

文章编号 1004 924X(2004)03 0265-05

# 彩色打印机色空间变换的色度密度方法

徐艳芳, 刘文耀

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 提出了一种用于彩色打印机色空间变换的方法。基于输出色彩单色色度特性与数字驱动值以及复色与单色色度特性之间存在着二维和三维的特征关系, 通过色度密度的概念及神经网络方法将此特征关系定量化, 由此建立了输出色度色空间与输入数字色空间之间的变换关系。采用 729 组训练数据的实验结果表明, 该色度密度方法达到的变换精度高于一些直接建立输出输入关系的方法。喷墨打印系统的实验结果表明, 输出 CIELAB 色度平均和最大色差分别为 3.18 和 16.0; 260 组泛化测试 CIELAB 色度平均和最大色差分别为 4.00 和 16.8。

**关键词:** 彩色打印机; 色空间变换; 色度密度; 多项式拟合; 人工神经网络; 色差

中图分类号: TP334.84; O432.3 文献标识码: A

## Colorimetric density method for color space conversion of color printer

XU Yarr fang, LIU Werr yao

(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering,  
Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Tianjin University,  
Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new method is proposed for color space conversion of color printers. Based on the concept of colorimetric density and artificial neural network, the one dimension relationship between colorimetric characteristics of primary colors and printing data and the three dimension colorimetric relationship between complex colors and primary colors were established together with the relationship between the two color spaces, output colorimetric space and input data space. Experiments were made with 729 samples and the experimental results showed that the conversion accuracy of this method is higher than those of some other methods, which build direct relationship between output and input. For one printer, the mean and maximal CIELAB c. d. (color difference) of 729 samples are 3.18 and 16.0, respectively, and these of 260 test samples are 4.00 and 16.8.

**Key words:** color printer; color space conversion; colorimetric density; polynomial fit; artificial neural network; color difference

## 1 引言

彩色影像的广泛应用引发了这样的问题: 如何在诸如喷墨打印机、激光打印机等各种数字输

出设备上成功地再现屏幕上的色彩? 这是数字彩色工作流程中关键而难以解决的问题。数字显示和输出设备都以自己独特的方式表征色彩, 其可实现的色域直接与设备特性相关。在不同色域的关联中, 首要解决的是色空间之间的变换问题。

由于显示设备以 RGB(红、绿、蓝) 加色方式实现色彩, 而输出设备以 CMY(K)(青、品红、黄、黑) 减色方式实现色彩, 再加之设备特性、输出材料特性以及环境等多种因素的影响, 显示和输出色空间之间通常为非常复杂的非线性关系。从整体体系来看, 表现为显示 RGB 色空间与输出 CIE 色度色空间(CIEXYZ 或 CIELAB) 之间为复杂的非线性关系。色空间关系的建立有基于体系物理特性的分析模型方法, 如印刷工业中应用的纽介堡方程<sup>[1]</sup>、影像工业中应用的蒙版方程<sup>[2]</sup>等, 也有多项式回归<sup>[3]</sup>、三维查找表与插值<sup>[4]</sup>、神经网络<sup>[5]</sup>等“黑箱”技术方法。这些方法各有其优势与不足, 对不同的输出体系, 各有其不同的适应能力。此外, 在所谓的“黑箱”技术中, 通常直接建立输入、输出关系, 而不管内部所涉及的物理过程。虽然这在计算机技术高度发展的今天已成为可行, 但有时缺乏问题的针对性, 不一定是最优方式。

本文针对彩色喷墨打印系统, 阐述一种结合内部特性的两步方法。即通过色度密度概念的建立, 结合体系的单色色调特性和色调复合特性, 将输出 CIE 色度色空间与输入 RGB 数字色空间的变换分成两步完成。实验结果表明, 与文献[4]中的三维立方查找表与线性插值等方法相比, 色度密度的两步方法具有更高的转换精度, 且运算快速、稳定。

## 2 色度密度方法

在输出色彩再现控制过程中, 最关键的是输出的 CIE 色度空间(CIEXYZ 或 CIELAB 数值) 到显示 RGB(数值) 空间的变换, 称为输出设备的校准。本试验的方法即描述这一过程。

