

基于色域划分的多通道打印机色彩校正

王义峰, 曾平, 王莹, 罗雪梅
(西安电子科技大学计算机学院, 陕西西安 710071)

摘要: 针对多通道喷墨打印机, 提出一种将打印色域划分并在分割后的子区域内实施色彩校正的算法. 首先建立打印机的呈色模型, 进而分析了高维颜料空间的光谱冗余及色域划分的可行性, 在此基础上设计色域划分方法, 并对每个子区域实施色彩校正. 区域划分降低了数据维数, 消除了颜色冗余, 且算法不受打印机颜料数目的限制.

关键词: 色彩管理; 色彩校正; 区域划分; 高保真; 色域

中图分类号: TP391, TP334. 4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0507-05

Multi-Channel Printer Characterization Based on Gamut Partition

WANG Yi-feng, ZENG Ping, WANG Ying, LUO Xue-mei
(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: This paper proposed a multi-channel ink jet printer characterization algorithm by printer color gamut partition and subspace color calibration. First, a printer model is created, then spectral redundancy of the high dimensional colorant space and feasibility of gamut space partition is analyzed. After that, gamut partition method is designed to divide the printer's gamut into several parts and color calibration is done in each partition. Partition reduces the data dimension and eliminates color redundancy. This method has the advantage of wide-use and no limitation to ink channel numbers.

Key words: color management; color characterization; space partition; high fidelity; color gamut

1 引言

多通道 (Multi-Channel) 喷墨打印机又称为高保真 (High Fidelity, HI-FI) 或超四色打印机, 是指在青 (C)、品 (M)、黄 (Y)、黑 (K) 四种墨水之外添加其它颜色 (如橙 (O)、绿 (G)、蓝 (B)) 墨水的打印机. 额外添加的墨水用途分两种, 一种是扩展打印机的色域, 以输出更艳丽的色彩, 如 CMYKOG、CMYKRGB 打印机; 另一种是以浅墨提高浅色调的打印质量, 使打印颗粒更细、层次更丰富、色调变化更平滑, 如 CMYKcm 打印机. 额外墨水的加入提升了打印品质, 但也带来了光谱冗余、墨水斑点^[1] 等问题, 使得墨水呈色的非线性和不一致性更加严重.

为了稳定地输出色彩, 国际色彩联盟 (ICC) 建议以设备无关的色彩空间 (CIE Lab) 描述墨水特性, 称之为打印机色彩校正 (Color Characterization), 校正信息由 ICC Profile^[2] 存储. 色彩校正的方法分两类, 一种是基于分析模型的校正, 如利用 Neugebauer 方程实现打印机校正^[3,4], 该方法打印、测量的样本少, 但需估计多个参数, 精度不高; 另一种是基于特性样本集测量的经验

法^[5~7], 通过对墨水通道采样组合, 形成特性样本集, 打印并测量获得样本集对应的 CIE Lab 值. 对于多通道打印机, 若 g 表示每个颜料通道的采样点, d 表示通道数, 则建立 ICC Profile 时需要的样本数高达 g^d , 这种样本数随通道的指数增长会带来庞大的打印和测量工作量. 另外, 颜料间往往存在严重的光谱冗余, 使得 CIE Lab 空间到颜料空间是一对多的映射, 给色彩的稳定再现带来困难.

本文通过打印色域空间划分, 实现了以 CMYKOG 和 CMYKcm 为代表的两类多通道喷墨打印机的色彩校正. 针对 CMYKOG 打印机, 选择色调邻接的两种颜料 (共 $d-1$ 组) 和黑墨 K 组合, 实现打印色域的划分, 对每个子区域单独建立特性样本集, 实现色彩校正. 由于各子区域由三种颜料混合生成, 特性样本集总数减少到 $g^3 \times (d-1)$. CMYKcm 打印机经过 c 到 C, m 到 M 的映射后, 亦可借助上述区域划分完成色彩校正. 空间划分降低了颜料空间维数, 消除了颜色冗余, 有利于色彩的一致再现.

