

数码彩扩机色域匹配模型研究*

穆宝忠 叶 子 余飞鸿

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 色域匹配是数码彩扩机实现图像颜色较好再现的关键. 首先, 采用一种较为实用的方法对 CRT 显示器进行了标定, 运用 Beer 色料理论预测了彩色相纸的色域. 在此基础上, 运用非线性压缩算法实现从 CRT 到彩色相纸的色域匹配, 同时提出了虚拟色域的概念, 并加以分析研究. 结果表明, 非线性压缩色域匹配模型对于建立数码彩扩机的颜色管理系统具有重要实用价值. 采用这种方法在国家高新技术激光数码彩扩机中取得了高质量的扩印效果.

关键词 色域匹配; CRT 的标定; 虚拟色域; 非线性压缩

中图分类号 TP334.8+4; TB852.2+1

文献标识码 A

0 引言

随着计算机技术与 internet 技术的发展, 人们对于数字图像的传输与操作变得更为方便自由. 数字图像的去向主要有存储、发电子邮件和输出照片(包括冲印和打印)三种方式. 相比于打印, 冲印照片由于其低价格和高分辨率而成为照片输出的主流. 因而一种新型的设备——数码彩扩机便在这一背景下应运而生.

数码彩扩机实质上是一种实现数码输入到传统相纸输出的设备. 整个设备可以看作是由数字图像输入设备、曝光控制设备、冲印输出设备三部分构成.

通常输入端是以 RGB 格式表示的数字图像, 经过校色软件处理后的输出值以三个独立通道控制红绿蓝三色曝光, 最后冲印显影形成一定的图像^[1].

作为常见输入端的 CRT 显示器, 每个象素点是由三个电子枪发射荧光粉加色呈色; 而输出端的相纸, 则是三种染料曝光沉淀后减色呈色, 因而 CRT 显示器与相纸具有不同的色域特性. 如何实现两个不同设备相关颜色空间的色域匹配将是颜色正确再现的关键.

1 CRT 显示器的标定

在计算机 24 位真彩系统中, 数字图像是以 RGB 颜色空间来表示. 设某一颜色 (R, G, B) 在 CRT 上显示时, 其亮度值分别为 L_R 、 L_G 、 L_B , 根据显示器特性, 亮度值与用户控制输入值之间可由显示器的 Gamma (γ) 校正关系式表示^[2]

$$\left. \begin{aligned} L_R &= K_R R^{\gamma_R} \\ L_G &= K_G G^{\gamma_G} \\ L_B &= K_B B^{\gamma_B} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对于特定显示器, K 与 γ 值为常数, L 可以通过透射式色度计测得.

在实际测量中, 由于受到测量环境和显示器本身不稳定性的影响, 随着 R 、 G 、 B 值的变化, 所得 K 与 γ 值存在较大的误差, 因而理论上通过 γ 校正式建立象素与亮度关系式并非完全适合. 通过调整显示器白场, 使显示器长时间处于稳定状态的基础上, 分别测量三个变量变化时所对应的亮度值, 就可建立起象素到亮度的一维查表.

根据 CIE1931RGB 空间与 XYZ 空间之间的转换以及彩色电视颜色空间的转换原理, 可由式(2)来实现从亮度到 XYZ 空间的转化^[3]

$$\left. \begin{aligned} X &= X_R L_R + X_G L_G + X_B L_B \\ Y &= Y_R L_R + Y_G L_G + Y_B L_B \\ Z &= Z_R L_R + Z_G L_G + Z_B L_B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于式(2)中的三个方程, 可以看作是已知多组采样点 $(X_i, Y_i, Z_i, L_{Ri}, L_{Gi}, L_{Bi}) (i=1, 2, \dots, n)$, 分别求三组待定参数 (X_R, X_G, X_B) , (Y_R, Y_G, Y_B) , (Z_R, Z_G, Z_B) 的过程. 根据最小二乘法的原理可求得式(2)中的 9 个参数. 查前述所建一维查表, 就可实现从 RGB 到 XYZ 三刺激值的转化.

