像科学等方面的研究。E-mail: windtrace.cyy@hotmail.com

**导师简介:** 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色与影像科学、光辐射测量、光电技术、光学工程等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

摄,也适用于对复杂图像进行像素级水平的颜色信息采集,所以基于数码相机的 RGB 信号重构颜色的光谱反射比是目前颜色科学中图像技术的研究热点。当然,由于数码相机的颜色通道数有限,输出响应呈非线性,且易受周围环境的影响,故其光谱重构精度受到一定的制约。虽然多光谱技术能增加颜色传感器的通道数以提高重构精度<sup>[4,5]</sup>,但专业设备的昂贵成本限制了其应用的普及。另外,在利用数码相机信号进行光谱重构时,通常会先将该信号转换成相应的 CIEXYZ 三刺激值,即数码相机的特征化处理,然后再采用预测的三刺激值重构颜色样品的光谱反射比。尽管以三刺激值来重构光谱精度较高,但特征化过程的增加却容易导致更多的系统误差。本文利用普通商用数码相机采集两种 CIE 标准光源(D65 和 A)下色样的 RGB 信号,结合主元分析法(PCA)和多项式模型来直接重构物体表面色的光谱反射比,并对重构光谱的精度及同色异谱特性进行了实验评价和讨论。

## 2 光谱重构算法

### 2.1 主元分析法

假定物体表面颜色的光谱反射比  $\mathbf{r}$  是一个  $n$  维列向量,则  $q$  个光谱反射比样本可组成一个向量组  $\mathbf{R}$ ,并满足  $\mathbf{R} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_q\}$ 。通过统计分析及线性运算可获得向量组  $\mathbf{R}$  中的  $k$  个非零基本特征向量  $\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_k]$ ,其中  $k < n$ ,使得  $\mathbf{R}$  中任意光谱反射比样本  $\mathbf{r}$  均可以通过下式进行预测<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{E} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{r}_0$  为向量组  $\mathbf{R}$  中所有光谱反射比的平均向量,  $\mathbf{A} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k]^T$  中各参数为相应的比例系数,即主元。

### 2.2 多项式模型

在一定的照明和观察条件下,利用数码相机可获得物体表面颜色所对应的三色通道信号,即  $r, g, b$ ,其组成的信号向量  $\mathbf{p} = [r, g, b]^T$  能与对应光谱反射比的主元向量  $\mathbf{A}$  建立简单的线性转换关系,并以转换矩阵  $\mathbf{A}$  表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{p}, \quad (2)$$

由此可利用信号向量  $\mathbf{p}$  预测主元向量  $\mathbf{A}$ <sup>[7]</sup>。

信号向量  $\mathbf{p}$  具有可扩展性,即通过添加更多的项如  $r^2, g^2, b^2$  等来提高转换矩阵  $\mathbf{A}$  的精度<sup>[8]</sup>。在本研究中,当采用单光源(D65 或 A)照明下所得数码相机 RGB 信号时,在多项式拟合模型中采用 11 项的信号向量:

$\mathbf{p}_s = [1, r, g, b, rg, rb, gb, r^2, g^2, b^2, rgb]$ 。如果照明光源改变时其基本通道信号变成  $r', g', b'$ ,则转换矩阵也将随之变化。

当同时采用两种光源(D65 和 A)照明下对应的数码相机信号时,等效于数码相机的基本通道数增至 6 个,参照单光源照明情况对信号向量进行扩展,便得到 24 项的信号向量:

$$\mathbf{p}_d = [1, r, g, b, r', g', b', rg, rb, gb, r'g', r'b', g'b', rr', gg', bb', r^2, g^2, b^2, r'^2, g'^2, b'^2, rgb, r'g'b'],$$

其中  $r, g, b$  和  $r', g', b'$  分别为对应于两种光源下采得的数码相机三色通道信号。

## 3 实验

### 3.1 实验样本及过程

用于实验的颜色样本来自于 GretagMacbeth 公司的两套标准色卡 ColorChecker DC(简称 DC, 237 色)和 ColorChecker Color Rendition Chart(简称 RC, 24 色)以及 3 对自制的纺织品同色异谱色对(紫、蓝、粉, Metameric)。利用 X-Rite 分光光度计 SP64 在 400~700 nm 波长范围内以 10 nm 为采样间隔测得各个样本的光谱反射比。采用 Sony 公司的 SDC-S75 型商用数码相机在 SpectraLight III 型标准灯箱中对各色样进行拍摄,分别获得色样在 D65 和 A 光源下对应的数码相机三色通道 RGB 信号值;然后,对摄得的 RGB 信号进行非线性校正和照明均匀性校正,并归一化至  $[0, 1]$  范围。

选取 DC 色卡中的一半(共 78 个)有彩色样作为训练样本,分别以 DC 色卡中的全部有彩色样(156 个)、RC 色卡中的全部色样以及 3 对同色异谱色对作为检验样本,应用主元分析法和多项式模型相结合的算法技术来重构所有检验样本的光谱反射比。

