

# 一种自适应分区回归的打印机色彩校正方法

刘瑞华, 曾 平, 王义峰

(西安电子科技大学外部设备研究所, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 为解决打印机色彩在 CIE 色彩空间内的非线性、不一致问题, 提出一种新的校正方法, 首先根据每个要输出的 CIE 色度值, 在改进的校正样本集中选取与其在色彩空间中特性最为接近的样本组成校正样本子集, 然后利用多重回归的方法进行校正, 得到 CMY 值. 实验结果表明本方法的校正精度比传统校正方法有了显著提高.

**关键词:** 色彩管理; 打印机校正; 色彩校正; 多项式回归

**中图分类号:** TP391, TP334.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2007) 11-2201-04

## A Color Calibration Method of Printer Using Adaptive Regression

LIU Rui-hua, ZENG Ping, WANG Yi-feng

(Research Institute of Computer Peripherals, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** To solve the problem that the colors of printer are nonlinearity and nonuniformity in CIE color space, a new calibration method is presented. When a CIE value is to be output, samples whose characters are consistent with that of the CIE value are first selected from the improved calibration samples. Then the subset, which is constructed by those selected samples, is used to correct the given CIE value to CMY value by multiple polynomial regression method. Experiments show that the proposed method improves the calibration precision obviously.

**Key words:** color management; printer calibration; color calibration; polynomial regression

### 1 引言

打印机是最为常用的计算机输出设备, 普遍采用  $C$  (青)、 $M$  (品红)、 $Y$  (黄) 三色墨水或者  $C$ 、 $M$ 、 $Y$ 、 $K$  (黑) 四色墨水成色, 属于 CMY 或 CMYK 色彩空间. 在输出图像时, 计算机先将存储的各类型色度值 (RGB, Lab 等) 转换为 CMY 或者 CMYK 值, 再打印输出. 打印机成色所用的各原色墨水具有非线性, 即均匀变化的墨量所呈现出的颜色并不均匀, 各色墨水组合后更是呈现出严重的非线性和不一致性. 因此, 从打印样本集中获取知识, 为要输出的色度值找到对应 CMY 值, 准确输出原色彩就显得十分困难. 为解决这一问题, 需要通过色彩管理软件进行色彩校正, 以实现输出图像与原图的一致再现.

常用的打印机色彩校正方法有 Neugebauer 方程<sup>[1,2]</sup>、三维查找表<sup>[3,4]</sup>、神经网络<sup>[5,6]</sup>和回归分析<sup>[7-9]</sup>等. Neugebauer 用方程解析表达式进行色彩校正, 使用简单, 但是需要用大量样本反复修正方程参数, 且校正精度低; 三维查找表的校正精度过分依赖校正样本数量, 当校正样本数目少时校正精度很低; 神经网络仍处

于理论研究阶段, 实现方式复杂, 网络训练时间长, 很难得到实际应用. 回归分析的方法易于实现, 但由于打印机彩色特性在色彩空间内并不一致, 难以用统一回归方程表示其特性, 因此校正精度略差.

本文提出一种自适应分区的回归校正方法, 首先改进传统样本集生成方式, 使生成的校正样本集可以更好地反映打印机色彩特性, 含有更准确的知识; 然后根据要输出的色度值在校正样本集中寻找与其特性最为接近的最佳校正样本子集; 最后用最佳校正样本子集对要输出的色度值进行回归校正. 此方法保留了回归校正易于使用, 实现简单的优点, 同时解决了其校正精度差的问题, 大幅提高了打印机的色彩输出质量.