2 多通道打印机呈色原理

喷墨打印机根据输入的图像信号,利用数字半调技术,在承印物上对微小墨滴进行频率、尺寸及形状的调制,从而在不同区域产生不同的光谱反射率.局部范围内的反射光谱进入人眼,就形成某种颜色感知. Neugebauer 认为,某个单元面积的光谱是相关颜料的特定组合产生的反射光谱的线性叠加,这些组合包括单个颜料的最高浓度色(一级原色)和多个颜料的最高浓度叠印色(二级原色).式(1)是描述半色调打印过程的光谱 Neugebauer 方程.

$$R(\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_i R_i(\lambda) \quad (1)$$

$R(\lambda)$ 表示某单元面积内的光谱反射率; $R_i(\lambda)$ 表示第 i 个原色对应的光谱反射率, α_i 为 $R_i(\lambda)$ 对应的权值,当该单元面积内不含第 i 个原色时, $\alpha_i = 0$; $N = 2^d$ 表示原色的个数.

式(1)表明,多通道打印机输出的色彩是其原色光谱的线性组合.而光谱反射率 $R(\lambda)$ 在一定照明下均可转换为 CIELab 值,因此 CIELab 空间能够表示出整个可见光的范围.若对每个颜料通道采样并进行笛卡尔乘积运算,形成的颜料组合经打印、测量、计算得到的 CIELab 值将形成一个三维的几何实体,该实体就是打印机能够再现的色彩范围,称为打印机色域.

3 打印机色域分区的可行性分析

若用 $\Omega_{\text{CIE}} \subset R^3$ 表示 CIELab 空间, $\Omega_{\text{ink}} \subset R^d$ 表示打印机的颜料空间,则打印机呈色过程可用 $F: R^d \rightarrow R^3$ 表示,而打印机色域为 $\Omega_{\text{Pm}} = \{t \in \Omega_{\text{CIE}} \mid \exists c \in \Omega_{\text{ink}}, F(c) = t\}$,且有 $\Omega_{\text{Pm}} \subset \Omega_{\text{CIE}}$.可见,多通道打印机($d > 3$)的呈色过程 F 是一种投影运算,这说明颜料在呈色过程中必然存在大量的冗余特征.

以 CMYK 四色喷墨打印机为例对颜料冗余进行分析. CMYK 打印机有 16 个原色,其光谱反射率分别记为 $c(\lambda)$, $m(\lambda)$, $y(\lambda)$, $k(\lambda)$, $\text{cm}(\lambda)$, $\text{cy}(\lambda)$, $\text{ck}(\lambda)$, $\text{my}(\lambda)$, $\text{mk}(\lambda)$, $\text{yk}(\lambda)$, $\text{cmy}(\lambda)$, $\text{cmk}(\lambda)$, $\text{cyk}(\lambda)$, $\text{myk}(\lambda)$, $\text{cmyk}(\lambda)$. 和 $w(\lambda)$ (无任何墨点对应的纸张白色).由式(1)知,CMYK 打印机色域由 16 个原色以不同权值线性组合而成.而 CMYK 属于减法呈色模型,理论上 C、M、Y 等量混合将获得不含彩色分量的灰色(满版浓度 C、M、Y 混合产生黑色),黑墨 K 同样可以再现灰色.打印和印刷过程中引入黑墨 K,一是用 K 替换 C、M、Y 混合呈现灰色的情况,以缩减打印成本,并有效降低墨水覆盖率;另外一个原因是相比 C、M、Y 墨水等量混合,黑墨 K 呈现的灰和黑更纯,彩色分量更小.显然, $\text{cmy}(\lambda)$ 、 $\text{cmyk}(\lambda)$ 与 $k(\lambda)$ 之间存在明显的冗余,因此再现某些颜色时,不一定需要 C、M、Y、K 同时参与.于是将 $\text{cmy}(\lambda)$ 和

$\text{cmyk}(\lambda)$ 全部用 $k(\lambda)$ 替换,相应的打印模型则化简为:

$$R(\lambda) = \alpha_w w(\lambda) + \alpha_c c(\lambda) + \alpha_m m(\lambda) + \alpha_y y(\lambda) + \alpha_k k(\lambda) + \alpha_{\text{cm}} \text{cm}(\lambda) + \alpha_{\text{cy}} \text{cy}(\lambda) + \alpha_{\text{my}} \text{my}(\lambda) + \alpha_{\text{ck}} \text{ck}(\lambda) + \alpha_{\text{mk}} \text{mk}(\lambda) + \alpha_{\text{yk}} \text{yk}(\lambda) + \alpha_{\text{cmk}} \text{cmk}(\lambda) + \alpha_{\text{cyk}} \text{cyk}(\lambda) + \alpha_{\text{myk}} \text{myk}(\lambda) \quad (2)$$

式(2)中变量 α_c 表示 $c(\lambda)$ 对应的权值,其它类推.

