修改 LMS 加权特性的 PCA 空间内光谱色域映射模型

孙叶维¹, 孔玲君^{1,2}, 刘真¹, 刘攀¹

(1.上海理工大学,上海 200093;2.上海出版印刷高等专科学校,上海 200093)

摘要:目的 针对跨媒体光谱颜色复制中不同颜色媒介光谱色域不一致的问题,在 LMS-PCA 光谱空间 下构建一种修改 LMS 加权特性的 PCA 空间内光谱色域映射模型。方法 利用调整后的修改 LMS 加权函 数对高维光谱数据进行加权,采用主成分分析法提取其加权光谱的前 3 个主成分,用以构建 LMS-PCA 光谱链接空间。在 LMS-PCA 空间内引入分区成熟 SMGBD 算法描述设备的光谱色域,对超出设备光谱 色域的图像颜色点进行 LSLINceLmax 色域压缩以映射到设备光谱域内,LSLINceLmax 色域压缩基于传 统 LSLIN 算法优化得到。结果 新模型相比于利用其他色域映射方向的光谱色域映射模型,以及普通加 权视觉特性的 PCA 空间内光谱域映射模型,拥有更高的光谱精度和色度精度,且在变观察环境下具有 稳定的色差精度。结论 修改 LMS 加权特性的 PCA 空间内色域映射模型能够基本解决变观察环境下, 不同颜色媒介光谱色域不一致的问题,具有较好的实用性。

关键词: LMS 加权函数; LMS-PCA 空间; 色域映射; SMGBD 算法

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)15-0190-07

Spectral Gamut Mapping Model in Modified LMS Weighted PCA Space

SUN Ye-wei¹, KONG Ling-jun^{1,2}, LIU Zhen¹, LIU Pan¹

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a spectral gamut mapping model in the modified LMS weighted PCA space with respect to the spectral gamut inconsistency of media in different colors in cross-media spectral color reproduction process. The high-dimensional spectral data was weighted by the modified LMS weighted function after adjustment. Then, the first three principal components of weighted spectra were extracted by using the principal component analysis (PCA) method, so that the LMS-PCA spectral link space was set up. In the LMS-PCA space, the mature segment maxima gamut boundary descriptor (SMGBD) algorithm was adopted to describe the device spectral gamut, and the image color points outside the device spectral gamut were subject to LSLINceLmax gamut compression and then mapped into the device spectral field. LSLINceLmax gamut compression was achieved based on the optimization of traditional LSLIN algorithm. The new model had higher spectral accuracy and chromaticity accuracy than the spectral gamut mapping models using other gamut mapping directions and the spectral gamut mapping model in ordinary visually-featured weighted PCA space. Moreover, it had stable color difference accuracy under changing observation environment. The gamut mapping model in the modified LMS weighted PCA space can basically solve the spectral gamut inconsistency of media in different colors under changing observation environment and it has agreeable practicality.

KEY WORDS: LMS weighting function; LMS-PCA space; gamut mapping; SMGBD algorithm

随着数字信息媒体时代的到来,人们对颜色再现 的要求逐渐提高,多光谱色彩再现^[1-2]开始成为数字 图像颜色复制研究的热点。由于光谱色域取决于光的 物理或材料与光相互作用,不涉及人的感光体整合或

收稿日期: 2017-04-26

基金项目:上海理工大学科技发展项目(16KJFZ017);柔版印刷绿色制版与标准化实验室建设项目

作者简介:孙叶维(1992-),女,上海理工大学硕士生,主攻色彩再现理论与应用、数字印刷等。

通讯作者:孔玲君(1972—),女,博士,上海出版高等专科学校教授,主要研究方向为图文信息处理与色彩再现、数字印刷 及质量评价等。

脑的处理,所以相比于传统国际色彩委员会(ICC)三 刺激值色彩管理系统,基于光谱特性的色彩管理(文 中称"光谱色彩管理")可以避免同色异谱现象^[3]。综 上,基于光谱特性的颜色复制能够保证在不同观察环 境条件下传输色彩的一致性,实现所见即所得的色彩 管理目的。

