

面向颜色再现的光谱降维方法研究

刘攀¹, 刘真¹, 吴光远¹, 楚高利²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 河南工程学院, 郑州 450007)

摘要: **目的** 为了解决颜色信息光谱反射率的高维数给颜色再现过程带来的诸多问题。**方法** 利用主流的光谱降维方法(主成分分析, LabPQR, WSPCA, WSPCAplus), 实现利于颜色再现的光谱信息筛选, 从光谱精度、色度精度及变光源色差稳定性等3个方面评价这些降维方法。**结果** 实验证明, 主成分分析(PCA)法的光谱精度最高, 光谱误差只有0.0076, 但是在色度精度及变光源色差稳定性方面表现不好; LabPQR法在光谱精度和色度精度间达到了很好的平衡, 但是当变换光源时, 其色差稳定性较差; WSPCA法去除了光源的影响, 其变光源后色差变化不大, 并且同时兼顾了色度精度, 但以牺牲光谱精度为代价, WSPCAplus在其基础上将光谱精度提高为0.0081。**结论** 研究结果对颜色再现过程中降维方法的选择具有一定的指导作用。

关键词: 光谱降维; 主成分分析; LabPQR; WSPCA

中图分类号: TS801 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)03-0119-05

Spectral Dimension Reduction Methods for Color Reproduction

LIU Pan¹, LIU Zhen¹, WU Guang-yuan¹, CHU Gao-li²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China)

ABSTRACT: To solve the problems in color reproduction process caused by the high dimension number of the color spectral reflectance information. Several mainstream spectral dimension reduction methods including principal component analysis, LabPQR, WSPCA and WSPCAplus were used to realize the spectral information filtering for color reproduction. Then these dimension reduction methods were evaluated from the aspects of spectral accuracy, colorimetric accuracy and color difference stability in transformation of the light source. The experiment proved that the spectral accuracy of PCA was the highest, the spectrum error was only 0.0076, but its performance in colorimetric accuracy and color difference stability in transformation of the light source was not good. LabPQR achieved a good balance between spectral accuracy and colorimetric accuracy, but the color difference was not stable when the light source was changed. WSPCA eliminated the influence of light source to keep the stability of the color difference, and guaranteed the colorimetric accuracy at the same time, but it sacrificed the spectral accuracy. Based on WSPCA, WSPCAplus improved the spectral accuracy to 0.0081. The results have a certain referencing value for the selection of dimension reduction method in color reproduction process.

KEY WORDS: spectral dimension reduction; principal component analysis; LabPQR; WSPCA

光谱反射率反映了图像颜色最基本的信息, 相对于色度复制^[1-2], 光谱颜色再现^[3-5]消除了同色异谱^[6-7]的影响, 在任何光照环境下都能实现原稿和复制品的颜色匹配, 更能够达到“所见即所得”的目的。光谱图

像包含波长为380~780 nm的光谱反射率, 面向颜色复制的光谱反射率最少维度为31维, 即在400~700 nm之间每隔10 nm进行采样。相比传统RGB图像的3维数据, 直接将31维光谱信息用于图像色彩再现时, 会

收稿日期: 2014-06-29

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

作者简介: 刘攀(1990—), 男, 湖南张家界人, 上海理工大学硕士生, 主攻色彩管理及颜色科学。

通讯作者: 刘真(1953—), 女, 江西莲花人, 上海理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数字印前图文信息处理、颜色再现理论与应用、数字印刷。

占用更大的存储空间,计算复杂度更高,并导致运算效率低下。为了解决上述问题,光谱降维^[8-10]应运而生,通过降维将高维数据降到低维空间,可以更加高效并且精确地实现颜色再现。如今,对光谱图像降维是光谱图像颜色再现的一项关键技术。

当前,主流的几种面向颜色再现的光谱降维方法有主成分分析法(PCA)^[11-12]、LabPQR法^[13-14]、WSP-CA\WSPCAplus法^[15]。这些方法从不同的角度,对源光谱数据进行筛选和降维。在此,通过理论分析和实验论证,对上述降维方法进行了深入研究和对比。

1 几种主流面向颜色再现的光谱降维方法

1.1 主成分分析法

主成分分析法是一种线性降维模型,它从高维光谱数据里提取几个基向量(也称为主成分),以保留原始光谱的大部分信息,而忽略其他不重要的信息,从而实现高维空间到低维空间的转换,简化原始数据。