利用式(2)计算打印色域时,在权值之和为 1 的前提下,每个权值都将在 0 ~ 1 之间变化取值,即权值可变.因此将式(2)进一步写成三个三色打印模型的加和,如式(3)所示.

$$R(\lambda) = X(C, M, K) + X(C, Y, K) + X(M, Y, K) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X(C, M, K) &= \alpha_{w1} w(\lambda) + \alpha_{c1} c(\lambda) + \alpha_{m1} m(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{k1} k(\lambda) + \alpha_{\text{cm1}} \text{cm}(\lambda) + \alpha_{\text{ck1}} \text{ck}(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{\text{mk1}} \text{mk}(\lambda) + \alpha_{\text{cmk1}} \text{cmk}(\lambda) \\ X(C, Y, K) &= \alpha_{w2} w(\lambda) + \alpha_{c2} c(\lambda) + \alpha_{y2} y(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{k2} k(\lambda) + \alpha_{\text{cy2}} \text{cy}(\lambda) + \alpha_{\text{ck2}} \text{ck}(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{\text{yk2}} \text{yk}(\lambda) + \alpha_{\text{cyk2}} \text{cyk}(\lambda) \\ X(M, Y, K) &= \alpha_{w3} w(\lambda) + \alpha_{y3} y(\lambda) + \alpha_{m3} m(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{k3} k(\lambda) + \alpha_{\text{my3}} \text{my}(\lambda) + \alpha_{\text{yk3}} \text{yk}(\lambda) \\ &\quad + \alpha_{\text{mk3}} \text{mk}(\lambda) + \alpha_{\text{myk3}} \text{myk}(\lambda) \end{aligned}$$

式(3)表明,CMYK 四色打印色域可划分为 CMK、CYK 和 MYK 三个三色打印色域之和.式(3)进一步可推广至超四色打印机的情形.

设 $\text{Hue}(\cdot)$ 表示计算某 CIELab 值的色调角,超四色喷墨打印机的一级原色为 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n, K, n > 3$,且满足 $\text{Hue}(C_i) < \text{Hue}(C_{i+1}), i = 1, 2, \dots, n-1$,并记一级原色对应的光谱反射率为 $c_1(\lambda), c_2(\lambda), c_3(\lambda), \dots, c_n(\lambda), k(\lambda)$,二级原色 $C_1 C_2$ 的光谱反射率记为 $c_1 c_2(\lambda), C_1 C_2 C_3$ 的光谱反射率记为 $c_1 c_2 c_3(\lambda)$,以此类推.参考式(3),超四色打印机呈色模型可写为:

$$\left\{ \begin{aligned} R(\lambda) &= \sum_{i=1}^n X_i \\ X_i &= X(C_i, C_{i \oplus 1}, K) \\ &= \alpha_0 w(\lambda) + \alpha_1 c_i(\lambda) + \alpha_2 c_{i \oplus 1}(\lambda) + \alpha_3 k(\lambda) \\ &\quad + \alpha_4 c_i c_{i \oplus 1}(\lambda) + \alpha_5 c_i k(\lambda) + \alpha_6 c_{i \oplus 1} k(\lambda) \\ &\quad + \alpha_7 c_i c_{i \oplus 1} k(\lambda), \text{ 若 } i < n, i \oplus 1 = i + 1; \\ &\quad \text{若 } i = n, i \oplus 1 = 1 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式(4)表明, N 色打印机的色域可视为 $N-1$ 个三色打印色域之和.

4 打印色域的区域划分

降维是减弱或消除数据冗余的一种通用方法,而良好设计的打印色域分区可以实现颜料空间的降维.根据式(4),将多通道喷墨打印机色域分区的方法归结

为:以黑色 K 替换 CMY 灰色分量,并遍历各颜料通道,选取所有色调相邻的两个一级原色与 K、W 组合,构成色域子空间。

设 C_j 表示打印机的第 j 个一级彩色原色, $j \in [1, n]$. 打印色域区域子分的步骤如下:

打印所有的一级彩色原色 C_j , 测量其对应的 CIELab 值, 并计算各原色的色调角, 然后按色调角从小到大的顺序重新排列 C_j , 设排序后的颜料为 $C_1', C_2', C_3', \dots, C_n'$.

