

图像复制中的超色域映射技术

刘奔¹, 林茂海^{1,2}, 周红霞¹, 李志金¹

(1.齐鲁工业大学, 济南 250353; 2.华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广州 510641)

摘要: 目的 提高跨媒体过程中色域映射技术在不均匀空间中的映射效果。方法 通过研究分析 CIELAB 颜色空间的不均匀性, 提出基于色相阶调曲线模型的超色域映射算法。该算法按照红、绿、蓝、青、品、黄以及灰色将颜色分为 7 类色相相同、饱和度不同的颜色。将这 7 类颜色从 CIERGB 空间转换到 CIELAB 空间, 获得的各个散点按照一定的顺序连接起来, 便可获得 7 个色相的空间曲线, 并以此来预测图像相同色相、不同饱和度的颜色点。依据空间曲线预测颜色的方法, 保持色相恒定性映射超出设备色域边界的颜色点。结果 主观评价显示, HPMINDE, SGCK 算法的 4 位数均为 0, 新算法平均数为 0.8, 中位数为 1。客观评价显示, 测试所用的 4 幅图像, 在 HPMINDE, SGCK 与新算法的色差平均值分别为 12, 11, 10, 新算法色差较小。结论 该算法相对于 HPMINDE 算法和 SGCK 算法, 具有保持颜色色相不变的优越特性, 并且映射结果视觉性能达到更好的效果, 更适合视觉观察者的偏好。

关键词: 图像复制; 超色域; 色域映射算法

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)1-0184-06

Out-of-gamut Mapping Technology in Image Reproduction

LIU Ben¹, LIN Mao-hai^{1,2}, ZHOU Hong-xia¹, LI Zhi-jin¹

(1.Qilu University of Technology, Jinan 250353, China; 2.State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the mapping effect of color gamut mapping technology in non-uniform space during the cross-media process. An out-of-gamut mapping algorithm based on the hue tone curve model was proposed through the non-uniformity analysis of CIELAB color space. In this algorithm, these colors were divided into seven categories (red, green, blue, black, pink, yellow and gray) with the same hue and different saturations. Through the space transformation of these seven categories of colors from CIERGB to CIELAB, the spatial curve of seven hues could be obtained by connecting all the scattered points according to certain color sequence to predict those color points with the same hue and different saturations. Based on the method that predicted colors according to the spatial curve, the color points whose hue constant mapping was out of the device gamut boundary were kept. Through the subjective evaluation, the four digits of HPMINDE and SGCK algorithms were 0, the mean value of the new algorithm was 0.8, and the median was 1. Through the objective evaluation, the average color difference was calculated by HPMINDE, SGCK and the new algorithm, which respectively were 12, 11 and 10. It was clearly showed that the color difference of the new algorithm was much smaller. Compared with the HPMINDE and SGCK algorithms, the proposed algorithm has the superior characteristics to keep the hue unchanged and achieve better visual effect of mapping results, and its vision performance is preferable for observers.

KEY WORDS: image reproduction; out-of-gamut; color gamut mapping algorithm

随着 Pad、电脑、手机等各种移动终端的普及, 在彩色信息跨媒体传输的过程中存在颜色失真问题, 为了尽量减少彩色信息的丢失, 需要对设备进行高准确度的参数设置和标定, 并在此基础上选择合适的色

域映射算法。根据对源色域中颜色信息的处理关系, 将目前已有的色域映射算法分为 2 类, 一类是逐点色域映射算法 (PGMA), 该算法考虑了在标准连接空间中, 将输入的颜色信息逐点映射到输出点上, 没有考虑图像

收稿日期: 2017-06-08

基金项目: 制浆造纸工程国家重点实验室资助项目 (201609)

