

# 彩色图像复制系统颜色还原校正方法研究

傅师伟 崔长彩 谢婷婷

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 为了实现彩色图像原稿在数字化复制过程中色彩的精确还原再现,基于色度特征化理论,应用多项式回归法,提出一种以扫描仪和彩色喷墨打印机组成的彩色图像数字化复制系统为应用对象的闭环式颜色还原校正模型,通过直接修正图像像素的三基色值,对彩色图像在扫描和打印这两个图像复制环节实施颜色复合统一校正。同时,采用循环逼近的校正方法,有效提高了颜色还原校正的精度。理论分析和实验结果表明,经过该模型的颜色还原校正后,复制稿与原稿的最大色差从未经校正的  $48.51\Delta E_{ab}^*$  降到了  $7.90\Delta E_{ab}^*$ ,平均色差由  $15.91\Delta E_{ab}^*$  降到了  $2.69\Delta E_{ab}^*$ ,达到了颜色精确还原再现的目的。

**关键词** 色度学; 颜色校正; 多项式回归; 扫描仪; 彩色喷墨打印机

中图分类号 O432.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0098

## A Study on the Color Correction Method of the Color Image Duplication System

Fu Shiwei Cui Changcai Xie Tingting

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

**Abstract** During the process of digitized duplication, in order to reproduce and reappear the color of the color image manuscript, a closed-loop color correction method with the application object of color image duplication system, composed of a scanner and a color ink-jet printer is proposed, which is based on the colorimetric characterization theory and applies the model of polynomial regression. Compound and untied calibration is achieve by correcting tristimulus values of image pictures when it is being scanned and printed. Accuracy of color restoration is improved effectively by circulating approximation. Theoretical analysis and experimental results show that after color correction by the method, the maximum color difference between the final copy and the original copy is reduced from  $48.51\Delta E_{ab}^*$  to  $7.90\Delta E_{ab}^*$ , and the average color difference is reduced from  $15.91\Delta E_{ab}^*$  to  $2.69\Delta E_{ab}^*$ . Thus it achieves accurate reproduction and reappearance of color.

**Key words** colorimetry; color correction; polynomial regression; scanner; color ink jet printer

## 1 引 言

彩色图像原稿在数字化复制过程中,其颜色的精确还原再现是至关重要的。目前主要采用由国际颜色协会 ICC(International Color Consortium)制订和推行的色彩管理技术来进行数字图像的颜色控制<sup>[1]</sup>,这是一种开放式的色彩控制方案,即输入端和输出端各自独立校准,输出信息不反馈到输入端参与对输出信号的控制。开放式色彩管理目前还存在一些明显的不足和技术难题<sup>[1]</sup>:1)对每个图像处理设备都要进行特征化描述,用户缺乏校正仪器和 ICC profile 生成工

具;2)色彩转换精度受到色彩转换算法、色彩空间转换次数和应用条件等多方面因素的影响;3)必须附加一个输入色彩空间的 ICC profile 到图象文件中,只适合于高级用户;4)必须依赖操作系统和第三方应用软件的支持才可得以实现。该方案测试过程和应用过程均过于烦琐、不易操作。

本文以扫描仪和彩色喷墨打印机组成的彩色图像数字化复制系统为应用对象,通过对彩色图像复制系统的输入、输出信息进行检测后,根据色度特征化理论,建立一个颜色还原校正模型,对输入图像像

**基金项目:** 福建省自然科学基金(2008J0213)资助课题。

**作者简介:** 傅师伟(1962—),男,副教授,主要从事颜色科学与成像技术、光学精密测量等方面的教学和研究。

E-mail: fushiwei@sina.com

素的三基色值进行修正,由修正后的图像文件直接驱动打印机打印输出,便可实现彩色图像复制稿的色彩对原稿色彩的精确还原再现。

## 2 颜色还原校正方案

### 2.1 色度特征化理论

如果要将颜色信息从一个设备传递到另一个设备,需要把每个设备的颜色空间的色度值(RGB)转换到一个与设备无关的 CIE 标准颜色空间的色度值(CIE  $L^* a^* b^*$  或 CIE XYZ),将设备色度值与 CIE 色度值对应关系的建立称为设备的颜色特征化<sup>[2]</sup>。颜色特征化一般可分为两种:基于光谱响应的光谱特征化方法和基于目标色的色度特征化方法<sup>[3]</sup>。

光谱特征化方法,需要使用单色仪或辐射计测量出设备的光谱响应,找出光谱响应与 CIE 色度参数之间的关系,从而实现  $RGB \rightarrow XYZ$  或  $RGB \rightarrow L^* a^* b^*$  的变换。其优点是物理过程清晰、结果准确可靠。缺点是需要专业的设备、技术和人员。