### 2.1 方法原理

对一 CIEXYZ 三刺激值描述的色彩, 其色度密度定义为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} DX &= -\log_{10}(X/X_0) \\ DY &= -\log_{10}(Y/Y_0) \\ DZ &= -\log_{10}(Z/Z_0), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, XYZ 和  $X_0Y_0Z_0$  分别为所呈颜色和基材本身的 CIEXYZ 值, 称为红、绿、蓝(或青、品红、黄) 色度密度。

色度密度方法的色空间变化分为以下 2 个步骤:

(1) 确定任一颜色的分析色度密度和合成色度密度。

从 RGB 数字的意义上看,  $R$  代表加色成色方式中红光的强度; 而对应到减色成色方式中则代表对红光的调制程度, 即青色色料量, 主要影响 CIEXYZ 色度中的  $X$  值。故而在  $G$ 、 $B$  值保持最大 255 不变(代表输出色不吸收绿、蓝光, 即没有品红和黄色料) 时, 不同的  $R$  值打印输出的色样应为不同亮度的青单色色调, 其  $X$  值的变化最大。这样, 将青色调中  $X$  值决定的色度密度称为青色调的分析色度密度, 记为  $dX$ 。同样的方式, 可以定义品红和黄色调的分析色度密度  $dY$  和  $dZ$ 。

可以这样认为, 原理上分析色度密度代表 3 个减色成色色料单独存在时的主吸收, 即单独反映三色色料量。与 RGB 数值中的一个相关联, 因而存在着  $R$  与  $dX$ 、 $G$  与  $dY$ 、 $B$  与  $dZ$  之间一维的对应关系, 一般情况下可建立一维查找表。简单的一维关系使问题明显简化, 这便是引入分析色度密度概念的原因。

当 RGB 为任意数字组合时, 原理上输出颜色由不同量的 3 原色色料组合而成, 共同形成的 CIEXYZ 值决定的色度密度则称为合成色度密度, 记为  $DX$ 、 $DY$ 、 $DZ$ 。

对已知的打印过程, RGB 驱动值和上述一维关系可决定输出色的分析色度密度; 由输出色彩测试的 CIEXYZ 值可决定其合成色度密度。

(2) 建立合成色度密度与分析色度密度间的非线性对应关系。

分析色度密度与合成色度密度的概念和含义借助于摄影和印刷领域中分析密度和合成密度的概念。这里, 合成密度  $D_r$ 、 $D_g$ 、 $D_b$  与分析密度间  $d_r$ 、 $d_g$ 、 $d_b$  的关系原理上符合蒙版方程<sup>[2]</sup>, 即简单的三变量一维线性关系:

$$\begin{aligned} D_r &= a_{11}d_r + a_{12}d_g + a_{13}d_b \\ D_g &= a_{21}d_r + a_{22}d_g + a_{23}d_b \\ D_b &= a_{31}d_r + a_{32}d_g + a_{33}d_b, \end{aligned} \quad (2)$$

将这一概念推广到数字输出的色度密度情况, 由于存在着多色料(在简单的四色系统中, 原色色料除了青、品红、黄外, 还有黑色色料)、色料间的相互作用、色料叠印顺序、色料与基材的相互作用等多种因素的影响, 须采用高阶蒙版方程即

三变量的多项式关系模拟实际情况<sup>[6]</sup>, 如 3 次 19 项多项式关系。以  $f$  表示为(3-a)式:

$$\begin{aligned}
 DX &= f_1(dX, dY, dZ) \\
 DY &= f_2(dX, dY, dZ) \\
 DZ &= f_3(dX, dY, dZ), \quad (3-a)
 \end{aligned}$$

由于输出设备色空间变换需要由  $DXDYDZ$  到  $dXdYdZ$  的关系, 又由于多项式的反向变换亦为多项式关系, 故可有相同的关系形式(3-b)式:

$$\begin{aligned}
 dX &= F_1(DX, DY, DZ) \\
 dY &= F_2(DX, DY, DZ) \\
 dZ &= F_3(DX, DY, DZ), \quad (3-b)
 \end{aligned}$$