假设 n 个样本颜色的 m 维光谱反射率信息表示为:

$$\mathbf{R}=[\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \cdots, \mathbf{S}_n]=\begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{1m} & \cdots & s_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{S}_i(i=1, 2, \cdots, n)$ 表示第 i 个样本; $s_{ij}(j=1, 2, \cdots, m)$ 表示第 i 个样本在第 j 个波段的采样。

通过提取其 p 个主成分 $\mathbf{E}=[e_1, e_2, \cdots, e_p]$,可以实现颜色光谱信息的降维,并保留大部分的主要信息, $\mathbf{E}$ 是 $m \times p$ 矩阵,其列向量之间没有相关性,消除了源光谱数据的信息冗余。源光谱信息可以用主成分线性表示: $\hat{\mathbf{R}}=\mathbf{E} \times \mathbf{B}, \mathbf{B}=[b_1, b_2, \cdots, b_n], b_i$ 是 p 维列向量。

1.2 LabPQR降维法

LabPQR法是专门用于颜色匹配的非线性降维法,它将高维光谱数据降至六维空间,前3维表示光谱反射率在特定光照、观察者条件下的色度信息,用以提高色度精度,后三维表示光谱信息,用以对光谱误差进行补偿,提高光谱精度。

LabPQR六维空间见图1,包含Lab坐标空间和PQR坐标空间等2部分。其中,Lab空间与色度系统中的Lab空间不同,LabPQR六维空间中1个Lab值不是1个点,而代表了1个同色异谱集合,可以用PQR空间表示。处于同一PQR空间不同位置上的点拥有相同

的色度信息,但是光谱反射率互不相同。

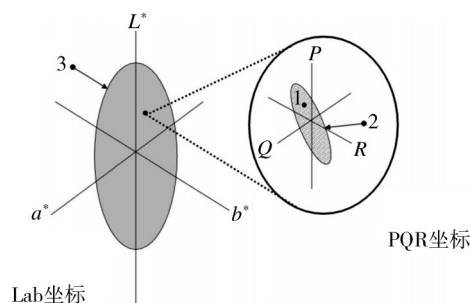


图1 LabPQR六维空间

Fig.1 LabPQR six-dimensional space

对光谱反射率 S 可以通过式(2)计算特定光照及标准观察者条件下的三刺激值 T ,再通过 T 计算Lab值构成低维空间的前3维,用以保证色度精度。

$$X=K, Y=K, Z=K \quad (2)$$

从数学的角度分析三刺激值的计算其实是矩阵转换的过程: $T=D \times S$,通过矩阵的逆变换可以由三刺激值估算原始光谱 $\hat{S}$ 。由于同色异谱情况的存在, S 和 $\hat{S}$ 之间存在误差 $S_e=S-\hat{S}$,为了补偿光谱误差,对 S_e 进行主成分分析,提取其前3个主成分构成低维空间的后3维,用以保证光谱精度。

1.3 WSPCA和WSPCAplus降维法

WSPCA法采用非线性降维思想,根据人眼视觉系统特征,提出一种加权光谱主成分分析方法,见式(3)。其中, W 表示加权系数, $R_{\text{weight}}(R_w)$ 表示加权后光谱反射率, $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y, \mathbf{D}_z$ 都是对角矩阵,对角线元素分别为CIE标准观察者色匹配函数 $\bar{x}, \bar{y}$ 和 $\bar{z}$ 。CIE标准观察者色匹配函数见图2。

$$W=\sqrt{(\mathbf{D}_x^2 + \mathbf{D}_y^2 + \mathbf{D}_z^2)} \quad (3)$$

$$R_w=WR$$

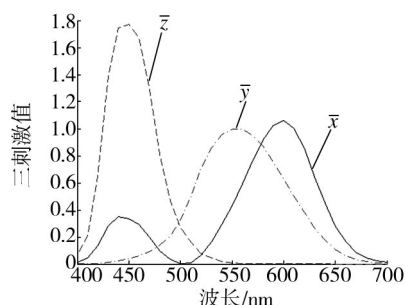


图2 CIE标准观察者色匹配函数

Fig.2 CIE standard observer color matching function

用CIE标准观察者色匹配函数对源光谱进行加

权,有效地将光谱信息与人眼视觉特性结合,从而更加符合人眼视觉匹配。对加权光谱采用PCA方法降维,可以提高降维的色度精度,并且去除光照影响,提高了变光源的色差稳定性,但需要牺牲光谱精度为代价。

WSPCAplus 法思想与 WSPCA 法一致,保留了 WSPCA 法较高的色度精度和变光源的色差稳定性,同时针对光谱误差进行主成分分析,从而以光谱补偿的方法提高了光谱精度。