2 相纸色域空间的建立

建立相纸的色域有两种方法: 实测法与比尔理论估计法. 相纸的光学密度与曝光量的对数成正比, 当密度达到一定程度, 随着曝光量的增加, 密度反而会出现一定程度的非线性下降. 运用这一理论, 就可以通过控制曝光量, 在达到最大光学密度时测得其刺激值, 该刺激值被认为是相纸色域边界上

* 国家高新技术产业化项目 (No. 2001AA300152) 资助
Tel: 0571-87951958 Email: mubaozhong@zju.edu.cn
收稿日期: 2004-01-19

的点. 由于相纸呈色是通过三种染料沉积实现, 因此可以考虑运用比尔定律 (Beer's Law) 对相纸色域进行预测. 必须说明的是: 比尔理论实质上是染料沉积的基本理论 Kubelka - Munk 方程在散射系数趋于 0 时的特例, 由于该近似条件所引起的误差比数据准备、所用色料以及测色误差等造成的色差要小的多, 因此我们认为经过假设近似的比尔定律在相纸的色度预测计算中具有足够精度, 后面的实验也将验证这一点. 所谓比尔定律, 就是要求作为波长 λ 和浓度 k 的光谱密度 $D(\lambda k)$ 能够用两个独立的函数乘积 $f(\lambda)g(k)$ 来表示. 染料的光学密度 D 与它的浓度 K 成正比, 因此, 其透射率 T 为

$$T = 10^{-KD_0} \tag{3}$$

D_0 为单位浓度时的光学密度; K 为浓度系数

总的透射率 T 为

$$T = \prod_i T_i = 10^{-\sum_i D_i} = 10^{-\sum_i K_i D_{i0}} \tag{4}$$

K_i 为第 i 层染料的浓度系数; D_{i0} 为第 i 层染料单位浓度时的光学密度

在 D_{65} 光源下计算三刺激值为

$$\begin{cases} X = K \sum_{\lambda} S_{65}(\lambda) \bar{x}(\lambda) T(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = K \sum_{\lambda} S_{65}(\lambda) \bar{y}(\lambda) T(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = K \sum_{\lambda} S_{65}(\lambda) \bar{z}(\lambda) T(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \tag{5}$$

归化系数

$$K = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{65}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \tag{6}$$

以 Kodak100 相纸为例, 图 1 为其 C、M、Y 三种染料的光谱密度分布曲线. 根据前述染料沉积理论, 可求得不同浓度对应的三刺激值. 图 2 为运用比尔定律预测的相纸色域与实测相纸色域. 通过比较可以看出, 实测色域比理论预测色域稍微偏小, 这主要是受到冲洗药水以及测量精度等因素的影响. 为了消除这种影响, 可以通过控制式 (4) 中的染料浓度系数 K , 得到与实测色域边界基本吻合的预测色域. 从这一层面上来讲, 理论上对 K 的控制与实际中对曝光量的控制具有相同的效果, 最终表现在相纸上都是染料沉积密度的改变.