色度特征化方法,其基本思想是使用一个包含一定数量颜色样本的参考目标色,这些样本的 RGB 值由设备确定,而对应的 CIE  $L^* a^* b^*$  或 CIE XYZ 值则由测色仪器测量获得。其优点是相对简单,较为实用。

按色度特征化方法所具有的性质分类,色度特征化的主要方法有:多项式回归法<sup>[4]</sup>、三维查表法<sup>[5]</sup>及神经网络法<sup>[6]</sup>等。多项式回归算法是基于源色彩空间和目标色彩空间的色度值之间能被一组等式所联系的假设。在已知的源和目标色彩空间中选择样本色彩描述,通过选定的多项式建模,求解得到多项式系数矩阵,再把源色彩空间的色度值转换为目标色彩空间的色度值。多项式回归法与三维查表法和神经网络法相比,具有系统开销小、选取样本点可以随意,不需要均匀分割、逆转换模型容易建立、算法实现简单、运行速度快和易实现等优点。综上所述,本文采用多项式回归算法实现色度特征化并建立颜色空间的转换模型。

### 2.2 用多项式回归法进行色度特征化

选择包含一定数量颜色样本(色块)的标准色靶(Color target),各颜色样本(色块)在两个不同颜色空间中对应的色度值分别  $R_1G_1B_1$  和  $R_2G_2B_2$ 。以  $R_1G_1B_1$  作为源空间建模样本,以  $R_2G_2B_2$  作为目标空间建模样本。记输入矩阵  $R$ ,转换矩阵  $M$  和输出矩阵  $H$ ,则多项式模型可表示为

$$H = RM. \tag{1}$$

式中输入矩阵  $R$  为  $N \times m$  矩阵, $N$  为色块数, $m$  对应多项式项数。如(2)式,  $\rho_m$  为输入矩阵  $R$  的行向量,由色靶各色块的  $R_1G_1B_1$  值组成;输出矩阵  $H$  为  $N \times 3$  矩阵,行向量由色靶各色块的  $R_2G_2B_2$  值组成。

$$\begin{aligned} \rho_3 &= [R \ G \ B], \\ \rho_5 &= [1 \ RGB \ \rho_3], \\ \rho_9 &= [\rho_3 \ RG \ RB \ GB \ R^2 \ G^2 \ B^2], \\ \rho_{11} &= [1 \ RGB \ \rho_9], \\ \rho_{18} &= [\rho_9 \ RG^2 \ RB^2 \ GR^2 \ GB^2 \ BR^2 \ BG^2 \ R^3 \ G^3 \ B^3], \\ \rho_{20} &= [1 \ RGB \ \rho_{18}], \end{aligned} \tag{2}$$

式中,若  $\rho = \rho_3$ ,则表示简单线性变换,由于扩展多项式项数  $m$  可得到更精确的色度变换精度,本文选择 3 项、5 项、9 项、11 项、18 项和 20 项等多项式进行建模实验,根据实验结果和相关研究<sup>[3,7,8]</sup>,本文最终选用  $\rho = \rho_{20}$ ,即 20 项多项式来实现色度特征化并建立颜色还原校正模型,转换矩阵  $M$  是  $20 \times 3$  矩阵。

基于最小二乘法,转换矩阵  $M$  可按下式求解

$$M = (R^T R)^{-1} R^T H, \tag{3}$$

式中  $R^T$  表示  $R$  的转置,右上角的“ $-1$ ”表示矩阵求逆。

求出转换系数矩阵  $M$  即可实现任意两种颜色空间色度值  $R_1G_1B_1$  和  $R_2G_2B_2$  的转换。

### 2.3 颜色还原校正方案的实现

彩色图像原稿的复制流程如图 1 所示。1)原稿的色度值  $L^* a^* b^*$ ,经过扫描后转化为扫描图像记录值  $R_1G_1B_1$ ;2) $R_1G_1B_1$  经过颜色还原校正模型的校正后,得到扫描图像的三基色修正值  $RGB$ ;3)以修正值  $RGB$  驱动打印机打印输出得到复制稿的色度值  $L_0^* a_0^* b_0^*$ 。