分割打印机色域为 n 个子区域 Ω_j , 构成 Ω_j 的一级原色为 $S_j = \{W, K, C_j', C_{j \oplus 1}'\}$, 若 $j < n, j \oplus 1 = j + 1$; 否则 $j \oplus 1 = 1$.

根据式(4)及上述打印色域分区过程可知, 子区域具有下列特点.

$$(1) \Omega_i \neq \phi, i \in [1, n]$$

$$(2) \Omega_i \cap \Omega_j = \phi, i \neq j, i \in [1, n], j \in [1, n]$$

$$(3) \bigcup_{j=1}^n \Omega_j = \Omega_{pm}$$

(4) K 和 C_j', K 和 $C_{j \oplus 1}'$ 的采样值的笛卡尔乘积, 经打印、测量, 所得 CIELab 数据构成相邻子区域的边界。

因此, 该方法分割获得的各子区域是原多通道打印色域的一种划分。

对“Euroscale Coated v2”CMYK 四色油墨进行区域划分实验, 结果见图 1. 从 ICC Profile “Euroscale Coated v2.icc”中提取四色油墨的色域, 在图中用网格表示. 进而划分油墨空间为 MYK、CYK 和 CMK 三个子空间, 在每个子空间内对颜料采样、组合并利用该 Profile 进行插值计算, 获得颜料采样对应的 CIELab 值, 以此为基础提取子空间色域, 在图中用实体表示。

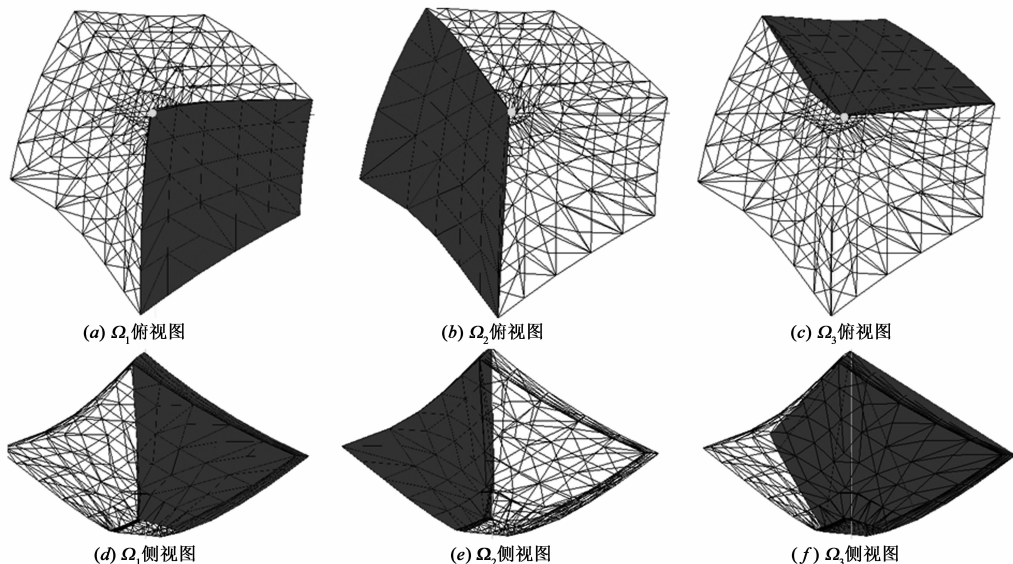


图1 CMYK打印色域划分结果

对 GretagMachbeth ProfileMaker 商用软件自带的 Profile “HexOG6.icc”进行区域划分实验, 结果见图 2. 从 “HexOG6.icc”中提取 CMYKOG 油墨色域, 在图 2 中用网