### 3.2 光谱重构结果与分析

本实验中共设有三种光源模式,即 D65 光源下的 RGB 信号(以 D 表示)、A 光源下的 RGB 信号(以 A 表示)以及两者的组合双光源模式(以 M 表示)。表 1 给出了应用 PCA 与多项式模型的结合算法重构各组检验样本光谱反射比的实验结果,并对每组检验样本在三种光源模式下的光谱重构精度进行了比较。表中的均方根误差( $e_{\text{RMS}}$ )评价了预测与真实光谱反射比之间的物理匹配程度,而不同光源照明条件下的 CIEDE2000 色差  $\Delta E_{00}$  (采用 CIE1931 标准色度观察者)则反映了两光谱间的色度差异,其中  $\Delta E_{00\_D65}$  和  $\Delta E_{00\_A}$  分别表示两光谱在标准照明体 D65 和 A 下的 CIEDE2000 色差。

表 1 以 DC 色样为训练样本对不同检验样本的光谱重构实验结果及其在三种光源模式下的比较  
Table 1 Experimental results and their comparison of spectral reconstruction for DC as training samples and different testing colors under 3 kinds of illuminant modes

Testing sample	Illuminant mode	$e_{\text{RMS}}$		$\Delta E_{00\_D65}$		$\Delta E_{00\_A}$	
		Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
DC	M	0.0212	0.1031	1.7740	6.2280	1.5754	4.8728
	D	0.0275	0.0905	2.1894	6.1838	2.1072	6.2015
	A	0.0285	0.1361	3.8359	13.4181	3.5739	11.8440
RC	M	0.0309	0.0910	3.3715	6.2193	3.0621	6.4136
	D	0.0336	0.0684	3.1065	5.4779	3.1788	5.9540
	A	0.0341	0.0589	5.2849	13.5283	4.9467	9.1337
Met	M	0.0890	0.1253	2.4553	5.3001	2.0478	5.1317
	D	0.0902	0.1491	2.3995	4.2952	2.5406	4.8687
	A	0.0897	0.1321	4.7879	8.4066	2.7815	5.9839

由表 1 可见,双光源模式(M)下的光谱重构精度优于单光源模式(D或A),其原因是数码相机的等效颜色通道数从单光源模式时的 3 个增加到双光源模式下的 6 个,从而使光谱反射比重构时的训练数据信息更加充分。

由于 D65 光源在整个可见区的光谱功率分布相对比较均匀,使数码相机三色通道的响应输出均达到较高水平;而 A 光源的光谱能量主要分布在长波段区域,以致偏蓝绿颜色对应的数码相机通道响应信号明显偏低,精度也差。所以,由表 1 可见,在光源模式 A 下的光谱重构色差大于模式 D 的结果。同样,受到 A 光源下 RGB 信号精度不高的影响,在双光源模式 M 下的光谱重构精度虽然相对最好,但

在 D65 下的色差评价性能却未能改善(如表 1 中分别以 RC 色样和同色异谱色对为检验样本的结果)。

对于以 RC 色卡为检验样本的情形,因 RC 与 DC 色卡的基底和颜料相似,故其重构光谱反射比与对应真实曲线之间的均方根差较小,但其在视觉敏感波段(450~600 nm)光谱反射比之间的细小差异仍导致了相对明显的色差,如图 1(a)所示;而 3 对同色异谱色样与 DC 色卡的基底、色料及制作工艺差别很大,故其重构光谱反射比与对应真实值之间在 600~700 nm 范围内存在明显的匹配误差并使  $e_{\text{RMS}}$  偏大,但该光谱区对于标准色度观察者的光谱特性并不敏感,所以引起的评价色差却较小,见图 1(b)。

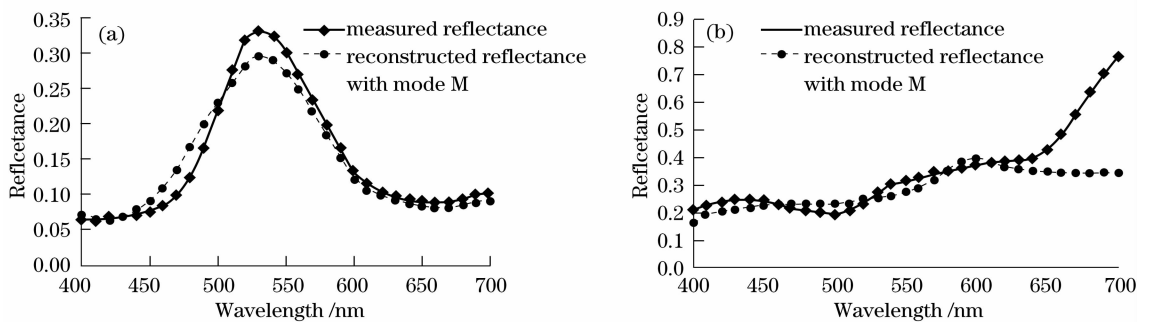


图 1 检验样本重构光谱反射比例例(a)RC 色卡,(b)同色异谱色样

Fig. 1 Examples of reconstructed spectral reflectance for testing samples.