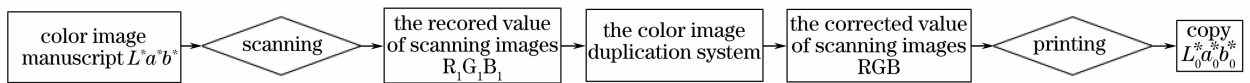


图 1 彩色图像原稿的复制流程图

Fig. 1 Program flow chart of duplicating the original color image

颜色还原校正模型要解决的关键问题是:应使复制稿的色度值  $L_0^* a_0^* b_0^*$  与原稿的色度值  $L^* a^* b^*$

保持一致,也即如何建立扫描图像记录值  $R_1G_1B_1$  与其修正值  $RGB$  的转换关系。

根据以上分析结果,本文设计的颜色还原校正模型的原理框图如图 2 所示。该模型的建立主要分为两部分,一是建立颜色空间的转换模型  $M_1$ ,实现彩色喷墨打印机 RGB 和标准 CIE  $L^* a^* b^*$  颜色空间色度值的反向转换(CIE  $L^* a^* b^* \rightarrow RGB$ );以获得扫描图像的三基色修正值 RGB;二是建立颜色空间的转换模型  $M_2$ ,实现扫描记录值  $R_1 G_1 B_1$  向其修正值 RGB 的转换( $R_1 G_1 B_1 \rightarrow RGB$ )。

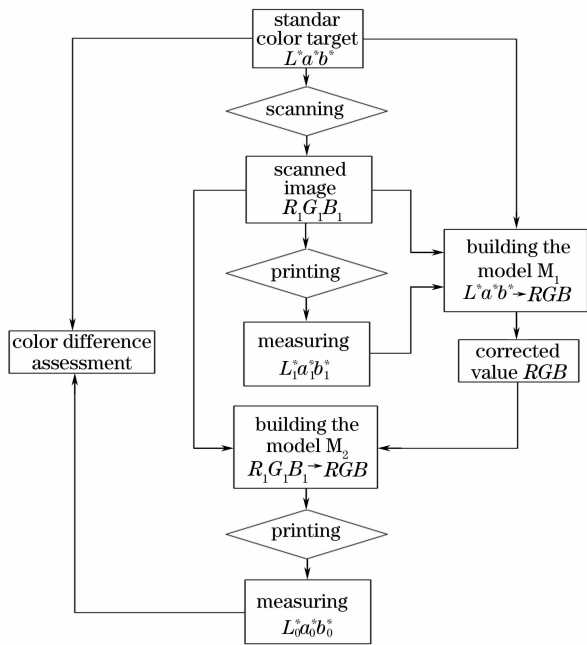


图 2 颜色还原校正模型原理框图

Fig. 2 Diagram of the principle and arrangement of color correction system

具体实现过程如下:1)选择一个标准色靶作为建模样本,样本的  $L^* a^* b^*$  值由分光光度计测量得到;2)扫描标准色靶,获得色靶的扫描记录值  $R_1 G_1 B_1$ ;3)以  $R_1 G_1 B_1$  直接驱动打印机打印输出,并由分光光度计测量得到未经校正的色靶复制稿的色度值  $L_1^* a_1^* b_1^*$ ;4)以  $L_1^* a_1^* b_1^*$  作为源空间样本、 $R_1 G_1 B_1$  为目标空间样本,采用多项式回归法,建立颜色空间的转换模型  $M_1$ ;5)为使校正后的色靶复制稿各色块的色度值  $L_1^* a_1^* b_1^*$  与原稿对应色块的色度值  $L^* a^* b^*$  保持一致,把标准色靶原稿各色块的色度值  $L^* a^* b^*$  通过转换模型  $M_1$  转换,得到扫描图像的三基色修正值 RGB;6)同理,以  $R_1 G_1 B_1$  作为源空间样本、RGB 为目标空间样本,采用多项式回归法,建立颜色空间的转换模型  $M_2$ ,转换模型  $M_2$  即为彩色图像复制系统的颜色还原校正模型,通过模型  $M_2$  即可对任一扫描输入图像的各个像素的三基色值进行修正。7)以修正值 RGB 驱动打印机打印输出,用分

光光度计测量获得经过初次校正后的复制稿的色度值  $L_0^* a_0^* b_0^*$ ,并以标准色靶的  $L^* a^* b^*$  值为参照,进行色差评定。

## 2.4 循环迭代校正

对上述闭环式颜色还原校正方案,本文采用了循环逼近的校正方法来提高颜色还原校正模型的精度<sup>[9]</sup>。若经初次校正后,色差不能满足预设要求,可把  $L_0^* a_0^* b_0^*$  反馈到输入端取代  $L_1^* a_1^* b_1^*$ ,同时用初次修正值 RGB 取代扫描记录值  $R_1 G_1 B_1$ ,按(3)式重建颜色还原校正模型,进行循环逼近校正,以提高颜色还原精度。