在光谱色彩管理过程中,不同设备间的光谱域不 一致是不可避免的问题。设备光谱域是能够刺激设备 做出有效响应并且产生正确信号值的所有光谱集,而 当超出目标设备光谱域的颜色光谱在向目标设备传 输时没有得到正确的响应时,基于光谱特性的色域映 射技术可以矫正颜色光谱的响应信号,使得颜色光谱 信号落入目标设备的光谱域内,从而解决跨媒体颜色 复制中设备域的不匹配问题^[4]。目前已有的基于光谱 特性的色域映射模型(即光谱色域映射模型)大致分 为2种类型:建立在PCA三维空间内,如2005年Arne M. Bakke等^[5]提出的多光谱色域映射和形象化的第 一次尝试,以及2015年刘攀等^[6]提出的加权视觉特性 的PCA空间内光谱域映射模型等;建立在LabPOR的2 个三维子空间内,如2006年Mitchell R Rosen和Maxim W Derhak^[7]提出的基于LabPOR颜色空间的光谱色域 映射方法,以及2015年刘攀,刘真等^[8]提出了基于点 集模型的LabPQR空间光谱色域映射算法等。第2种类 型的基于光谱特性的色域映射模型涉及到2个三维子 空间,在映射时需要分级映射,算法较为复杂,映射 精度也不是最为理想; 第1种类型的基于光谱特性的 色域映射模型,其映射过程相比于第2种要简洁直观 许多,但在映射精度上还有改进的空间。

文中针对基于光谱特性的色域映射模型的精度 问题,建立一种新的加入人眼视觉特性的光谱色域映 射模型。将基于修改的LMS曲线加权残差补偿光谱降 维法^[9]中的修改LMS加权函数作一定调整后,对高维 光谱数据进行加权残差补偿降维,选取前3个主成分 构建一个与设备无关的链接空间——LMS-PCA空 间,在LMS-PCA空间内引入成熟分区最大化色域边 界描述算法(SMGBD)^[10]进行光谱色域描述,最后采 用基于LMS-PCA空间内LSLINceLmax色域压缩对超 出设备光谱色域的图像光谱点进行光谱域映射。

1 LMS-PCA 空间

1.1 修改 LMS 加权函数

由于传统PCA降维所构造的链接空间仅考虑到 物体颜色的光谱反射信息,忽略了人眼视觉对物体颜 色的处理特性,因此,通过PCA降维空间构造的基于 光谱特性的色域映射模型在主观视觉感受上很难达 到最佳匹配。为了增加基于光谱特性的色域映射模型 的精度,引入人眼视觉特性对颜色刺激的影响开始逐 渐成为研究的趋势。文中对文献[9]中的修改LMS加 权函数作了一定调整,改变了归一化时所用的系数, 以此补偿降维空间的人眼视觉特性,从而提高降维空 间的光谱精度,其表达式为:

$$\tilde{W}(\lambda) = \frac{k \cdot (L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda)) + p}{\max\left[k \cdot (L(\lambda) + M(\lambda) + S(\lambda)) + p\right]}$$
(1)

式中:将原式^[9]里作为归一化所用的系数1,改 为可变数值p,p值的范围在-0.5~50;k值为1~10; $L(\lambda), M(\lambda), S(\lambda)$ 的计算方式与文献[9]相同。由此,通 过式中可变数值p和调整系数k的影响,使得有针对性 地调整光谱色域描述的精度成为可能,为之后的光谱 色域映射奠定基础。

1.2 LMS-PCA 空间的构造

LMS-PCA空间的构造实质上是通过主成分分析 法对利用调整后的修改LMS加权函数加权的高维光 谱信息进行降维,然后提取前3个主成分以建立与设 备无关的链接空间的过程,其建立的链接空间称为 LMS-PCA空间。其具体构造方法如下所述。

1)设某一颜色的源光谱为*R*,维数为*N*,利用调整后的修改LMS加权函数对其进行加权,得到加权光谱 *R_w*,其表达式见式(2)。

$$R_{\tilde{w}} = \tilde{W} \cdot R \tag{2}$$

式中: \tilde{W} 为加权矩阵。 \tilde{W} 矩阵是LMS加权函数 $\tilde{W}(\lambda)$ 转换的对角矩阵。

2) 对加权光谱 $R_{\tilde{w}}$ 进行奇异值分解: $R_{\tilde{w}} = USV^{T}$, 得到特征向量 $U = \{U_1, U_2...U_n\}$,提取前3个特征向量, 记作 U_3 。