作者简介: 刘奔 (1987—), 男, 齐鲁工业大学硕士生, 主攻颜色科学与印刷复制技术。

通讯作者: 林茂海 (1973—), 男, 博士, 齐鲁工业大学副教授, 主要研究方向为颜色科学与印刷复制技术。

的类型和内容^[1—3]; 另一类是空间域色域映射算法(SGMA), 该算法考虑了输入图像的颜色特征与图像相邻像素之间的影响^[4—6]。在进行映射时, 不同的色域映射算法会采用不同的映射方法, 比如对所有源色域内的颜色用一个简单因子进行压缩, 是用色相角函数的因子对源色域内所有颜色进行压缩, 分别沿等亮度线进行色度映射和沿等色相角线进行色度映射^[7]。Cusp 算法映射中心点是在等色相平面上, 源色域向着目标色域彩度最大点对应的亮度点进行压缩^[8]。Bala 等提出给予空间明度保护的色域映射算法^[9]。在空间域色域映射方面, Bonnier 等将其分为优化算法和补偿算法^[10]。Farup 等提出一种相似的多分辨率色域映射算法, 可以与源图像结构相适应^[11—14]。Chen 等学者提出在色域三维空间中压缩映射, 将恒色相角的二维平面内的压缩方法应用到色域三维空间中, 基于图像信息选择最优的映射方向, 实现图像色域向特定设备的映射^[15]。有些学者对色域映射工作空间 CIELAB 颜色空间色相线性化处理来改变工作空间的色相。相对于原来的 CIELAB 颜色空间, 通过色相线性化修正之后的色域映射工作空间经过心理实验检测, 在蓝色部分视觉上更均匀, 在映射效果中表现更理想。当一个超色域点颜色在映射适应目的色域的情况下, 需要保持色相不变, 压缩饱和度, 获得的色相仍然会改变的^[16]。文中以经典的色域映射算法为基础, 基于点对点映射机理, 倾重于颜色三维空间以及颜色在 CIELAB 颜色空间的不均匀性, 提出基于色相阶调曲线模型的超色域映射算法。

1 CIELab 颜色空间

选择红、绿、蓝、青、品、黄等 6 种色相见图 1, 相同色相的颜色系散点在 CIELab 颜色空间的分布。从图 1 可以看出, 在三维空间里散点排列呈曲线状, 但是分布不均匀性, 相距坐标原点 [0, 0, 0] 近的点, 分布越是无规律。各色相之间曲折性各向不同, 地方分布特性很强, 在红色区域和蓝色区域, 曲线曲折性更强, 表示相同色相的颜色系散点并不是分布在恒色相角内的, 即不分布在同一个恒色相二维平面上。

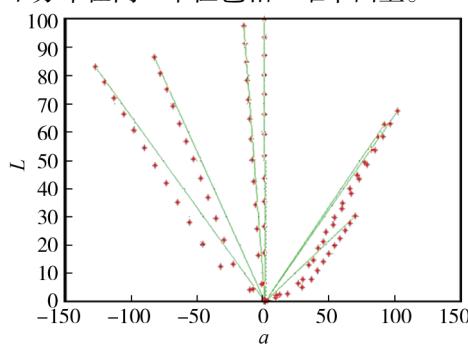


图 1 同色相系散点在三维空间的分布

Fig.1 Distribution of the color points of the same hue in the three-dimensional space

2 基于色相阶调映射的超色域映射算法

2.1 建立色相曲线模型

根据颜色的组成原理, 选择能组成各种颜色的三原色为红、绿、蓝与黑白组成的中间色黄、品、青以及无色相特性的黑白灰的 RGB 颜色空间作为灰色阶调来提取的色相。各色相 RGB 取值按照表 1—2 选取, 间隔为 19, 每个色相颜色系颜色点为 14 个点。

表 1 RGB 数据采样点
Tab.1 RGB data sampling points

红			绿			蓝			红+绿		
R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
255	0	0	0	255	0	0	0	255	255	255	0
236	0	0	0	236	0	0	0	236	236	236	0
217	0	0	0	217	0	0	0	217	217	217	0
198	0	0	0	198	0	0	0	198	198	198	0
179	0	0	0	179	0	0	0	179	179	179	0
160	0	0	0	160	0	0	0	160	160	160	0
141	0	0	0	141	0	0	0	141	141	141	0
122	0	0	0	122	0	0	0	122	122	122	0
103	0	0	0	103	0	0	0	103	103	103	0
84	0	0	0	84	0	0	0	84	84	84	0
65	0	0	0	65	0	0	0	65	65	65	0
46	0	0	0	46	0	0	0	46	46	46	0
27	0	0	0	27	0	0	0	27	27	27	0
8	0	0	0	8	0	0	0	8	8	8	0