### 2 打印机色彩校正基础

色彩管理机制通过引入设备无关的色彩空间 (device independent color space) 来实现色彩在各种输入、输出设备上的一致再现. 设备无关的色彩空间是指: 与 CIE XYZ 空间存在双射关系的任意色彩空间, 如 CIELab 空间, 相同的 CIE 色度值具有相同的视觉效果. 相应地,

设备相关色彩空间(device dependent color space)是指与 CIE XYZ 空间不存在双射关系的色彩空间<sup>[10]</sup>,通常为输入/输出设备的成色空间,如扫描仪和显示器所采用的 RGB 空间,打印机所采用的 CMY 空间.在色彩管理机制下,输入设备获取的 RGB 值将先校正转换为 CIE 空间色度值,再分别校正转换为各打印机的 CMY 值输出.受成色机制影响,打印机只能输出 CIE 空间内一定范围的色度值,此范围称为打印机的色域<sup>[10]</sup>.因此输出前需要先进行色域匹配<sup>[11~13]</sup>,将图像的 CIE 色度值全部映射到打印机色域内,然后进行到 CMY 空间的校正转换.

打印机普遍采用 CMY 三色或 CMYK 四色再现色彩.事实上 CMY 三色已经可以满足成色需求,等量的 C、M、Y 墨水即可产生相应的 K.加入 K 墨水可节约彩色墨水,降低打印成本并克服三色墨水组合出的中性灰色偏的缺点<sup>[10]</sup>.对打印机色彩进行校正首先是对 CMY 三色通道特性进行校正,最后经过 GCR(灰度分量替代)处理加入 K 墨水<sup>[14,15]</sup>.可以说对 CMY 三通道校正的质量决定了打印机输出色彩的精确程度,而 GCR 处理的质量决定了打印成本和输出的中性灰质量.本文的研究重点是 CMY 三色的特性校正.

设打印机输出的 CMY 值为  $c$  (三维坐标),测量得到的 CIE 色度值为  $t$  (三维坐标),则:

$$t = F_{\text{printer}}(c), c \in \Omega_{\text{printer}} \quad (1)$$

$F_{\text{printer}}(\cdot)$  表示由打印机色彩空间到 CIE 色彩空间的非线性映射关系,  $\Omega_{\text{printer}}$  表示打印机所有的 CMY 值集合.相应地,打印机色域内的 CIE 色度值总是可以通过变换  $F_{\text{printer}}^{-1}(\cdot)$  转换为 CMY 值,即:

$$c = F_{\text{printer}}^{-1}(t), t \in G_{\text{printer}} \quad (2)$$

打印机的色域  $G_{\text{printer}}$  定义为:

$$G_{\text{printer}} = \{t \in \Omega_{\text{cie}} \mid \exists c \in \Omega_{\text{device}}, F_{\text{device}}(c) = t\} \quad (3)$$

打印机色彩校正实质上就是求出映射关系  $F_{\text{printer}}^{-1}(\cdot)$ ,以完成从 CIE 色度值到打印机 CMY 值的精确转换.

打印机色彩校正一般在 CIELab 空间内进行,因为此空间是视觉均匀的色彩空间,即空间内两点的欧式距离与视觉差异成正比,从而可以用直观的几何方法解决色域匹配问题<sup>[10,11]</sup>.

### 3 自适应回归的色彩校正算法

#### 3.1 打印机色彩的多项式回归校正

由于打印机的特性在 CIELab 空间内不一致,因此采用回归校正可以有效减小校正误差,本文针对实验环境选取二次回归作为研究基础.我们对打印机回归校正方法进行建模分析如下,将校正样本集的每一

CMY 值记作  $c_i = [C_i M_i Y_i]^T, 1 \leq i \leq K$ ,则可将校正样本集的所有 CMY 值集合记为  $K \times 3$  的矩阵  $C_s$ ,即  $C_s = [c_1, \dots, c_K]^T$ .相应地,  $C_s$  中的 CMY 值输出后可用分光测色仪测量得到对应色度值,记为  $t_i = [L_i a_i b_i]^T, 1 \leq i \leq K$ ,测量值集合记为  $K \times 3$  矩阵  $T_s$ ,即  $T_s = [t_1, \dots, t_K]^T$ .考虑到  $L$ 、 $a$ 、 $b$  三坐标之间相关性对 CMY 值的影响,定义  $\tilde{t}_i$  与  $\tilde{T}_s$  如下:

$$\tilde{t}_i = [1 \ L_i a_i b_i \ L_i a_i L_i b_i \ a_i b_i \ L_i^2 a_i^2 b_i^2]^T \quad (4)$$

$$\tilde{T}_s = [\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_K]^T \quad (5)$$