3)利用 *U*₃对加权光谱 *R*_w进行降维,得到由主成分分析法降维后的三维加权光谱 *R*_w:

$$\tilde{R}_{\tilde{w}} = \left(\boldsymbol{U}_{\bar{3}}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{U}_{\bar{3}}\right)^{-1} \cdot \boldsymbol{U}_{\bar{3}}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{R}_{\tilde{w}}$$
(3)

由此完成了从高维光谱空间到低维LMS-PCA空间的转换,达到消除冗余数据的目的,并且引入的人眼视觉特性能够提高之后光谱色域描述的精度。

2 光谱色域映射模型的构造

2.1 光谱色域描述

在进行光谱色域映射之前,需对输出设备(打印机)的光谱色域进行描述。在降维得到的LMS-PCA 空间内引入成熟SMGBD算法描述打印机光谱色域, 描述分为2步:采用SMGBD算法得到打印机最大光谱 边界GBD;通过计算具体光谱边界LBD,完成打印机 光谱色域边界的描述。具体方法如下所述。利用降维 得到的前3个主成分构建LMS-PCA直角坐标系,设前 3个主成分为p₁, p₂, p₃。

2.1.1 计算最大光谱边界 GBD

首先将LMS-PCA空间的直角坐标系P1, P2, P3转

换到球坐标系 α , θ , r。r为样本点与球体中心点 $E(p_{1E}^{*}, p_{2E}^{*}, p_{3E}^{*})$ 的距离, $\alpha(0^{\circ}\sim360^{\circ})$ 为r在 $P_{2}P_{3}$ 平面的投影与 P_{2} 轴的夹角, $\theta(-90^{\circ}\sim90^{\circ})$ 为r与 $P_{2}P_{3}$ 平面的夹角。球 坐标示意见图1。



图 1 球坐标示意 Fig.1 Schematic of spherical coordinates

r与θ的计算方式为:

$$\begin{cases} r = \left[\left(p_{1} - p_{1E}^{*} \right)^{2} + \left(p_{2} - p_{2E}^{*} \right)^{2} + \left(p_{3} - p_{3E}^{*} \right)^{2} \right]^{\frac{1}{2}} \\ \theta = \arcsin\left(\frac{p_{1}}{r} \right) \end{cases}$$
(4)

α值的计算根据其夹角所在象限不同,进行相应 修改,α值的计算见式(5)。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = \arctan\left(\frac{p_3}{p_2}\right) & \text{第1象限} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{p_3}{p_2}\right) + 2\pi & \text{第2象限} \\ \alpha = \arctan\left(\frac{p_3}{p_2}\right) + \pi & \text{第3,4象限} \end{array} \right.$$

分别沿α和θ方向将LMS-PCA空间均匀分割为 n×n等分,计算每一个打印机光谱颜色样本点的球坐 标,根据其α和θ的值确定该光谱颜色样本点位于 LMS-PCA空间中的哪一个子区域,比较每个子区域 中所有光谱颜色样本到中心点的距离r,保留其中r最 大的光谱颜色样本作为该子区域的边界点,边界点的 个数与分割等分数量相同。分割原理见图2。



图 2 分割原理 Fig.2 Principle of segmentation

若分割等分很多,而样本分布不均匀,会导致有 些子区域中找不到对应的边界点,此时则利用插值法 计算该子区域的边界点,最后将得到的所有边界点存 入一个矩阵,完成打印机最大光谱边界描述。

2.1.2 计算具体光谱边界 LBD

选择一张标准光谱图像,以其图像中的一点光谱 颜色点作为检验对象。将该检验光谱颜色点*P*降维到 LMS-PCA空间内,得到其坐标值(*p*₁, *p*₂, *p*₃),具体计 算步骤如下所述。

1) 计算该点的球坐标 α ,根据 α 值、其光谱平面 坐标(C_0 , p_1)以及中心点E找到该检验光谱颜色点的等 α 面。其中,坐标 $C_0 = \sqrt{p_2^2 + p_3^2}$ 。

2)根据该色相角α,从第一个水平分割层的GBD 子矩阵中找出一对相邻光谱颜色点,其中一点的色相 角大于α,另一点的色相角小于α。然后将这2个相邻 光谱颜色点连接成一直线,求该直线与等α面的交点, 由于一共有n个水平分层,因此最终可得到n个交点, 这些交点即为打印机光谱色域在等α面上的线性 边界。