表 2 RGB 空间数据采样点
Tab.2 RGB spatial data sampling points

绿+蓝			红+蓝			红+绿+蓝		
R	G	B	R	G	B	R	G	B
0	255	255	255	0	255	255	255	255
0	236	236	236	0	236	236	236	236
0	217	217	217	0	217	217	217	217
0	198	198	198	0	198	198	198	198
0	179	17	179	0	179	179	179	179
0	160	160	160	0	160	160	160	160
0	141	141	141	0	141	141	141	141
0	122	122	122	0	122	122	122	122
0	103	103	103	0	103	103	103	103
0	84	84	84	0	84	84	84	84
0	65	65	65	0	65	65	65	65
0	46	46	46	0	46	46	46	46
0	27	27	27	0	27	27	27	27
0	8	8	8	0	8	8	8	8

通过设备的 ICC 特性文件将取值颜色点转换到 CIELAB 颜色空间中, 散点表示见图 2, 连接最小值和最大值的直线更能对比出曲线的弯曲程度。这样,

每个色相的颜色系会组成一个三维空间里各维度都有变化的空间曲线。颜色保持恒定色相改变明度，会导致原来颜色色相改变。色域映射需要依据色相，在这里会剔除明度的变化，三维空间曲线转变为色相 $a-b$ 平面内的折线。平面的折线包含 14 个颜色点，该映射方法选择直线作为映射线，需要从 m 个颜色点中提取与超色点在 C_{ab} 平面距离相近的 2 个相邻的颜色点。这 2 个颜色点处在 C_{ab} 平面上，需要与超色点的明度保持一致方可映射。

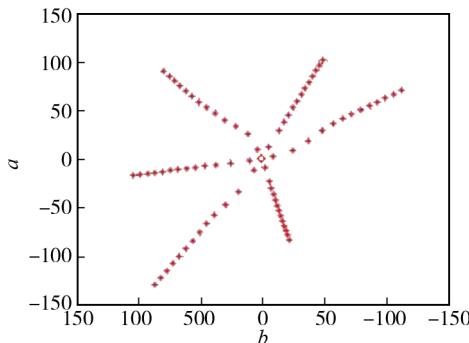


图 2 同色相系散点在 CIELAB 颜色空间连线

Fig.2 Connection of the color points of the same hue in the CIELAB color space

2.2 设备色域边界的提取

设备色域边界提取算法选择分区最大化算法。基本思想：将设备色域视为三维立体，选择一个中心点，将三维立体的表面分为一定数量的小区域组成。将小区域里距离中心点最远的颜色点设置为该区域的边界点，所有边界点连接成线作为该设备色域的边界。距离的计算公式为：

$$R = [(L_p - L_o)^2 + (a_p - a_o)^2 + (b_p - b_o)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： $[L_o, a_o, b_o]$ 为该色域空间内中心点； $[L_p, a_p, b_p]$ 为色域内任意颜色点； R 为三维空间中该颜色点距离中心点的距离。将每个区域内距离值最大的点另外存储在数值矩阵中，该矩阵为设备色域的边界数据。

2.3 超色域映射算法实现

基于相同色相系列颜色散点映射的色域映射算法先将红、绿、蓝、黄、品、青和灰各相同色相的颜色系转换到 CIELAB 工作空间中，在 CIELAB 工作空间中，每个色相的颜色系组成一个空间折线。将图像的颜色点按照 6 种色相颜色和灰色分成 7 类，根据颜色点的色相不同选择不同的映射算法。例如：当颜色点的 RGB 值分别与 RGB 值总和进行比值运算时，如果得到 2 个大于等于 0.5 的数值，该颜色分类为该两者颜色的中间色。如果没有 2 个数值大于等于 0.5，会执行左边流程，计算三分量之间大小比例。当最大数大于中间数 1 倍及以上，表示该颜色分类为最大数

代表的色相颜色；当最大数与中间数相近，中间数大于最小数 1 倍及以上，表示该颜色分类为最大数和中间数混合得到的中间色。若三者相差不明显，则视为灰色处理。基于相同色相系列颜色散点映射的色域映射算法实现流程见图 3。