打印机的色彩校正问题可表示为求出  $10 \times 3$  的校正矩阵  $M$ ,使得:

$$C_s \approx \tilde{T}_s M \quad (6)$$

即,求校正矩阵  $M$ ,满足:

$$M = \arg(\min_M \sum_{i=1}^K \|\tilde{t}_i M - c_i\|^2) \quad (7)$$

根据最小二乘法,可求得  $M$  如下:

$$M = (\tilde{T}_s^T \tilde{T}_s)^{-1} \tilde{T}_s^T C_s \quad (8)$$

由此,可得出校正函数  $F_{\text{printer}}^{-1}(\cdot)$  为:

$$F_{\text{printer}}^{-1}(\cdot) = (\tilde{t}^T (\tilde{T}_s^T \tilde{T}_s)^{-1} \tilde{T}_s^T C_s)^T \quad (9)$$

#### 3.2 校正样本集生成方法

打印机的校正样本集应当反映出整个打印机 CMY 色彩空间的特性.单独打印 C、M、Y 三通道均分数据并测量,进行三维可视化,可观察发现其相应色度值在 CIELab 空间内的分布并不均匀且非线性严重,如图 1 所示.

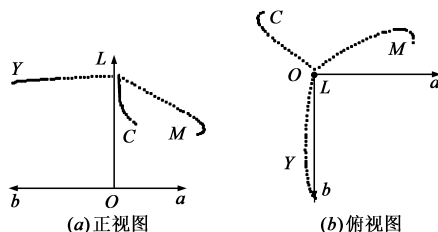


图 1 C、M、Y 三通道在 CIELab 色彩空间的特性分布

为保证校正精度,可在 C、M、Y 三个通道在 CIELab 空间内非线性与不均匀性较强的区域加大采样密度,在非线性较弱和较均匀的区域减小采样密度,最后进行组合,生成 CMY 校正样本集.由图 1 可看出,各通道在墨量较小的区域线性较好,在墨量较大的区域非线性严重.因此本文在每个通道 0 ~ 70% 的墨量区域和 70% ~ 100% 的墨量区域各采用一半的采样数目.由于 C、M、Y 各通道在 CIELab 空间内的特性不相同,因此可以对每个通道采用不同的采样数,组合生成校正样本集.

#### 3.3 针对输入值的自适应校正算法

传统二次多项式回归校正算法以二次曲线的形式逼近真实打印机特性,但打印机特性在 CIELab 空间内

的不一致性使其并不能用二次曲线的形式精确描述.为解决这个问题,有设备的分区校正算法将色彩空间划分为不同的子区域,在每个子区域采用不同的回归方程进行校正,即以均匀分段二次曲线的形式来逼近打印机特性.此方法的局限在于分区仅是简单的正交划分,并不能保证打印机在每个子区内的特性一致.

为解决以上问题,考虑利用要输出的 Lab 色度值在色彩空间中的位置信息,在 CIELab 空间内寻找与其特性最为接近的校正样本子集来进行回归校正,从而保证对所有 Lab 色度值均达到最佳回归效果,精确映射到最佳 CMY 值.由于校正样本集固定,因此需要对每个 Lab 色度值  $t_i$  在校正样本集中选取与其对应的最优校正样本子集  $T_{sub}$ ,写成矩阵形式为:  $T_{sub} = [t_1 \cdots t_k]^T$ ,  $20 \leq k \leq K$ ,  $T_{sub} \subseteq T_s$ . 用最优校正样本子集  $T_{sub}$  对 Lab 值进行二次回归校正,可求得对应的设备 CMY 值  $c_i$  如下:

$$c_i^T = \tilde{t}_i^T (\tilde{T}_{sub}^T \tilde{T}_{sub})^{-1} \tilde{T}_{sub}^T C_{sub} \quad (10)$$

使用式(10)进行校正计算的前提是,需要在校正样本集对应的 Lab 色度值集合  $T_s$  中求与 Lab 色度值  $t$  在色彩空间内特性最接近的校正样本子集  $T_{sub}$ ,定义此函数为  $Z$ ,则:

$$T_{sub} = Z(T_s, t) \quad (11)$$

由以上分析可知,对于要输出的 Lab 色度值  $t$ ,只要通过函数  $Z$  找到最佳校正样本子集  $T_{sub}$ ,就可以通过多重回归方法根据式(10)求得最优的 CMY 值  $c$ .