(3-b)式即为合成色度密度与分析色度密度的关系表达式。除了高阶多项式外, 也可采用其它适合的非线性关系。

如上所述, 经过定义式(1), 将 CIEXYZ 变换为合成色度密度  $DXDYDZ$ , 经非线性变换, 将  $DXDYDZ$  变换为分析色度密度  $dXdYdZ$ , 再经三个一维关系(一维查找表与插值)变换为 RGB, 实现输出 CIE 色空间到 RGB 设备色空间的变换。

### 2.2 实验流程

依方法原理, 设计的实验流程如图 1 所示。

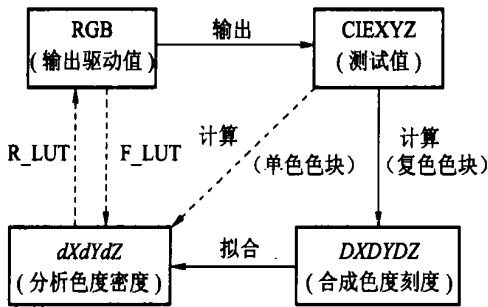


图 1 实验流程图  
Fig. 1 Test flow

$DXYZ$  即  $DX, DY, DZ, dXYZ$  即  $dX, dY, dZ$ , 以下同。

说明如下:

(1) 设置  $R=0, 15, 30, \dots, 255, G=B=255; G=0, 15, 30, \dots, 255, R=B=255; B=0, 15, 30, \dots, 255, R=G=255$  共  $18 \times 3$  组 RGB 数值打印输出色块, 测试各色块在  $D50$  光源下的  $CIEXYZ$  数值, 由式(1)计算得到各色样的分析色度密度  $dX, dY, dZ$ ; 而后建立由  $R$  到  $dX$ 、由  $R$  到  $dY$ 、由  $B$  到  $dZ$  的 3 个正向一维查找表  $F\_LUT$  和相反过程的

3 个反向一维查找表  $R\_LUT$ 。如图 1 中虚线箭头所示。

(2) 设置一定 RGB 数值有规律变化的 729 个组合值, 输出色块, 记为复合色块。测试其在  $D50$  光源下的  $CIEXYZ$  数值, 由式(1)计算得到各色样的合成色度密度, 记为  $DXYZ$ 。由打印驱动值 RGB 经三个正向一维查找表  $F\_LUT$  插值求出各对应色块的分析色度密度  $dXYZ$ , 建立由  $DXYZ$  到  $dXYZ$  的非线性拟合关系  $F$ 。如图 1 中实线箭头所示。

### 3 实验与分析

实验对象: 1 台 Hp 和 2 台 Epson 彩色喷墨打印机。分别记为 Hp、Epson1 和 Epson2。

#### 3.1 色度密度方法的筛选

首先, 利用文献[4]中给出的打印测试数据, 设计并实践了几种不同的变换方法。结果表明, 色度密度的方法为最佳。方法说明如下: 拟合的 RGB 数值与原 RGB 驱动数值误差见表 1。

方法 1:  $L^* a^* b^* \rightarrow RGB$ (三维查找表与线性插值<sup>[4]</sup>)

方法 2:  $L^* a^* b^* \rightarrow RGB$ (多项式拟合)

方法 3:  $XYZ \rightarrow RGB$ (多项式拟合)

方法 4:  $DXYZ \rightarrow RGB$ (多项式拟合)

方法 5:  $DXYZ \rightarrow dXYZ$ (多项式拟合)  $\rightarrow RGB$ (三色一维查找表与线性插值)

多项式为 3 次 19 项。

表 1 5 种方法的 RGB 拟合误差

Tab.1 RGB fit errors for five methods

方法	$\Delta RGB(\Delta RGB_{max})$
方法 1	8.90(80)
方法 2	6.57(45)
方法 3	9.28(60)
方法 4	25.56(200)
方法 5	5.90(30)

#### 3.2 色度密度方法的优化

上述  $DXYZ \rightarrow dXYZ$  采用 3 次 19 项多项式拟合, 是基于实际中由于上述多种因素的影响, 其关系形式与蒙版方程偏离较大, 为较复杂的非线性关系。