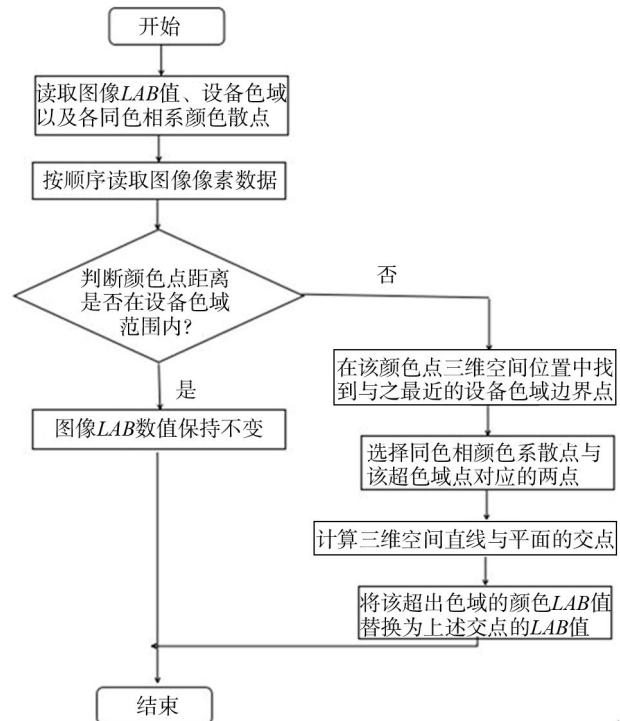


图 3 基于相同色相系列颜色散点映射的色域映射算法流程

Fig.3 Process of color gamut mapping algorithm mapped based on the color points of the same hue series

1) 设备色域范围内颜色点。按照顺序读取图像像素数据，逐点处理。读取颜色点首先判断该颜色点与原点 $[50, 0, 0]$ 的距离。当颜色点与该中心点的距离小于等于设备色域边界点与中心点的距离时，设备可以展现该颜色点的特性。当前者距离大于后者时，笔者将该颜色称为超色域点颜色，执行图 3 右支流程算法。

2) 超出设备色域范围的颜色点。流程图右支流程算法主要思想：在三维空间中，将经过超色点的空间直线与设备色域边界点构成的空间平面交点作为超色点的替代点，空间直线为同色相颜色系散点，该散点或许不与超色点在同一个直线上。将同色相颜色系散点平移转换到超色点所在的位置，查找距离超色点最近的设备色域边界散点。实验在颜色点所处位置插值获得同色相角的上下 2 个色域边界点，该颜色点左右 2 个分区可获得上下 4 个色域边界点。理论上一个超色域点可查找到 6 个不同方向相近的色域边界点，3 个不同方向的色域边界点可组成一个三维空间的平面，获得一个与直线相交点。实验从 6 个点组合多个三维空间平面中，选择一个色差较小的作为色域

映射结果。

6个色域边界点的获取方法: 通过计算获得该颜色点的色相角, 获得该色相角恒色相面。选择与该颜色点明度值相近的上下2个边界点, 连接恒色相面左右分区的设备色域边界点成为一条空间直线, 与恒色相面相交, 可获得上下2个交点作为色域边界点。在与该颜色所处的色域分区相邻的各方向的分区里可查到到4个色域边界点。这6个色域边界点, 分别两两分布在一条直线上, 3个点可以组合一个空间平面。空间平面与直线做交点计算便获得多个交点, 根据交点和超色域点的距离, 即超色域点色域映射结果的色

差, 选择色差最小的交点替代超色域点, 转换到设备色域的边界。

2.4 超色域映射算法验证

实验选择图像及其用 HPMINDE, SGCK 以及基于色相阶调曲线模型的超色域映射算法映射结果见图4。选择的图像有鲜艳的绿、黄、红, 以及特有的肤色和偏暗色。图4a, b 来源为 Matlab 软件的文件夹, 作为图像处理使用的测试图。图4c 为印刷领域经典检测图像, 作为印刷设备校准测试图。图4d 为图像处理书籍携带电子图像。