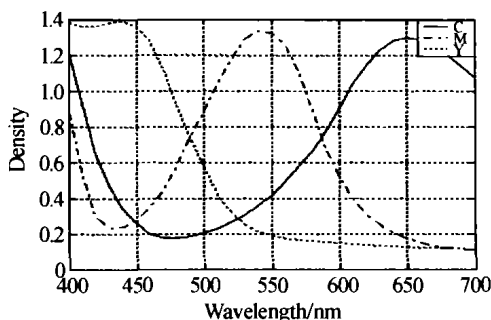


图 1 染料光谱密度分布曲线
Fig. 1 Curve of dye spectrum density

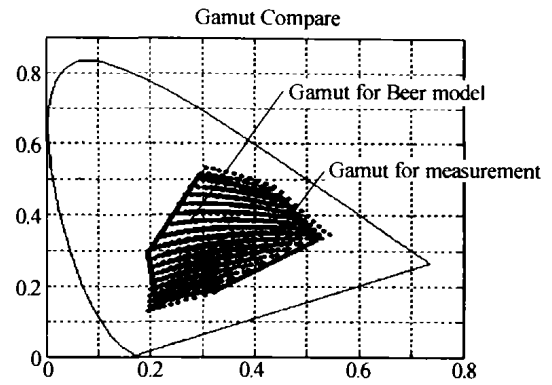


图 2 色域比较
Fig. 2 Gamut compare

3 色域匹配

色域匹配就是将色域外颜色近似到输出设备色域之内, 实质上就是选取有效的算法以实现所见即所得 (WYSIWYG) 的颜色复制. 由于视觉系统对颜色的感知主要是亮度、色调和饱和度, 所以我们选择了能够表征这些感知量的 LCH 色彩空间进行匹配.

常用的色域匹配算法有裁剪法与线性压缩法^[4-7]. 裁剪法就是将所有色域外点匹配到目标色域边界上, 色域内的点保持不变. 线性压缩法则是将源色域的点全部线性压缩到目标色域之内, 对亮度相同而饱和度不同的色彩而言, 其压缩比是相同的. 这两种方法在对图像的饱和度和层次压缩方面均存在一定的缺陷. 在此基础上, 我们提出了基于虚拟色域的非线性压缩法.

如图 3, 首先需要构造一虚拟色域区, 其边界由目标色域边界按照一定的比例压缩得到. 对于色域外一点 S , 非线性压缩后假设匹配到 K 点, 此时 K 点应该满足 $KA:KB = SA:SC$. 在匹配过程中, 处于虚拟色域内的点保持不变; 处于虚拟色域外的点, 将按照不同的比例压缩到虚拟色域与目标色域之间的区域. 其压缩比只跟其在色域空间中所处的位置和虚拟色域的位置有关.

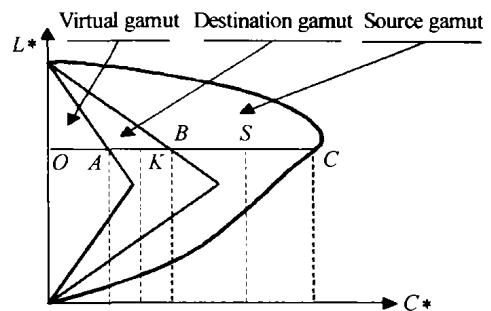


图 3 非线性压缩色域匹配法
Fig. 3 Gamut mapping for non-linear compression method

虚拟色域的建立是非线性压缩匹配法的关键. 其边界是由目标色域边界按照同一比例压缩得到. 假定比例系数为 T , T 值的大小将直接影响压缩比

例和参加压缩点的数量. 很明显, 线性压缩法和裁剪法分别为非线性压缩法在 $T=0$ 和 $T=1$ 时的两种特例.

如图 3, 假定虚拟色域比例系数 $T=t$, 此时色域外一点 S 经过非线性压缩匹配为点 K . 令 $OA = a$, $OB = b$, $OC = c$, $OS = x$, $OK = x_1$, 则

$$a = bt \tag{7}$$

根据非线性压缩的理论

$$(c-x)/(x-a) = (b-x_1)/(x_1-a) \tag{8}$$

所以

$$x_1 = \frac{(b-bt)x + (c-b)bt}{c-bt} \tag{9}$$

经过非线性压缩后, 饱和度变化为

$$E = |x_1 - x| = \frac{(c-b)(x-bt)}{c-bt} \tag{10}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{b(c-b)(x-c)}{(c-bt)^2} < 0 \tag{11}$$

随着 t 的增大, 色差变小, 当 $t=1$ 时, 匹配色差最小.