格所示. 划分颜料空间为 5 个子区域, 进而以子区域颜料组合为输入, 从 “HexOG6.icc”中插值出 CIELab, 计算出的子色域用实体表示。

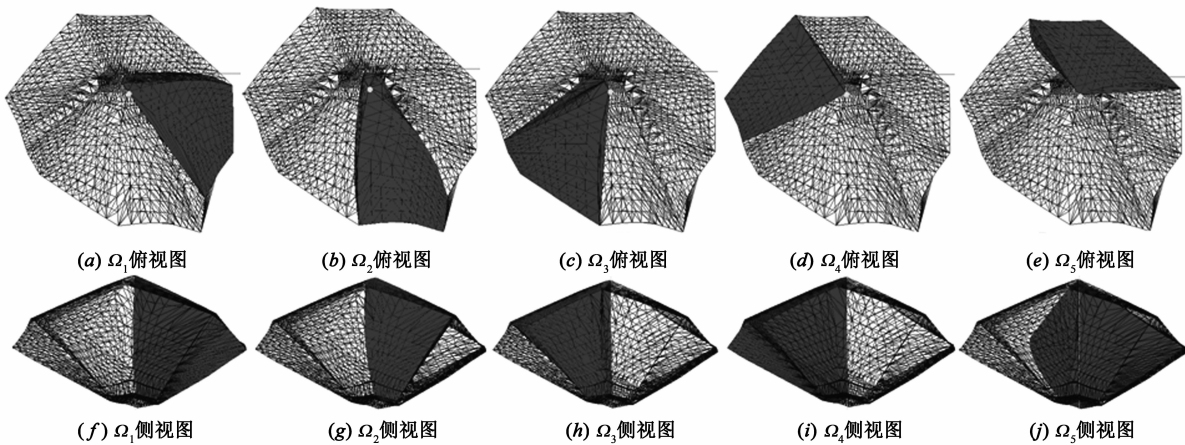


图2 CMYKOG打印色域划分结果

忽略插值误差带来的微小差异,图 1、图 2 中各子区域合并得到的色域与原油墨色域完全相同,从而证明了色域划分算法的正确性.

5 基于色域划分的色彩校正

由上述色域划分过程可知,在任一子区域 $\Omega_j \subset \Omega_{pm} \subset R^3$ 内,超四色打印机都退化成为一三色打印机,其颜料由两个彩色 C_j' 、 $C_{j\oplus 1}'$ 和黑色 K 构成,即颜料空间 $\Omega_{ink_j} \subset R^3$,且 Ω_{ink_j} 与 Ω_j 的数据一一对应;又各子区域之间交集为空,因此所有 Ω_{ink_j} 的并集与 Ω_{pm} 之间就是一一对应的关系,从而消除了颜料冗余,而且保证了校正后的油墨覆盖率在 300% 以内.

于是,超四色打印机色彩校正就转化为各子区域内色彩校正的问题.图 3 展示了多通道喷墨打印流程中色彩校正的位置及作用,其中 $t \in \Omega_{CIE}$ 为期望再现的色彩输入值, t 经色彩校正后得到油墨数值 $t_{ink_j} \in \Omega_{ink_j}$,该值通过颜料调整得到 $t_{ink} \in \Omega_{ink}$, t_{ink} 经打印、测量后的实际输出为 $t' \in \Omega_{CIE}$,若用 F 表示打印和测量过程,则 $t' = F(t_{ink})$,超四色打印色彩校正过程 H 可用式(5)表示.

$$H = \min_H |t' - t| = \min_H |F(H(t)) - t| \quad (5)$$

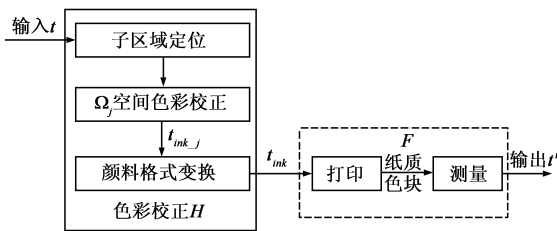


图3 基于区域划分的超四色打印色彩校正

由图 3 可知,色彩校正 H 由三部分组成:打印色域子区域定位、子区域色彩校正和颜料格式变换.通过对输入的 t 值与各个子区域的边界比对,不难确定色彩 t 所属的打印子区域 Ω_j . 在 Ω_j 内,打印机只使用 K 、 C_j' 和 $C_{j\oplus 1}'$ 三种颜料再现颜色,该色彩校正过程可记为 $H_j: R^3 \rightarrow R^3$. H_j 校正可采用现有的多种方法实现,如查找表和四面体插值方法^[8],回归方法^[9]等.一般查找表和四面体插值相结合可获得最高的校正精度,因此我们选择该方法进行子区域色彩校正.子区域校正后得到的 t_{ink_j} 是三维坐标,需变换为 d 维向量的格式,把其它通道数据填零即可.