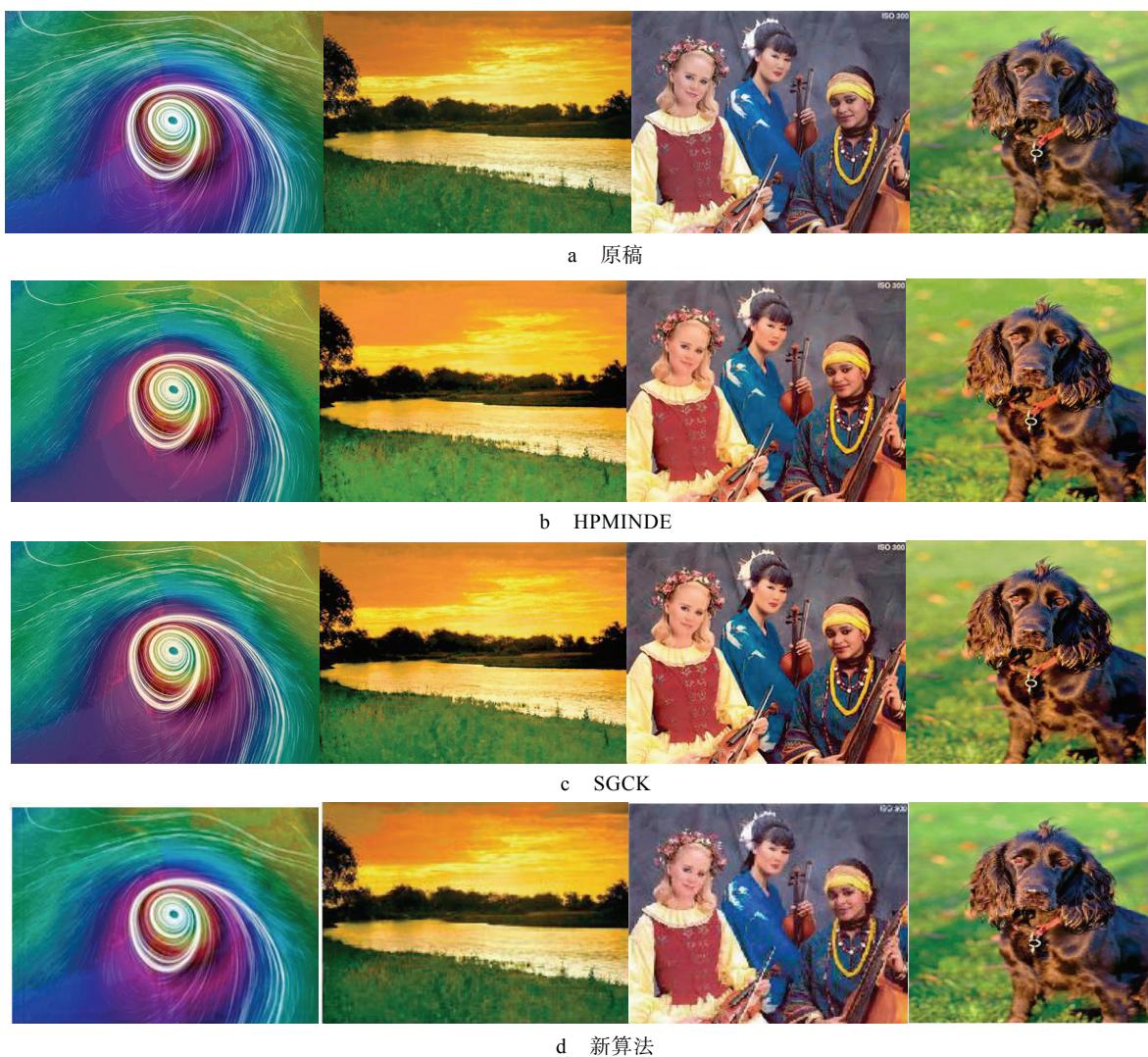


图4 HPMINDE, SGCK 以及基于色相阶调曲线模型的超色域映射算法映射结果

Fig.4 The mapping results of gamut mapping algorithm of HPMINDE, SGCK and the based on hue curve model

2.4.1 主观评价

为了满足最终的消费者, 对图像复制的质量做真实的评价, 主要是依据心理物理实验的主观评价。主观评价的依据是观察者, 图像复制最终要服务于人们的视觉。实验选择18位视觉正常的观察者在上午和

下午2个时间段依次进行, 将得到的2次评价做和再求平均值, 结果以箱线图的形式表示, 见图5。

从图5中可知, 观察者更倾向于新提出的算法处理后得到的效果图。前两者效果图评价得分较少, 4位数都在0位置, 而新提出的算法结果显示平均数为0.8, 中位数为1, 大部分评价得分为1。表明新提出的算法