此校正方法的思路与传统打印机校正方法的区别在于,事先不建立设备校正函数  $F_{printer}^{-1}(\cdot)$ ,而是根据每一 Lab 色度值的色彩空间特性自适应地建立与其对应的最佳校正函数  $F_{printer}^{-1'}(\cdot)$ ,以保证更高的校正精度.

4 一种校正样本子集提取方法

根据 3.3 节提出的算法思想,本节给出一种较好的校正样本子集的提取算法.

由图 1 可看出打印机特性在 CIELab 空间内的虽然不一致,但连续变化,并在邻域内一致.基于这一结论,可以认为在 CIELab 空间内越接近的色度值特性也越相似.因此,选取与要输出 Lab 色度值在 CIELab 空间内欧式距离最近的  $n$  个校正样本作为校正样本子集.

设  $S_0 = T_s$ ,  $t$  为要输出的 Lab 色度值,定义  $s_i$  及  $S_i$  如下:

$$s_i = \arg \min_{s_j \in S_i} \|s_j - t\|, \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (12)$$

$$S_i = S_{i-1} - \{s_{i-1}\}, \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (13)$$

其中  $\|\cdot\|$  表示欧式距离.

根据以上推导,定义  $Z$  如下:

$$Z(T_s, t) = \{t_i | t_i = \arg \min_{c_j \in S_i} \|t_i - t\|, i = 1, 2, \cdots, n\},$$
$$20 \leq n \leq K \quad (14)$$

$n$  为进行回归所需的校正样本个数.其含义是在 CIELab 空间内进行回归的样本子空间范围,即回归后的特性曲线逼近打印机特性曲线的区间大小.由于采用三元二次回归,共有 10 个待定系数,因此当  $n$  取 20 时,回归样本个数刚好满足回归逼近的一般条件;当  $n$  取  $K$  时,算法即为普通回归算法.由此可知, $n$  的取值越小,表示在 CIELab 空间越小的范围内用二次曲线逼近其特性.因此,在满足回归逼近条件的基础上,当  $n$  取 20 时,空间划分最小,本方法理论精度最高.

5 实验结果

本节对比了使用普通回归算法和自适应分区回归算法对 HP DesignJet 800 打印机进行校正的结果.实验采用 3.2 节描述的方法生成校正样本集.根据打印机的特性,对  $C$ 、 $M$ 、 $Y$  三通道分别采用非均匀的 8 级、9 级和 11 级采样,全组合得到 1188 个样本的样本集.通过打印机输出样本集后使用分光测色仪 Spectrolino 测量得到对应的 Lab 色度值.分别用普通回归算法和自适应回归算法对测量得到的 Lab 色度值进行校正得到 CMY 值,与原 CMY 值进行比较分析.

表 1 两种算法的校正结果对比

	平均 $\Delta C$	最大 $\Delta C$	平均 $\Delta M$	最大 $\Delta M$	平均 $\Delta Y$	最大 $\Delta Y$
普通回归校正	0.0317	0.1108	0.0233	0.1354	0.0247	0.1188
自适应聚类回归校正	0.0033	0.0316	0.0026	0.0194	0.0049	0.0265

由表 1 可看出,自适应分区回归校正算法相对普通回归校正大幅提高了校正精度,可以更准确地逼近设备特性. $C$ 、 $M$ 、 $Y$  值均已进行归一化到<sup>[0,1]</sup>区间,0.01 的墨量误差足以造成明显的色彩差异.实验结果表明自适应回归的校正方法大幅提高了打印机的色彩输出质量.