6 CMYKcm 打印机校正

CMYKcm 打印机与 CMYKOG 打印机的色彩再现风格不同,前者偏重图像浅色调层次的增强,而后者偏重鲜艳色彩的表现.我们以 HP130nr 打印机为例,首先通

过实验分析 CMYKcm 喷墨打印机的色彩特性.对彩色油墨 C、M、Y、c、m,浓度从 0 至 1 以步长 0.025 递增采样,打印、测量样本获得不同浓度单色彩墨对应的 CIE Lab 值,并在 CIE Lab 空间绘制,如图 4 所示.图中以 C、M、Y 油墨曲线的交点为圆心,沿半径辐射方向是颜色饱和度增大的方向,曲线越长,表明该油墨原色越艳丽.

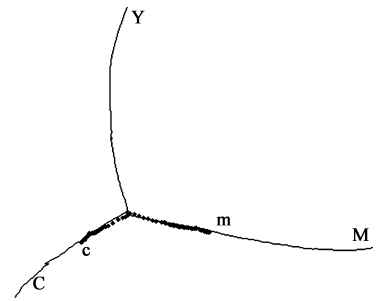


图4 HP 130nr打印机的单色彩墨形成的颜色曲线

可以看出,原色 c 与 C 、 m 与 M 的色调几乎相同,只是饱和度有显著差异,该特点使得 CMYKcm 打印机无法直接应用色域划分的校正方法.另外,油墨 c 生成的曲线与 C 曲线浅调部分重合、 m 生成的曲线与 M 曲线浅调重合,这表明可在油墨 m 与 M 、 c 与 C 之间建立一种映射.设 I_C 、 I_M 、 I_Y 、 I_K 、 I_c 、 I_m 分别表示油墨 C、M、Y、K、c、m 的浓度(0~1 之间的实数),则 $I_c = \alpha I_C$, $I_m = \beta I_M$, α 、 β 为正实数(若 $I_c = 1$ 时对应的颜色与 $I_C = 0.4$ 时颜色相同,则 $\alpha = 0.4$,类似可确定 β).通过该线性映射,将 c 、 m 的油墨浓度转换为一定比例的 C、M 浓度,于是 CMYKcm 打印机退化为 CMYK 打印机,进而实施基于色域划分的色彩校正.

参照图 3,CMYKcm 色彩校正后的墨水 t_{ink} 为 CMYK 格式,即 $t_{ink} = [I_C, I_M, I_Y, I_K]$.因此还需对 t_{ink} 再执行一步格式变换 $T: R^4 \rightarrow R^6$,实现 CMYK 到 CMYKcm 的调整.本文采用式(6)所示方法,实现 T 变换.

$$\begin{cases} I_c = \frac{I_C}{\alpha}, I_c = 0, \text{ if } I_C < \alpha \\ I_c = 0, \text{ if } I_C \geq \alpha \end{cases}, \begin{cases} I_m = \frac{I_M}{\beta}, I_m = 0, \text{ if } I_M < \beta \\ I_m = 0, \text{ if } I_M \geq \beta \end{cases} \quad (6)$$

7 实验结果及分析

利用上述方法对 HP130nr 打印机进行了色彩校正,在每一个油墨子空间,颜料均从 0 至 1 以步长 0.1 递增采样,生成的特性样本集总数为 $11^3 \times 3 = 3993$.

采用图 5 所示的流程检验校正精度.首先在打印色域内随机生成 2000 个 Lab 值组成测试样本集,该样本集经色彩校正、格式变换后的 CMYKcm 坐标输出至打印机,打印后的纸介质样本经分光测色仪测量,测量获得的 Lab 值与原始测试样本 Lab 值对比,统计误差.误差计算时采用 ΔE_{ab} 色差公式.设两 Lab 值分别为 (L_1, a_1, b_1) , (L_2, a_2, b_2) , 则其色差为 $\Delta E_{ab} = ((L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2)^{1/2}$.