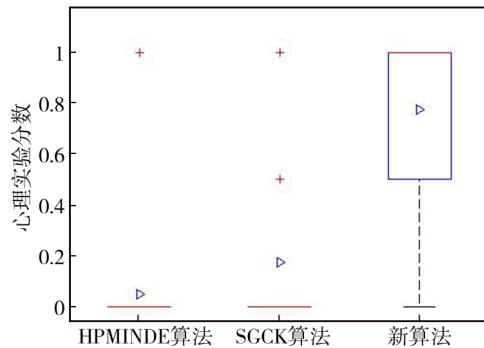


图 5 心理物理实验结果箱线

Fig.5 Box chart of the psychophysical experiment result

处理效果适合观察者的视觉倾向，更具有优越性。

2.4.2 客观评价

实验用 HPMINDE、SGCK 和新提出的色域映射算法对选择的 4 幅图像进行色域映射，通过印刷设备 ICC 特性文件，将 CIELAB 颜色空间的图像数据转换到印刷机可以打印的 CMYK 颜色模式，计算测试图与映射图的色差，通过箱线图来表示色差数值的分布

情况，见图 6。

根据实验选择的 4 幅图来看，图 4a 颜色视觉偏向于蓝色、黄色以及介于蓝黄之间的紫色，线条明显。3 种算法对图 4a 的映射结果显示中位值和平均值三者相似，偏差微小。新提出的新算法映射结果显示色差平均值稍微偏小，而且更集中，没有出现异常值，说明该算法对蓝色范围内颜色映射效果较佳。图 4b 颜色分明，包含红色、绿色以及蓝色。从 3 种映射结果看，前两者数据较为集中，第 1 种和第 2 种算法的中位数相距距离小，但会有些异常数。第 3 种算法的中位数和平均值与前两者数据相近，总体数据偏散。图 4c 包含皮肤颜色和蓝绿色的衣服颜色以及背景的灰色。3 种算映射法结果相似，中位数和平均值相近，异常数情况相似，集中程度相同。图 4d 包含狗毛的棕色和以草原为背景的蓝绿色。从数据的箱线图来看，三者数据的平均值和中位数很相似，SGCK 色域映射算法数据相对更集中，但差距不是很大。从 4 幅图的映射结果整体来看，平均值和中位数的数值相差不大，且新提出的算法平均值基本上是小于其他 2 种算法的结果，而整体的集中程度较为弱一些。