3) 计算 p_1 轴上的最大、最小线性边界点。选择n个GBD子矩阵中具有最大 p_1 值的光谱颜色点作为最 大线性边界点 p_{max} ,同理选择n个GBD子矩阵中具有 最小 p_1 值的光谱颜色点作为最小线性边界点 p_{min} 。线 性边界 P_1C_0 平面模拟见图3,映射判断示意见图4。



图 3 线性边界 P1Co 平面模拟 Fig.3 Simulation of P1Co plane's linear boundary

2.2 LMS-PCA 空间内 LSLINceLmax 色域压缩

完成打印机光谱色域描述后,判断检验光谱颜色 点与打印机光谱色域边界之间的关系,若超出光谱色 域,则对其进行映射处理;若在光谱色域内,则不进 行映射。具体过程如下所述。

1)判断该检验颜色点 *P*与打印机光谱色域的关系。 将该检验光谱颜色点 *P*(*C*_o, *p*₁)与 *P*₁轴的中心点 *E*连接, 并延长成一直线,该直线与 LBD 线性边界相交

ſ



Fig.4 Mapping judgment

于点*H*(*C*'_o, *p*'₁), 若*C*_o<*C*'_o且*p*_{min}<*p*'₁<*p*_{max},则该检 验光谱颜色点位于打印机光谱色域之内,否则就位于 打印机光谱色域之外,需进行下一步LSLINceLmax 色域压缩。

2)基于LMS-PCA空间内LSLINcelmax色域压缩。 对超出光谱色域的颜色点进行基于LMS-PCA空间内 LSLINcelmax色域压缩。为了提高映射的色度精度, 基于LMS-PCA空间内LSLINcelmax色域压缩在传统 LSLIN色域压缩算法^[11-13]的基础上,改变了映射方 向的标准,同时加入了打印机光谱色域明度中值影响 以及待映射光谱图像明度最大值影响,然后同时对光 谱颜色点的光谱彩度和光谱明度进行压缩,从而完成 较高精度的映射过程。其光谱映射表达式为:

$$\begin{cases} C_{\rm r} = C_{\rm rmax} \frac{C_{\rm o}}{C_{\rm omax}} \\ p_{\rm r} = \frac{p_{\rm 1} - C_{\rm e}}{C_{\rm o}} C_{\rm r} + C_{\rm L max} \\ p_{\rm r} = \frac{C_{\rm rmax}}{C_{\rm omax}} \left(p_{\rm 1} - C_{\rm L max} \right) \end{cases}$$
(6)

式中: C_r 为输出光谱彩度值; $C_{r max}$ 为打印机光谱 色域的最大光谱彩度值; C_o 为输入的检验光谱颜色点 彩度值; $C_o max$ 为光谱图像色域的最大光谱彩度值; p_r 为输出光谱明度; p_1 为输入的检验光谱颜色点明度 值; C_e 为该检验光谱颜色点对应的等色相面光谱明度 轴的中心点; $C_{L max}$ 为待映射光谱图像的明度最大值 L_{max} 与 C_e 的加权函数,其表达式为:

$$C_{\rm L max} = \frac{\left(C_{\rm c}L_{\rm max} + d_{\rm d}C_{\rm e}\right)}{h_{\rm h}} \tag{7}$$

式中: *C*_c, *d*_d, *h*_h为常数。*C*_c的取值范围为-15~15, *d*_d的取值范围为 0~10, *h*_h一般取 1~3。

完成该检验点的光谱映射过程,将所有光谱图像的颜色点都按照上述步骤处理,最后将映射后的低维 光谱信息重建,即可得到完整的映射后光谱图像。

3 实验设计

实验中,映射对象为标准光谱图像为 woman face, young girl 和 fruits flowers, 映射目标为 HP Design Z3200 多通道打印机的光谱色域,映射光源设 定为D50。通过自制训练色靶来获得HP Design Z3200 打印机的详细光谱颜色信息,为之后描述设备光谱色 域做准备。自制的训练色靶拥有 7 个颜色通道 (CMYKRGB),根据三色分区原理^[14],将7个通道 分为6种组合,分别为BCK,CGK,GYK,MBK,RMK, YRK,每种组合中,只有3个通道颜色的网点面积率 取值为 0~100, 间隔为 10, 其余 4 个通道的颜色值 全部为 0, 按照此规律最终得到含有 7986 个颜色块 的自制色靶。利用线性化后的 HP Design Z3200 打印 机打印自制训练色靶,然后通过 Eyeone-io 测色仪器 与 Measuretool 软件采集色靶的光谱数据,最终得到 31 维的高维光谱信息(光谱反射率均在 400~700 nm 内, 间隔 10 nm 采样)。