2 实验及分析

为了对主流面向颜色再现光谱降维方法的表现效果进行评价,进行如下实验。实验中光谱反射率样本集采用已有的 1269 个 munsell 色块,其在 400~700 nm 之间每隔 10 nm 采样,数据维数为 31 维。为了保证实验的一致性,所有降维方法都降至六维空间。

评价标准包含光谱精度、色度精度及变光源色差稳定性等 3 个方面,前者评价采用光谱均方根误差(S_{RMS}),见式(4);后二者评价均采用 CIELAB 标准色差公式 ΔE_{ab} 。

$$S_{RMS}=\sqrt{\frac{\sum_{\lambda=400}^{\lambda=700}(r(\lambda)-\bar{r}(\lambda))^2}{31}}$$

(4)

实验中采用的变换光源为 CIE 标准照明体 D50, D65, A, F2。LabPQR 降维法的变换矩阵与光照环境有关,这里在 D50 光照下求得其变换矩阵,其他光源环境均采用此变换矩阵进行降维。

对 1269 个 munsell 色块的光谱数据采用以上方法降维,然后重构得到近似光谱,计算源光谱和近似光谱的光谱误差,光谱误差分布见图 3。具体的光谱误差对比见表 1。

从图 3 可以看出,PCA 降维方法的光谱误差主要分布在 0.015 以内,光谱精度最高;LabPQR 和 WSPCAplus 法的光谱精度大致相同,比 PCA 稍低,其误差主要分布在 0.03 以内;WSPCA 法的光谱精度最差,误差在 0.01~0.09 之间都有分布。

表 1 是上述降维方法的平均光谱精度和最大光谱精度表现,可以看到 PCA 的平均光谱误差只有 0.0076,最大误差也只有 0.0303,光谱精度非常高。LabPQR 和 WSPCAplus 法的平均光谱误差比较接近,都只有 0.008 左右。WSPCAplus 的最大误差表现优于 LabPQR 法,WSPCA 法的平均和最大光谱误差远高于其他方法,效果最差。

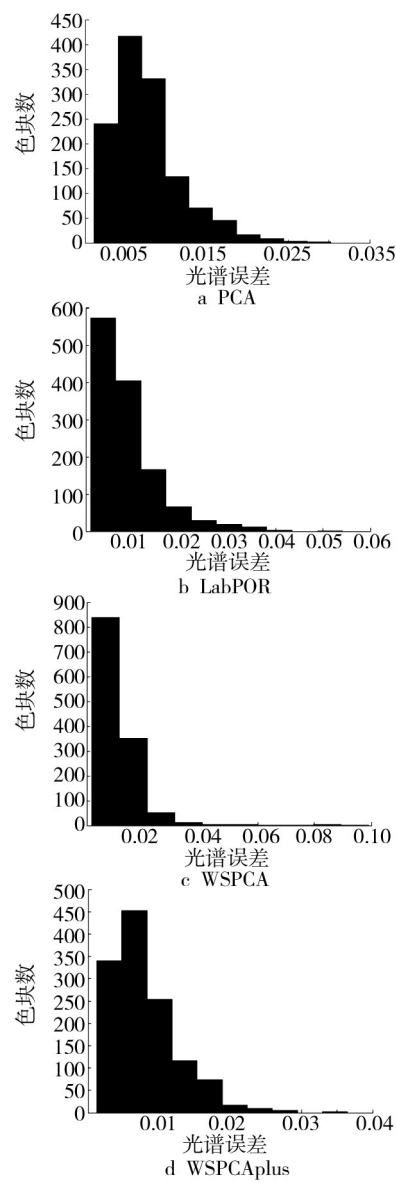


图3 主流降维方法的光谱误差分布

Fig.3 Spectrum error distribution of mainstream dimension reduction methods

表 1 主流降维方法的光谱精度比较

Tab.1 The spectral precision comparison of mainstream dimension reduction methods

降维方法	平均光谱误差	最大光谱误差
PCA	0.0076	0.0303
LabPQR	0.0088	0.0542
WSPCA	0.0111	0.0990
WSPCAplus	0.0081	0.0365

分析光谱误差表现不同的原因,可能有以下因素。

1) PCA 方法对源光谱提取了前 6 个最主要的主成分,能够保留大部分的信息,被抛弃的信息属于冗

余信息或者不重要信息,对光谱精度影响不大,因而 PCA 法的光谱误差最小。

2) LabPQR 法由三刺激值通过矩阵转换得到估算光谱,估算光谱和原始光谱之间存在比较大的误差,但是 LabPQR 法通过对光谱误差提取主成分以进行光谱补偿,也能够得到比较理想的光谱精度。