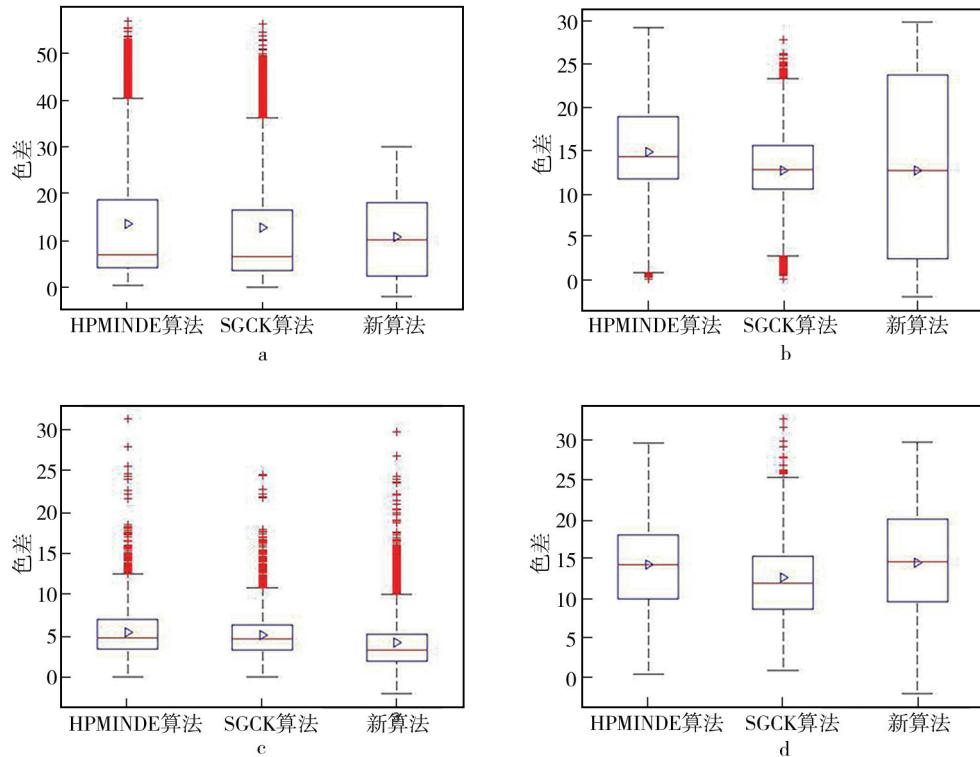


图 6 色差箱线
Fig.6 Box chart of the color difference

3 结语

以经典的色域映射算法为基础，基于点对点映射机理，侧重于颜色三维空间以及颜色在 CIELAB 颜色空间的不均匀性，提出了基于色相阶调曲线模型的超

色域映射算法。新提出的算法，根据同色相系颜色在 CIELAB 颜色空间的走势来映射颜色点，使颜色点的映射结果、色相变化尽可能小，使映射前后的颜色在视觉上具有相似的视觉效果。主观和客观评价实验结果整体表明新提出的超色域映射新算法具有保持颜

色色相不变的优越特性，并达到映射结果视觉感更好的效果，更适合视觉观察者的偏好。

参考文献:

- [1] LI Xiao-zhou, CHEN Guang-xue, JIA Chun-jiang, et al. Study on Influence of Filter Design Parameter on Printing Image Reproduction Quality in Spatial Color Gamut Mapping[C]// NIP & Digital Fabrication Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2011(1): 244—247.
- [2] MOROVIC J. Color Gamut Mapping[M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [3] GIJSENIJ A, GEVERS T, VAN D W J. Generalized Gamut Mapping Using Image Derivative Structures for Color Constancy[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 86(2): 127—139.
- [4] MARIUS P, JON Y H. A New Spatial Hue Angle Metric for Perceptual Image Difference[J]. Computational Color Imaging, 2009, 5646: 81—90.
- [5] ARNE M B, FARUP I. Predicting the Performance of a Spatial Gamut Mapping Algorithm[C]// Proceedings of the International Society for Optical Engineering, USA: SPIE, 2009: 16—24.
- [6] ZHANG Xian-dou, XU Hai-song. An Adaptively Spatial Color Gamut Mapping Algorithm[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(9): 873—877.
- [7] DUGAY F, FARUP I, JON Y H. Perceptual Evaluation of Color Gamut Mapping Algorithms[J]. Color Research and Application, 2008, 33(6): 470—476.
- [8] MOROVIC J, WANG Y. A Multi-Resolution Full-Colour Spatial Gamut Mapping Algorithm[J]. Society for Imaging Science and Technology, 2003(1): 282—287.
- [9] BERNAL E, LOCE R P, BALA R. Gamut Aim and Gamut Mapping Method for Spatially Varying Color Lookup Tables: US Patent 8077352[P]. 2011
- [10] BONNIER N. Contribution to spatial gamut mapping algorithms[D]. Telecom Paris Tech, 2008.
- [11] ALSAM A, FARUP I. Colour Gamut Mapping as a Constrained Variational Problem[J]. Image Analysis, 2009, 5575: 109—118.
- [12] ALSAM A, FARUP I. Spatial Colour Gamut Mapping by Orthogonal Projection of Gradients onto Constant Hue Lines[J]. Advances in Visual Computing, 2012, 7431: 556—565.
- [13] FARUP I, GATTA C, RIZZI A. A Multiscale Framework for Spatial Gamut Mapping[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(10): 2423—2435.
- [14] BAKKE A, FARUP I, HARDEBERG J. Evaluation of Algorithms for the Determination of Color Gamut Boundaries[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2010, 54(5): 1—11.
- [15] CHEN H S, HIROAKI K. Three-Dimensional Gamut Mapping Method Based on the Concept of Image-dependence[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2002, 46(1): 44—52.
- [16] EBNER F, FAIRCHILD M D. Development and Testing of a Color Space (IPT) with Improved Hue Uniformity[J]. Color and Imaging Conference, 1998(1): 8—13.