为了对比不同映射方向对基于光谱特性的色域 映射效果的影响,实验中,选择不同的色域映射方向 代替基于修改 LMS 加权特性的 PCA 空间内光谱域映 射模型中的基于 LMS-PCA 空间内 LSLINceLmax 色 域压缩方向,其中代替的色域映射方向包括:最短距 离法、LLIN, CLLIN, CUSP, GCUSP, SGCK 以及与图 像内容相关的色域映射(Lcusp)法,从而组成在 LMS-PCA 空间中的 7 种不同光谱色域映射模型。将 这 7 种拥有不同映射方向的光谱色域映射模型以及 文献[6]中加权视觉特性的 PCA 空间内光谱域映射模 型(后文称文献[6]模型)仿真得到的映射效果,与文 中提出的修改 LMS 加权特性的 PCA 空间内光谱色域 映射模型仿真得到的映射效果作对比。利用 CIEΔE2000 色差公式^[15]、均方根误差(RMSE)等 2 个 指标来评价 9 种光谱色域映射模型的光谱精度及色 度精度,并验证文中模型的色差稳定性。均方根误差 (RMSE)计算方法为:

$$R_{\rm MSE} = \sqrt{\frac{\left(R_1 - R_2\right)^{\rm T} \left(R_1 - R_2\right)}{31}}$$
(8)

式中: *R*₁为源光谱图像的光谱信息; *R*₂为映射后 光谱图像的光谱信息,均为31维的高维数据。

4 结果与分析

对于woman face, young girl和fruits flowers光谱 图像,采用文献[6]模型修改LMS加权特性的PCA空间 内光谱色域映射模型以及采用最短距离法,LLIN, CLLIN, CUSP, GCUSP, SGCK和与图像内容相关的 色域映射(Lcusp)法的色域映射方向代替修改LMS加 权特性的PCA空间内光谱色域映射模型中的 LSLINceLmax色域压缩方向后得到的7种不同光谱色 域映射模型,一共9种光谱色域映射模型所得的光谱 精度。不同光谱色域映射模型的映射光谱精度见表1。 其中,"LMSPCA空间内-最短距离法"是利用最短距 离法代替修改LMS加权特性的PCA空间内光谱色域 映射模型中的LSLINceLmax色域压缩得到的光谱色 域映射模型,同样"LMSPCA空间内-LLIN"、 "LMSPCA 空间内-CLLIN"、"LMSPCA 空间内-CUSP"、"LMSPCA空间内-GCUSP"、"LMSPCA空间内-SGCK"以及"LMSPCA空间内-Lcusp"也是利用 LLIN, CLLIN, CUSP, GCUSP, SGCK, Lcusp法代替修 改LMS加权特性的PCA空间内光谱色域映射模型中 的LSLINceLmax色域压缩后得到的光谱色域映射模 型, LMSPCA空间内-LSLINceLmax为文中模型。

表 1 不同光谱色域映射模型的映射光谱精度 Tab.1 Mapping spectral accuracy of different spectral gamut mapping models

映射方法 -	woman face		young girl		fruits flowers	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
文献[6]模型	0.0714	0.1465	0.0883	0.3103	0.0999	0.2438
LMSPCA 空间内-最短距离法	0.0593	0.1685	0.0546	0.2271	0.0835	0.2827
LMSPCA 空间内-LLIN	0.0917	0.6416	0.1807	0.2878	0.1195	0.2348
LMSPCA 空间内-CLLIN	0.0692	0.1421	0.0985	0.2977	0.1063	0.2954
LMSPCA 空间内-CUSP	0.0759	0.1717	0.0891	0.4188	0.0850	0.2368
LMSPCA 空间内-GCUSP	0.0596	0.1925	0.0916	0.3925	0.1289	0.2489
LMSPCA 空间内-SGCK	0.1056	0.2133	0.1417	0.2254	0.1822	0.9594
LMSPCA 空间内-Lcusp	0.0593	0.2566	0.1409	0.6537	0.1041	0.5184
LMSPCA空间内-LSLINceLmax	0.0392	0.0805	0.0513	0.1956	0.0944	0.3171