下面我们再从色彩层次的角度对 t 进行进一步的分析:

假定同一亮度的两点 X, Y 分别匹配到色域内的 X_1, Y_1 点, 其对应的饱和度分别为 x, y, x_1, y_1 , 则定义这两点饱和度相对差为

$$S = \left| \frac{y_1}{x_1} - \frac{y}{x} \right| = \frac{(c-b)|y-x|t}{x[(1-t)x + (c-b)t]} \tag{12}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{(c-b)|y-x|(x+ct)}{x[(1-t)x + (c-b)t]^2} > 0 \tag{13}$$

所以随着 t 的增大, 饱和度相对差变大, 当 $t=0$ 时, 饱和度相对差最小. 此时图像层次表现最为明显. t 的取值将直接影响匹配点的个数以及绝对饱和度和相对饱和度差的大小.

对于一幅图像, 首先建立虚拟色域 (T_1, T_2, \dots, T_n) 系列, 分别测定其处于虚拟色域 T ($T=T_1, T_2, \dots, T_n$) 内点的个数, 用连续函数 $f(T)$ 表示, $f(1)$ 为原图像处于目标色域内的点个数, 当 $T=t_0$ 时, 该虚拟色域将原图像所有点包括在内. 假定色域匹配的虚拟色域空间比例系数为, 经过色域匹配后, 将把 $f(t_0) - f(t)$ 个点压缩到 $1-t$ 的区域内, 我们既希望参加压缩的点数尽量少, 以减小图像的饱和度绝

对差, 又希望压缩区域尽可能大, 以使匹配后的图像保持较好的饱和度层次, 因而可构建以下函数

$$N(t) = \frac{f(t_0) - f(t)}{1-t} \tag{14}$$

$$\text{令 } \frac{\partial N(t)}{\partial t} = 0 \text{ 即}$$

$$f(t_0) - f(t) - (1-t)f'(t) = 0 \tag{15}$$

解方程(15), 得到 t 的值, 此时 $N(t)$ 取得极小值, 我们认为匹配图像的饱和度绝对差与饱和度相对差达到平衡, 此时的匹配视觉差最小.

4 实验与结论

根据前面所述的 CRT 标定与比尔色度预测法确定的 CRT 与相纸 LCH 色域分别如图 4 和图 5.

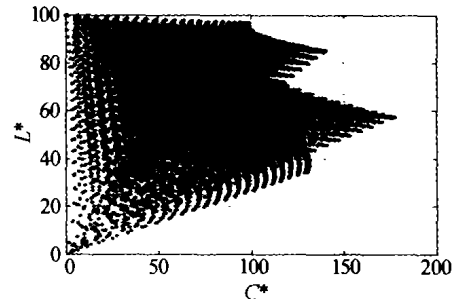


图 4 CRT 显示器 LCH 色域图
Fig. 4 LCH gamut of CRT monitor

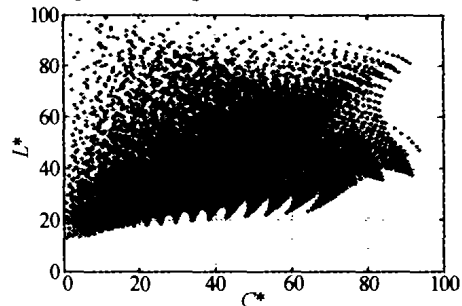


图 5 Kodak100 相纸 LCH 色域图
Fig. 5 LCH gamut of Kodak100 printing paper

依图 5 所示色域, 取 $T=0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$, 建立虚拟色域系列; 根据 CRT 标定所得 RGB 到 XYZ 三刺激值转化系数, 得到该图像的三刺激值及 LCH 值; 分别计算位于各个虚拟色域范围内的点个数, 建立色域分布函数, 然后求得色域压缩比例系数.