(a) Samples from RC, (b) samples from metameric color pairs

### 3.3 同色异谱特性讨论

当对同色异谱色对进行光谱重构时,除了分析其重构精度之外还需考察其同色异谱特性的变化情况,这里采用同色异谱色对中样品之间色差的变化量  $E$  来予以评价:

$$E = [(\Delta L_m^* - \Delta L_r^*)^2 + (\Delta a_m^* - \Delta a_r^*)^2 + (\Delta b_m^* - \Delta b_r^*)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $\Delta L_m^*$ ,  $\Delta a_m^*$ ,  $\Delta b_m^*$  和  $\Delta L_r^*$ ,  $\Delta a_r^*$ ,  $\Delta b_r^*$  分别代表同色异谱色对中两个样品之间光谱反射比的测量值(下标“m”)和重构值(下标“r”)对应的在 CIELAB 颜色空间中的  $L^*$ ,  $a^*$  和  $b^*$  参数的分项色差。

以 D65 作为参照照明体,根据实测光谱反射比可计算出本实验中所用 3 对同色异谱色样在测试照明体 A 下的照明体同色异谱指数(列于表 2 的

“Measurement”栏中)。作为对比,表中同时给出了同色异谱色对在不同光源模式下光谱重构后的对应同色异谱指数。可见,双光源模式 M 下重构得到的结果与实际测量值的平均水平最为接近,误差很小

表 2 同色异谱色对的照明体同色异谱指数

Table 2 Illuminant metamerism index of the metameric pairs

Mode	Purple	Cyan	Pink	Mean
Measurement	4.2747	4.4866	5.5709	4.7774
M	4.6422	3.0413	5.8475	4.5103
D	2.4703	3.3182	7.0733	4.2873
A	7.1729	4.1262	16.2466	9.1819

由(3)式计算得到同色异谱色对中两样品之间色差在光谱重构后相对于其实测值的变化结果,如表 3 所示。可见,光源模式 D 下的光谱重构色对在 D65 下的色差变化较小,但在 A 光源下色差变化量较大;当在模式 A 下重构时其在 A 光源下的结果优于 D65 情况,但都劣于模式 D 的性能。只有以光源模式 M 进行光谱重构时,在两种照明体 D65 和 A 下都具有较小的色对色差变化量,即同色异谱色对在模式 M 下光谱重构后能较好地保持原有的同色异谱特性。

表 3 同色异谱色对的两样品之间实测与重构色差之变化量

Table 3 Difference of color difference between measured and reconstructed metameric pairs

Illuminant mode	M	D	A
D65	2.9830	2.7315	9.8224
A	2.2579	4.7261	4.0391

## 4 结 论

本文采用主元分析法和多项式模型的结合算法,利用在 CIE 标准照明体 D65 和 A 下的数码相机

RGB 信号来直接重构物体表面颜色的光谱反射比,并分别对两种单光源以及双光源模式下的光谱重构精度与同色异谱特性进行了比较和评价。实验表明,双光源模式能有效提高光谱重构精度,且重构色对的同色异谱指数及色对中样品间的色差均与实测值最为接近,表明该方法可有效再现原有色样的同色异谱特性。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Youxi, Li Yunsong, Wu Chengke. Environmental satellite multispectral images compression algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 336~340
- 2 周有喜,李云松,吴成柯. 环境卫星多光谱图像压缩算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 336~340
- 3 J. L. Dannemiller. Spectral reflectance of natural objects: how many basis functions are necessary? [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(4): 507~515
- 4 Zou Wenhui, Xu Haisong, Wang Yong. Spectral reconstruction of images based on color scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 859~863
- 5 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, **27**(5): 859~863
- 6 N. Shimano, K. Terai, M. Hironaga. Recovery of spectral reflectances of objects being imaged by multispectral cameras [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(10): 3211~3219
- 7 Ren Penyuan, Liao Ningfang, Chai Binghua *et al.*. Spectral reflectance recovery based on multispectral imaging [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 427~429
- 8 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
- 9 H. S. Fairman, M. H. Brill. The principal components of reflectances [J]. *Color Research and Application*, 2004, **29**(2): 104~110
- 10 Xiandou Zhang, Haisong Xu. Reconstructing spectral reflectance by dividing spectral space and extending the principal components in principal component analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(2): 371~378
- 11 G. Hong, M. R. Luo, P. A. Rhodes. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modelling [J]. *Color Research and Application*, 2007, **26**(1): 76~84