由表1数据发现,改变基于光谱特性的色域映射 模型的映射方向,可对光谱图像的映射效果带来明显 的影响。对于肤色较多的人脸光谱图像woman face以 及young girl来说,其中最短距离、CLLIN、CUSP以 及LSLINceLmax的映射方向比起其他映射方向能够 在文中所构建的LMS-PCA空间中完成较好的映射效 果,映射后的光谱精度较高;而对于色彩艳丽的光谱 图像fruits flowers来说,最短距离、文献[6]模型、CUSP 以及LSLINceLmax的映射方向比起其他映射方向能 够在文中所构建的LMS-PCA空间中完成较好的映射 效果,映射后拥有较高的光谱精度。对于woman face 以及young girl两图,与文献[6]以及其他映射方向所 得到的基于光谱特性的色域映射模型相比,文中提出 的修改LMS加权特性的PCA空间内光谱域映射模型 得到的映射图像具有最优的光谱精度。对于fruits flowers图像,文中提出的修改LMS加权特性的PCA空 间内光谱域映射模型得到的光谱精度也较高,位列9 种光谱映射模型中的第二。综上,文中提出的模型能 应用于不同类型图像的映射,并且拥有较高的光谱 精度。

图5为D50光源下,3种光谱图像采用文献[6]模型、文中模型以及采用最短距离法,LLIN,CLLIN, CUSP,GCUSP,SGCK,Lcusp代替修改LMS加权特性的PCA空间内光谱色域映射模型中的LSLINceLmax 色域压缩后得到的7种不同光谱色域映射模型,一共9 种光谱色域映射模型所得的色度精度对比。



图 5 不同光谱色域映射模型的映射色度精度对比 Fig.5 Mapping colorimetric precision comparison between different spectral gamut mapping models

由图5可知,对于woman face和young girl这类肤色 较多的人脸光谱图像,文中提出的修改LMS加权特性的 PCA空间内光谱域映射模型得到的色差比其他基于光 谱特性的色域映射模型得到的色差都小,色度精度最 佳。对于fruits flowers这类色彩艳丽的光谱图像,文中 提出的修改LMS加权特性的PCA空间内光谱域映射模 型也拥有较高的色度精度,位列9种光谱映射模型中的 第二。由此,文中提出的模型能够在保证较高的光谱精 度的基础上,得到较高的色度精度,且适用于不同类型 的图像。为了更加直观地了解不同光谱映射模型得到的 映射效果,文中做出young girl和fruits flowers图像在不 同光谱色域映射模型下的映射效果,见图6。

由图6a可知,虽然文献[6]、LMSPCA最短距离以及LMSPCA-LLIN模型映射得到的效果图中,女孩手中杯子的高光部分以及白色圆点花纹能较好地呈现,

但右侧的背景颜色与原图偏差较大。LMSPCA-CLLIN, LMSPCA-CUSP以及LMSPCA-GCUSP模型 映射得到的右侧背景颜色接近原图颜色,但女孩手中 杯子的高光部分以及白色圆点花纹不能完整呈现。 LMSPCA-SGCK与LMSPCA-Lcusp模型的映射效果 更是与原图相差甚远,只有文中提出的修改LMS加权 特性的PCA空间内光谱色域映射模型的映射效果与 原图最为相近。图6b中,右侧橙子的高光部分都多少 与原图有所不同,文中提出的修改LMS加权特性的 PCA空间内光谱色域映射模型得到的效果图与原图 在主管视觉上最为接近。

为了验证文中模型的色差稳定性,分别在标准光 源D50,D75,A和C下完成映射仿真。不同标准光源下 映射得到的光谱图像色差见表2。由表2数据可知,文 中提出的模型在改变观察光源后,色差变化均在



图 6 不同光谱色域映射模型的映射效果 Fig.6 Mapping results of different spectral gamut mapping models

表 2 不同标准光源下得到的映射色差 Tab.2 The mapping color difference under different standard light sources

		-		
实验图像	D50	D75	А	С
woman face	1.0817	1.2286	0.8844	1.1104
young girl	1.5075	1.6396	1.2965	1.5303
fruits flowers	3.6284	3.8616	3.8638	3.7071