对图 6(a) 原始图像构建色域分布函数, 求得色域比例系数 $T=0.55$, 非线性压缩后效果如图 6(b). 图 6(c), (d) 分别为 $T=1$ 和 $T=0$ 时的效果. 从视

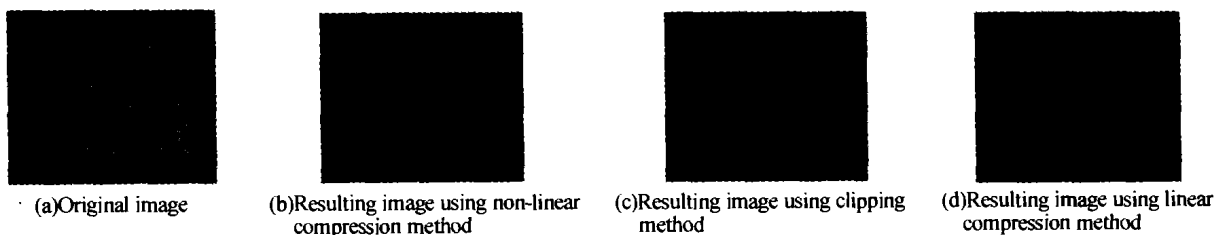


图 6 效果图
Fig. 6 Effect of proposed method

觉角度来看图 6, 裁剪法是以牺牲图像的层次为代价来获得较小的色貌变化, 而线性压缩法虽然保持了图像的层次变化, 但色貌变化较大. 相比于裁剪法与线性压缩法, 非线性压缩法对图像色彩的层次与饱和度进行了协调, 达到一定程度上的平衡.

研究表明, 在数码彩扩系统中, 非线性压缩相比于裁剪法和线性压缩法能获得更好的色彩再现效果. 在建立数码彩扩机的颜色管理系统时, 有必要对图像进行分类, 根据其象素点在 LCH 色品图中的分布确定相应的虚拟色域空间并进行匹配, 从而得到较为满意的颜色复现.

参考文献

- 1 肖嵩, 周雅, 晏磊, 等. 数字彩扩机色域匹配技术研究. 光学技术, 2002, **128**(1): 68 ~ 73
Xiao S, Zhou Y, Yan L, et al. *Optical Technique*, 2002, **128**(1): 68 ~ 73
- 2 Tian Yibin, Feng Huajun, Xu Zhihai. A new autofocusing technique based on analysing the RGB components of color images. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 367 ~ 372
- 3 Wang Yongning, Liu Mingliang, Zhu Hairong. Transforming CRT color space into CIE standard color space. *Print Today*, 1996, **66**(2): 45 ~ 46
- 4 Kato N, Ito M. Applying non-linear compression to the three-dimensional gamut mapping. *IS & T*, 2000, **44**(4): 328 ~ 333
- 5 Chen H S, Omamiuda M, Kotera H. Gamma-compression gamut mapping method based on the concept of image-to-device. *IS & T*, 2001, **45**(2): 141 ~ 151
- 6 Hoshino T, Berns R S. Color gamut mapping techniques for color hard copy images. *Proc of the SPIE*, 1993, **1909**: 152 ~ 164
- 7 Kim S D, Lee C H. Image dependent gamut mapping using a variable Anchor Point. *Proc of the SPIE*, 1998, **3300**: 129 ~ 135

The Model of Color Gamut Mapping in Digital Photofinishing

Mu Baozhong, Ye Zi, Yu Feihong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Optical Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2004-01-19

Abstract Gamut mapping is the key element to get satisfactory image reproduction. First, a practical method is used to realize the transform from RGB values of CRT monitor to spectral tristimulus values. The printing paper gamut is predicted by Beer's law. Further, a non-linear compression method is proposed to realize the gamut mapping. At the same time, the virtual gamut is defined and studied. The result indicates that this model has good practicality for the CMS (Color Management System) of digital photofinishing. This method is applied to high-technology industry with satisfying performance.

Keywords Gamut mapping; CRT transform matrix; Virtual gamut; Non-linear compression

Mu Baozhong He graduated from Tianjin University in Precision Instrumentation Engineering, and entered Zhejiang University for his Ph. D. in 2002. His major interest is color optics.