3) WSPCA 法也是对光谱信息提取前 6 个最主要的主成分,但是这里的光谱信息是对源光谱加权后的信息,因此与源光谱误差较大,光谱精度最低。

4) WSPCAplus 法的思想与 WSPCA 法一致,但是也对光谱误差进行了补偿,因而有比较好的光谱精度。

通过源光谱和近似光谱,由式(2)计算 D50 光源下和其他光源下的三刺激值,然后再转换成 Lab 值计算色差 ΔE_{ab} ,结果见表 2 和表 3。

表 2 主流降维方法在 D50 下的色度精度比较

Tab.2 The colorimetric accuracy comparison of mainstream dimension reduction methods under D50

降维方法	平均及最大色度误差
PCA	0.8061,5.3197
LabPQR	0,0
WSPCA	0.5801,8.2031
WSPCAplus	0.6136,8.3317

表 3 主流降维方法在多个光源下的色度精度比较

Tab.3 The colorimetric accuracy comparison of mainstream dimension reduction methods under several light

降维方法	平均及最大色度误差		
	D65	A	F2
PCA	0.8842,5.4010	0.5420,4.0464	0.7159,8.0343
LabPQR	0.0816,1.0770	0.2553,4.0891	0.5284,7.6230
WSPCA	0.5910,8.5301	0.5435,8.4617	0.4328,6.9627
WSPCAplus	0.6089,8.2430	0.5981,8.1646	0.4774,6.3149

从表 2 可以看出,PCA 法的平均色度误差最大,其色度精度最低;LabPQR 法的转换矩阵在 D50 光源下得到,因此它的最大及平均色差均为 0;WSPCA 和 WSPCAplus 法的色度精度比较接近,平均色差分别为 0.5801 和 0.6136。原因包括以下几方面。

1) PCA 法的目标是最大程度保留光谱信息,没有考虑色度匹配,因而其色差表现最差。

2) LabPQR 法前 3 维表示色度值,用来兼顾色度信息,其色差最小。

3) WSPCA 和 WSPCAplus 用 CIE 标准观察者色匹配函数对源光谱进行加权,考虑了人眼视觉匹配,因

此色度精度也较高。

从表 2 和表 3 可以看出,变换光源后 PCA 和 Lab-PQR 法的色差起伏都比较大,色差稳定性不好;而 WSPCA 和 WSPCAplus 法在变换光源时的平均色差和最大色差都比较接近,即其色差稳定性很好。其原因主要是 WSPCA 和 WSPCAplus 对原始光谱进行加权的同时去除了光源的影响。

3 结语

综合分析了几种主流面向颜色再现的降维方法,包括主成分分析(PCA)法、LabPQR 法、WSPCA 及 WSPCAplus 法,并从光谱精度、色差精度以及变光源色差稳定性等 3 个方面通过实验进行了对比评价。实验中发现,主成分分析法追求最大程度保留原始光谱信息,没有考虑色度匹配,其色度精度较低,不适合要求色度精度很高的场合;LabPQR 法用前 3 维表示色度信息,后 3 维表示光谱补偿信息,同时兼顾了色度精度和光谱精度,是比较好的面向颜色再现的降维方法,但是在变换光源时其色差稳定性不好;WSPCA 和 WSPCAplus 法,通过对原始光谱用 CIE 标准观察者色匹配函数进行加权,提高了色度精度,同时消除了光源影响,在多种光源下都可以保持比较稳定的色差,但是 WSPCA 的光谱精度不高,WSPCAplus 在其基础上对光谱误差进行补偿,提高了光谱精度。实验结果对基于光谱复制的颜色再现过程中降维方法的选择具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 唐正宁,车永华,刘涛,等. 基于 ICC 标准的打印机色彩管理研究[J]. 包装工程,2007,28(10):123—124.
TANG Zheng-ning, CHE Yong-hua, LIU Tao, et al. Study of the Color Control of Printer Based on ICC Standard[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 123—124.

[2] 周倩,刘真,朱明. 3 种主流分色算法的误差分析[J]. 包装工程,2011,32(7):107—111.
ZHOU Qian, LIU Zhen, ZHU Ming. Errors Analysis of Three Major Color Separation Algorithms[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 107—111.