6 结论

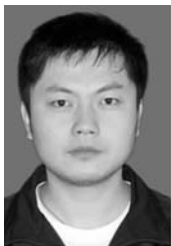
本文提出了一种打印机校正方法的模型,根据要输出的 Lab 色度值自适应地选取最佳校正样本子集进行回归校正,显著提高了校正精度.与其他打印机校正方法如 Neugebauer 方程、查找表等方法相比较,自适应分区的回归算法可以提供更精确、更连续的图像色彩再现效果.提出的自适应回归的思想亦可应用于其他设备的特性校正及其它用回归来解决的问题.

参考文献:

[1] C De M Bezerra, C J Hawkyard. Colour matching for ink-jet prints on paper[J]. Color Research and Application, 1998, 23 (1): 18 - 26.

- [2] Zeng Huanzhaom, P G Anderson. Expanded Neugebauer model for printer color formation[A]. SPIE Proc of the 1999 Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts IV[C]. USA: SPIE, 1999. 27 – 36.
- [3] Kim Yun-Tae, Cho Yang-Ho. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion[A]. Proc of IS&Ts International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications[C]. USA: IS&T, 2003. 28 – 29.
- [4] Son Tao. A sampling method for printer characterization[A]. Proc of 2005 Beijing International Conference on Imaging: Technology and Applications for the 21st Century[C]. USA: IS&T, 2005. 138 – 139.
- [5] Tominaga, Shoji. Color control of printers by neural networks [J]. Journal of Electronic Imaging, 1998, 7(3): 664 – 671.
- [6] 郭茂祖, 王亚东. 基于 BP 网络的色彩匹配方法研究[J]. 计算机学报, 2000, 23(8): 819 – 823.  
GUO Mao Zu, WANG Ya Dong, et al. Research of color matching method based on BP network[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(8): 819 – 823. (in Chinese)
- [7] Xia Minghui, Saber Eli. End-to-end color printer calibration by total least squares regression[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1999, 8(5): 700 – 716.
- [8] 苏晓红, 郭茂祖. 基于偏最小二乘回归分析的混色数据学习算法研究[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 429 – 431.  
SU Xiao hong, GUO Mao zu, et al. Research of mix-color data learning algorithm based on partial least square regression[J]. Acta Electronical Sinica. 2001, 29(3): 429 – 431. (in Chinese)
- [9] David Littlewood, Ganesh. Subbarayan. Maintaining an accurate printer characterization[A]. Proc of the Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications [C]. USA: IS&T, 2004. 203 – 210.
- [10] M J Vrhel, H J Trussell. Color device calibration: a mathematical formulation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(12): 1796 – 1806.
- [11] J Morovic, M R Luo. The fundamentals of gamut mapping: A survey[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2001, 45(3): 283 – 290.
- [12] J Morovic. To develop a universal gamut mapping algorithm [D]. Ph. D. Thesis, University of Derby, 1998.
- [13] 刘瑞华, 王义峰, 曾平. 一种分区变锚点的高饱和度色域匹配算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6): 922 – 924.  
Liu Rui-hua, Wang Yi-feng, Zeng Ping. A high saturation mapping algorithm using the gamut partition and variant anchor[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(6): 922 – 924. (in Chinese)
- [14] Ricardo L de Queiroz, Karen. M. Braun. Detecting spatially varying gray component replacement with application in watermarking printed images[J]. Journal of Electronic Imaging, 2005, 14(3): 033016.
- [15] Wu Tung-Lin, Wu Yen-Hsing. A table-based ink-reducing approach with estimating ink limitation of media and gray component replacement for printing devices[A]. Proc of International Conference on Digital Printing Technologies[C]. JAP: IS&T, 2004. 483 – 486.

#### 作者简介:



刘瑞华 男, 1980 年 1 月出生于陕西省延安市, 西安电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为计算机图形图像处理和色彩管理.  
E-mail: rhlui@mail.xidian.edu.cn



曾平 男, 1956 年出生于重庆市, 西安电子科技大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为计算机图形学、计算机图像处理、色彩管理技术、计算机外部设备技术等.  
E-mail: zp8637@126.com