根据以上理论分析,本文应用 Matlab 编程<sup>[10,11]</sup>实现了该颜色还原校正模型的建立。

## 3 实 验

### 3.1 实验设备和材料

扫描仪为 EPSON Perfection 3200 PHOTO,彩色喷墨打印机为 Epson Stylus Photo R230;标准色靶为 IT8.7/2 (KODAK R2200703Q60);标准色靶及其复制稿的所有色块的 CIE  $L^* a^* b^*$  色度值都由 Gretag Macbeth Eye-One Pro 分光光度计进行测量获得。

把标准色靶中的色块按其在色卡上的排列次序均匀分成两部分,其中 120 个彩色和 24 个中性灰度色共 144 色块作为回归样本,另外 120 个彩色色块作为检验样本,颜色还原校正模型的精度由颜色再现色差即标准色靶的 CIE  $L^* a^* b^*$  与复制稿的 CIE  $L_0^* a_0^* b_0^*$  之间的色差  $\Delta E_{ab}^*$  来评价。

### 3.2 实验结果分析

实验结果如表 1 所示,经过二次循环校正后,复制稿与原稿的最大色差从未经校正的 48.51 下降到 7.90,平均色差由 15.91 降到了 2.69;色差  $\Delta E_{ab}^* \leq 6$  的色块比例从校正前的 6.67%(8/120),提高到了校正后的 97.50%(117/120)。

由于颜色还原校正模型的转换精度受到颜色样本测量误差、扫描仪和打印机的随机误差以及两者的色差差异等因素的影响,因此当实际色差被校正到一定的程度后,若再继续循环校正,已不能进一步提高颜色还原精度。

表 1 颜色还原校正模型的测试结果

Table 1 Testing results of the color correction system

Correction status	Max/ $\Delta E_{ab}^*$	Mean/ $\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{ab}^* \leq 6$ /%
Non-correction	48.51	15.91	6.67 (8 / 120)
First-correction	20.69	5.56	75.83(91 / 120)
second-correction	7.90	2.69	97.50(117 / 120)

## 4 结 论

以上实验结果表明,本文设计的闭环式颜色还原校正模型,通过直接对图像像素的三基色值进行修正,即可实现彩色图像原稿在数字化复制过程中色彩的精确还原再现。结果同时表明,采用循环逼近的校正方法,可以有效提高颜色空间色度值的转换精度。

### 参 考 文 献

- 1 Xu Dan, Meng Yaosheng, Shi Jiaoying *et al.*. ICC based color management[J]. *J. Software*, 1998, **9**(10): 740~747  
徐 丹,蒙耀生,石教英 等. 基于 ICC 标准的色彩管理研究[J]. 软件学报,1998, **9**(10): 740~747
- 2 Johnson T. Methods for characterizing colour scanners and digital cameras[J]. *Displays*, 1996, **16**(4): 183~191
- 3 Wang Yong, Xu Haisong. Colorimetric characterization for scanner based on polynomial regression models[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1135~1138  
王 勇,徐海松. 基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 1135~1138
- 4 Kang H R. Color scanner calibration[J]. *Imaging Science and Technology*, 1992, **36**(2): 162~170
- 5 Hung P C. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up table model and interpolations[J]. *Electronic Imaging*, 1993, **2**(1): 53~61
- 6 Vrhel M J, Trussell H J. Color scanner calibration via a neural network[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999, (6): 3465~3468
- 7 Xu Yanfang, Liu Wenyao, Zuo Kunlong *et al.*. Characterization of color scanners[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **12**(1): 15~20  
徐艳芳,刘文耀,左坤隆 等. 彩色扫描仪的特征化[J]. 光学精密工程, 2003, **12**(1): 15~20
- 8 Zhang Erhu, Bian Zhengzhong, Hu Tao *et al.*. ICC standard-based color testing and characterizing for color scanner[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25**(5): 611~614  
张二虎,卞正中,胡 涛 等. 基于 ICC 标准的彩色扫描仪色彩检测及标定[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(5): 611~614
- 9 Ma Yanman, Liu Haoxue, Liu Xin. A research on the color characterization of digital camera[J]. *J. Beijing Institute of Graphic Communication*, 2006, **14**(6): 9~12  
马燕满,刘浩学,刘 昕. 数码相机的颜色特征化研究[J]. 北京印刷学院学报, 2006, **14**(6): 9~12
- 10 Hu Shangxu, Chen Dezhao. The Analysis and Processing of The Observe Deta [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1996. 106~192  
胡上序,陈德钊. 观测数据的分析与处理[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1996. 106~192
- 11 Wang Yan, Sui Silian. Mathematical Statistics and The Engineering Data Analysis by MATLAB [M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2006. 89~172  
王 岩,隋思涟. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 89~172