[3] 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.
WANG Hai-wen, LI Jie, WAN Xiao-xia, et al. Research on the Printing Color Rep-rodution Technology Based on

- JIN Yan, JI Gang. Study of Packaging Information Processing Method Based on Data Warehouse and Data Mining Technology[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 148—150.
- [7] XIA Da-hai, WANG Ji-hui, SONG Shi-zhe, et al. The Corrosion Behavior of Lacquered Tinplate in Functional Beverage[J]. Advanced Materials Research, 2011, 233: 1747—1751.
- [8] 龚经强. 大力推进信息化提升包装产业竞争力[J]. 中国包装工业, 2004(12): 20—23.
- GONG Jing-qiang. More Information to Promote the Competition of the Enterprises[J]. China Packaging Industry, 2004(12): 20—23.
- [9] 袁艳, 赵美宁. 运输包装设计信息查询系统的研究与开发[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 72—75.
- YUAN Yan, ZHAO Mei-ning. Development of Transport Package Information Query System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 72—75.
- [10] SHAH Li-jun, MU Lin. Parametric Design of Anchoring Packaging Machine Based on Pro/E Secondary Development Technology[J]. Mobile Congress, 2010(3): 1—5.
- [11] REN Yi-wei, REN Xia. Interpretation of Parametric Design[J]. Computer-aided Industrial Design & Conceptual Design (CAIDCD), 2010(2): 1458—1461.
- [12] 张志刚, 林永君. 浅析管理信息系统[J]. 数字技术与应用, 2011(4): 157—162.
- ZHANG Zhi-gang, LIN Yong-jun. Analysis of Management Information Systems[J]. Digital Technology and Application, 2011(4): 157—162.
- [13] LIN Jiang, LOU Jiang-you, XU Xiao-juan. Development of the Network Design System of Product Package[J]. Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2006(6): 1—4.
- [14] 魏风军, 魏丰杰, 高宗雷. 包装行业信息化及我国发展策略探讨[J]. 华夏星火, 2005(9): 30—32.
- WEI Feng-jun, WEI Feng-jie, GAO Zong-lei. Study of the Informationization Development Strategy of Packaging in China[J]. Huaxia Spark, 2005(9): 30—32.
- [15] 孟祥钊. 中国包装行业的信息化[J]. 中国包装, 2009(3): 18—20.
- MENG Xiang-zhao. The Informationization of Packaging Industry in China[J]. China Packaging, 2009(3): 18—20.
-
- (上接第 122 页)
- Spectral Imaging[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 40—42.
- [4] 张显斗, 王强, 杨根福, 等. 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, WANG Qiang, YANG Gen-fu, et al. Key Technologies Review of the Spectral Color Management System[J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(1): 10—17.
- [5] 王海文. 多光谱颜色复制的关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- WANG Hai-wen. Research on Key Technologies of Multi-spectral Color Reproduction[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [6] 王凯, 张逸新, 龚晔, 等. 同色异谱在防伪油墨中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 59—61.
- WANG Kai, ZHANG Yi-xin, GONG Ye, et al. Application of Metamerism Phenomenon in Security Ink[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 59—61.
- [7] 王凯, 张逸新, 张彦. 印刷品同色异谱评价指数的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 56—58.
- WANG Kai, ZHANG Yi-xin, ZHANG Yan. Study of the Evaluation Indices of Printed Material Metamerism[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8): 56—58.
- [8] LI Qing-bo, JIA Zhao-hui. A Dimension Reduction Method Applied in Spectrum Analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 780—784.
- [9] LINE H C, MICHAEL E H, BJARNE K. A Comparison of Dimension Reduction Methods with Application to Multi-spectral Images of Sand Used in Concrete[J]. Machine Vision and Applications, 2010, 21(6): 959—968.
- [10] SHOHEI T, MITCHELL R R, ROY S. Berns Spectral Color Management Using Interim Connection Spaces Based on Spectral Decomposition[J]. Color Research and Application, 2008, 33(4): 282—299.
- [11] ILIN A, RAIKO T. Practical Approaches to Principal Component Analysis in the Presence of Missing Values[J]. Journal of Machine Learning Research, 2010, 11: 1957—2000.
- [12] 蒋博文. 基于 PCA 变换的多光谱图像降维方法研究[J]. 信息技术, 2012(8): 98—101.
- JIANG Bo-wen. Method of Multi-spectral Images Reduce-dimensions based on PCA[J]. Information Technology, 2012(8): 98—101.
- [13] DERHAK M W, ROSEN M R. Spectral Colorimetry using LabPQR: An Interim Connection Space[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(1): 53—63.
- [14] SHOHEI T, MITCHELL R R, ROY S. Spectral Gamut Mapping using LabPQR[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 51(6): 473—485.
- [15] 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 Technologies in Multispectral Image Color Reproduction[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.