0.1~0.4,具有较好的色差稳定性。

5 结语

通过客观数据分析和主观实验评价的结果发现, 文中提出的修改LMS加权特性的PCA空间内光谱色 域映射模型比起普通的加入人眼视觉特性的光谱色 域映射模型拥有更高的光谱精度和色度精度,且色差 稳定性较高,能适用于各种类型图像的映射,可以有效地解决变观察环境下,不同颜色媒介光谱色域不一致的问题。该模型能够为多光谱色彩再现系统的发展提供一定的技术支持,并推动基于光谱特性色域映射技术的发展。

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 Techniques in Multispectral Image Color Reproduction[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [2] TSUTSUMI S, MITCHELL R R, ROY S B. Spectral Color Management Using Interim Connection Spaces Based on Spectral Decomposition[J]. Color Research

and Application, 2008, 33(4): 282-299.

 [3] 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 Multispectral Color Reproduction[D]. Guangzhou:

South China University of Technology, 2012. BEHNAM B, BRIAN F. Spectral Gamut Mapping and

- [4] BEHNAM B, BRIAN F. Spectral Gamut Mapping and Gamut Concavity[C]// Society for Imaging Science and Technology, 2007, 11: 218—221.
- [5] ARNE M B, IVAR F, JON Y H. Multispectral Gamut Mapping and Visualization—a First Attempt[C]// Color Imaging X: Processing, Hardcopy and Applications, 2005, 5667: 193—200.
- [6] 刘攀,刘真,朱明,等.加权视觉特性的PCA空间内 光谱域映射模型[J].光学学报,2015,35(6):1—8. LIU Pan, LIU Zhen, ZHU Ming, et al. A Spectral Gamut Mapping Model in Visual Features Weighted PCA Space[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6):1—8.
- [7] MITCHELL R R, MAXIM W D. Spectral Gamuts and Spectral Gamut Mapping[C]// SPIE-IS&T, 2006: 1—11.
- [8] 刘攀,刘真,吴光远. 基于点集模型的 LabPQR 空间 光谱色域映射算法[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 130—134.
 LIU Pan, LIU Zhen, WU Guang-yuan. Spectral Gamut Mapping Algorithm in LabPQR Space Based on Point Set Model[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15):

130—134. 孙叶维, 孔玲君, 刘真. 基于修改的 LMS 曲线加权

[9] 孙叶维, 孔玲君, 刘真. 基于修改的 LMS 曲线加权 残差补偿光谱降维法[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 114—119.

SUN Ye-wei, KONG Ling-jun, LIU Zhen. Residual Compensation of Weighted Spectral Dimension Reduction Method Based on Modified LMS[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 114-119.

- [10] MOROVIC J, LUO M R. Calculating Medium and Image Gamut Boundaries for Gamut Mapping[J]. Color Research and Application, 2000, 25(6): 394–401.
- [11] 王淑真,刘真.彩色复制中的色域映射方法[J].北 京印刷学院学报,2006,14(3):4—6.
 WANG Shu-zhen, LIU Zhen. Gamut Mapping Algorithms in Color Reproduction[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2006, 14(3):4—6.
- [12] 梁静,邓晶绿,彭彦平,等.彩色复制中色域映射方法的研究[J].包装工程,2008,29(9):65—67.
 LIANG Jing, DENG Jing-lv, PENG Yan-ping, et al. Research of Color Gamut Mapping in Color Reproduction[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(9): 65—67.
- [13] 王一帆. 基于多光谱的色彩再现与印品检测的研究
 [D]. 江南: 江南大学, 2014.
 WANG Yi-fan. Study on Color Reproduction and Press work Detection Based on Multispectral[D]. Jiangnan: Jiangnan University, 2014.
- [14] 朱明,刘真,陈广学.基于分区纽阶堡方程的6色印刷分色模型研究[J].光学学报,2011,31(7):1—9.
 ZHU Ming, LIU Zhen, CHEN Guang-xue. Research on Six-color Separation Model Based on Subarea Neugebauer Equations[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7):1—9.
- [15] 戴哲敏,谢琥,李红勤,等. CIE2000 色差公式在墙 地砖表面色差测试中的鲁棒性研究[J]. 计量与测试 技术, 2006, 33(7): 8—10.
 DAI Zhe-min, XIE Hu, LI Hong-qin, et al. A Research on the Robust of CIE2000Color Difference Formula in the Ceramic Tiles' Color Difference Detecting[J]. Metrology & Measurement Technique, 2016, 33(7): 8—10.