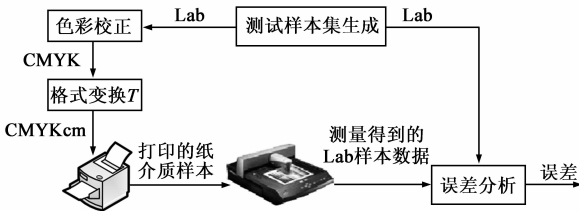


图5 色彩校正精度检验

本文色彩校正算法与文献[4]基于 Beugebauer 的校正方法、文献[9]基于回归的方法进行了对比,结果见表 1。

表 1 不同校正算法的精度对比

算法	平均色差 ΔE_{ab}	最大色差 ΔE_{ab}	标准差
Neugebauer	4.93	15.76	7.92
多重回归	3.41	16.31	8.52
色域划分校正	1.62	5.32	2.71

从表 1 可以看出,本文提出的基于色域划分的多通道打印机色彩校正方法,在平均色差和最大误差方面均明显优于其他两种基于模型分析的校正方法。原因在于,基于模型分析的方法(Neugebauer 和回归方法)难以准确描述多通道喷墨设备固有的非线性特征,精度不高。色彩查找表和四面体插值方法是一种基于实测数据的经验方法,实测数据越多,其校正精度越高。色域分区后每个子空间均由三种油墨构成,这种降维方法保证了每个子区域内校正样本数较多,而总的特性样本集数目仍可接受。

8 结束语

本文提出一种基于设备色域划分的多通道打印机色彩校正算法。对 CMYKOG 类喷墨打印机可直接进行色域划分;对于 CMYKcm 类打印机,需先将浅墨 c、m 映射为浓墨 C、M,而后进行色域划分,实现色彩校正。区域划分大大降低了颜料空间维数,消除了颜料呈色的光谱冗余,并可将墨水覆盖率控制在 300% 以内。对 CMYKcm 打印机校正的测试表明,算法利用可接受的特性样本集数目,取得了较高的校正精度。

参考文献:

- [1] M R Rosen, E F Hattenberger, N Ohta. Spectral redundancy in a six-ink in jet printer[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2004, 48(3): 192 – 202.
- [2] Specification ICC.1:2004-10(Profile Version 4.2.0.0) [EB/OL]. http://www.color.org/icc_specs2.xalter

- [3] SolerPau, Arnabat Jordi. Efficient color printer characterization based on extended neugebauer spectral models[A]. Proc SPIE Int Soc Opt Eng Color Imaging XII: (Processing, Hardcopy, and applications) [C]. San Jose, California, USA: SPIE, 2007. 6493: 64930S.1 – 64930S.8.
- [4] A Ufuk Agar. Model based color separation for CMYKcm printing[A]. Proceedings of The Ninth IS&T/SID Color Imaging Conference[C]. Scottsdale, AZ: IS&T, 2001. 298 – 302.
- [5] P C Hung. Colorimetric characterization beyond three colorants [A]. Proceedings of SPIE Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts[C]. San Jose, USA: SPIE, 2000. 3963: 196 – 207.
- [6] R Bala. System for Printing Color Images with Extra Colorants in Addition to Primary Colorants[P]. U S Patent: 5,870,530, Feb, 1999.
- [7] In-Su Jang, Chang-Hwan Son, Tae-Yong Park, et al. Hi-Fi printer characterization method using color correlation for gamut extension[A]. Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP 2006[C]. Atlanta, Georgia, USA: IEEE, 2006. 1517 – 1520.
- [8] Kanamori K, Kotera H. Color correction technique for hard copies by 4-neighbors interpolation method [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 1992, 36(1): 73 – 80.
- [9] 刘瑞华, 曾平, 王义峰. 一种自适应分区回归的打印机电色校正方法[J]. 电子学报. 2007, 35(11): 2201 – 2204.
LIU Rui-hua, ZENG Ping, WANG Yi-feng. A color calibration method of printer using adaptive regression[J]. Acta Electronical Sinica, 2007, 35(11): 2201 – 2204. (in Chinese)

作者简介:



王义峰 男, 1977 年 6 月出生于河北省安国市。西安电子科技大学计算机学院副教授, 博士。研究方向为计算机图形图像处理、计算机色彩管理。 E-mail: yfwang@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