鉴于人工神经网络方法描述非线性关系的强

大能力和在色彩控制中的应用<sup>[5-7]</sup>, 试验进行了  $dXYZ \rightarrow dXYZ$  关系的神经网络方法研究。为了比较, 同时建立了  $L^* a^* b^*$  到 RGB 的网络拟合。分别记为方法 6 和方法 7:

方法 6:  $dXYZ \rightarrow dXYZ$  (网络拟合)  $\rightarrow$  RGB (三

色一维查找表与线性插值)

方法 7:  $L^* a^* b^* \rightarrow$  RGB (网络拟合)

经试验确定了 20 个隐含层单元的三层 BP 网络。拟合结果见表 2 中数据。

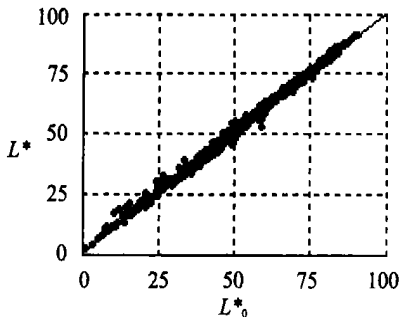
表 2 色度密度方法及与其他直接关系方法的比较

Tab.2 RGB fit errors of the colorimetric density method and some other methods

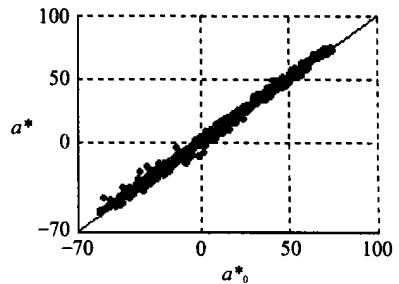
输出系统		文献[4]	Hp	Epson <sub>1</sub>	Epson <sub>2</sub>
方法 1	$\Delta$ RGB ( $\Delta$ RGB <sub>max</sub> )	8.91(88)	8.94(90)	10.79(100)	9.30(101)
方法 5	$\Delta$ RGB ( $\Delta$ RGB <sub>max</sub> )	5.90(30)	7.33(50)	8.81(56)	8.89(58)
方法 6	$\Delta$ RGB ( $\Delta$ RGB <sub>max</sub> )	3.66(20)	5.79(41)	5.87(38)	5.92(48)
方法 7	$\Delta$ RGB ( $\Delta$ RGB <sub>max</sub> )	4.02(23)	6.19(49)	7.76(56)	6.75(50)

试验发现, 相同的 20 个隐含层的网络情况下, 色度密度网络实现的 RGB 拟合精度都比  $L^* a^* b^* \rightarrow$  RGB 网络精度高, 后者 30 个隐含层情况实现的精度接近前者 20 个隐含层情况。但后者无论是 20 还是 30 个隐含层情况, 网络训练收敛慢且不稳定, 有时出现病态矩阵; 而前者网络训练快而稳定, 重复性好。可见, 色度密度的网络拟合方法具有比直接的色度网络和色度密度多项式方法更加优越的性能。

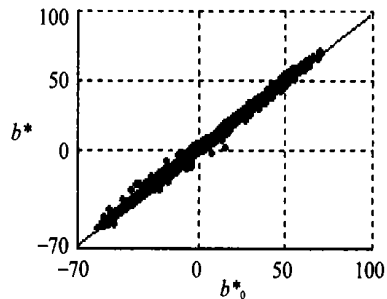
对 Epson 1 喷墨打印系统(色度密度网络方法(方法 6)进行了实际打印效果评价。将 729 组打印输出的色彩值由已建立关系拟合的 RGB 值再次打印输出, 测试其在 D50 光源下的色度值。



(a) 输出色度值  $L^*$  与设定值  $L_0^*$  间的对应关系  
(a) Relation between the output  $L^*$  and the design  $L_0^*$



(b) 输出色度值  $a^*$  与设定值  $a_0^*$  间的对应关系  
(b) Relation between the output  $a^*$  and the design  $a_0^*$



(c) 输出色度值  $b^*$  与设定值  $b_0^*$  间的对应关系  
(c) Relation between the output  $b^*$  and the design  $b_0^*$

图 2 Epson 1 喷墨打印系统 CIELAB 色度输出值与设定值间的关系

Fig. 2 Relation between the output CIELAB and the design CIELAB

与原输出色度值进行  $L^* a^* b^*$  色差  $\Delta E_{ab}$  计算, 得到 729 组色样的平均色差和最大色差分别为 3.18 和 16.0; 而相同过程三维立方查找表与插值方法(方法 1) 平均色差和最大色差分别为 4.99 和 42.7。

色度密度网络方法得到的色度值  $L^* a^* b^*$  与原输出色度值  $L_0^* a_0^* b_0^*$  的关系及色差见图 2 和图 3。图 2 中 3 个关系的线性相关系数都在 0.997 以上, 表明具有较好的拟合效果。

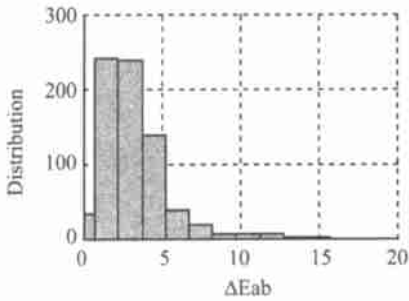


图 3 Epson 1 喷墨打印系统色转换的色差分布  
Fig. 3 Distribution of color difference

为了检验色度密度网络方法的泛化能力, 实验设计与 729 组 RGB 数值不同的 260 组 RGB 值, 经打印输出、测试和利用已建立色空间变换关系再次输出、测试, 得到 260 个色样的平均色差和最大色差分别为 4.00 和 16.8。与 729 组训练色

参考文献:

样相比, 没有较大的增大, 表明 729 个色样的色度密度网络方法具有较好的泛化能力。

## 4 结 论

与直接建立输出、输入关系的三维立方查找表与插值方法、多项式拟合、神经网络等方法相比, 分两步过程的色度密度方法能实现更高的色空间变换精度。色度密度方法中, 对表征色彩复合特性的合成色度密度与分析色度密度非线性关系的拟合, 神经网络较 3 次多项式更具优势。与直接关系的网络方法比较, 色度密度的网络训练快速、稳定。

色度密度方法利用了单色色度特性与设备数字驱动值之间以及单色与复色色度特性之间两方面的特征关系, 有针对性地解决了色空间变换过程中不同环节的问题, 不仅实现了较高的变换精度, 同时降低了问题中非线性关系的复杂程度。

在色空间变换建立中, 色彩采样非常重要。输出色样色彩值在视觉空间中的非均匀性会增加预测结果的偏差<sup>[8]</sup>。本试验所用 729 个色样, 由均匀分布的 RGB 数值给出, 但在 CIELAB 色度空间中却很不均匀。为了提高方法的预测精度, 下一步需在输出色样的均匀性上做进一步研究。

- [1] AMIDROR I S, ROGER D. Neugebauer and demichei: dependence and independence in trscreen superpositions for colour printing[J]. *Color Research and Application*, 2000, 25(4):267-277.
- [2] 周世生, 高等色彩学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 1997.  
ZHOU SH SH, *Advanced chromatics*[M]. Beijing: Printing Industry Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [3] XIA M, SABER E, TEKALP A M. End to end color printer calibration by total least squares regression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(5): 706-716.
- [4] VRHEL M J, TRUSSELL H J. Color printer characterization in MATLAB [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2002. 457-460.
- [5] SHIRO U, YOSHIFUMI A. Neural networks for device independent digital color imaging[J]. *Information Science*, 2000, 123(1-2): 115-125.
- [6] JOHNSON T. Methods for characterizing color printers[J]. *Displays*, 1996, 16(4): 193-202.
- [7] 徐艳芳, 刘文耀. 彩色扫描仪的特征化[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 15-20.  
XU Y F, LIU W Y, Color scanner characterization[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1): 15-20. (in Chinese)
- [8] LEE E, AHN S. Color space conversion via gamut based color samples of printer[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2001, 45(5): 427-435.

作者简介: 徐艳芳(1963-), 女, 河北省保定市人, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为彩色数字图像处理及色彩性能评价。E-mail: fang912@21cn.com