

面向专色工艺的彩色图像分色及印制方法*

葛 敏, 孟祥旭, 龚 斌

(山东大学 计算机科学与技术学院, 山东 济南 250100)

E-mail: mxx@sdu.edu.cn

http://www.cst.sdu.edu.cn

摘要: 提出了一种面向专色工艺的彩色图像分色及印制方法.该方法根据印制图像的颜色和油墨信息,通过遗传算法选择用以印制图像的油墨种类,采用数值优化算法解决定制油墨的图像分色问题.该方法能以较少种类油墨的印制出与传统印制结果同等或更为鲜明逼真的图像,可广泛应用于印刷、印染、陶瓷印花等行业.

关键词: 专色印刷;彩色分色;域映射;Neugebauer 模型;Kubelka-Munk 理论

中图法分类号: TP391

文献标识码: A

印刷行业中普遍采用的四色印刷,使用青、品红、黄、黑 4 种颜色的组合记录彩色图像信息.油墨混合服从减色法混合显色定律,即每种油墨吸收白光中的一部分色光而反射其他色光.利用这 4 种油墨和半色调技术,可印制出比较丰富的颜色,但与人眼所能识别的颜色范围及显示器的显示范围相比,仍十分有限.特别是高饱和度的颜色,如橙、紫、蓝等,无法通过四色印刷获得.人们试图引入其他颜色油墨以扩展可印制颜色域,从而建立了多色印制系统,例如 Pantone 的六色印制系统、Ostromoukhov^[1]、Boll 的七色印制系统等.油墨数目的增加,提高了印制工艺印制彩色图像的能力,但印制机的性能表征及校准等工作也随之复杂化.此外,很多图像颜色域可能仅占据多色印制系统印制域的一小部分,采用较少种油墨即可达到理想效果.可见,固定油墨数目的印制系统缺乏灵活性.传统印花行业(印染、丝网印制和陶瓷印花等)采用专色染料印制图案,可以印制出鲜明的图案花样,但层次感很差,印制具有连续色调的高质量云纹花样是该行业迫切需要解决的一个问题.本文根据上述工艺特点,提出了针对特定图像选择相应油墨来分色、印制彩色图像的方法.该方法根据原图像的颜色信息,通过组合优化算法在现有油墨集中选择用以印制图像的最佳油墨组合,并采用数值优化算法解决定制油墨的分色问题,打破了传统彩色印制中仅用固定颜色油墨的束缚,能以较少种油墨或较小代价印制出与传统印制结果同等或更为鲜明、逼真的图像,为用户提供了较大的自由度.实验结果表明,这种自适应彩色印制方法可取得理想的印制效果.

算法主要过程如下:

第 1 步:选择油墨组合方案.

(1) 为每种油墨组合 c_i , 建立印制颜色域(color gamut)模型.

(2) 通过域映射(gamut mapping)将原始图 O 的颜色映射至印制颜色域,生成预览图 R .

(3) 比较 O 与 R , 依据目标函数评定该组合方案的优劣,利用优化算法在所有油墨组合方案中选择一种合适的方案 c .

第 2 步:以所选的油墨组合 c 对图像进行分色处理.

* 收稿日期: 2000-11-14; 修改日期: 2001-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69873028); 国家 863 高科技发展计划资助项目(863-511-942-025)

作者简介: 葛敏(1977 -),女,山东泰安人,硕士生,主要研究领域为 CAD/CG,人机交互与虚拟现实;孟祥旭(1962 -),男,山东龙口人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 CAD/CG,人机交互与虚拟现实,CIMS;龚斌(1964 -),男,山东济南人,副教授,主要研究领域为人机交互与虚拟现实,CIMS.

1 选择油墨

根据图像的彩色信息选择合适的油墨是印制彩色图像的关键,可作为组合优化问题处理.对任意一个油墨组合方案,将相应预览图与原始图像间的差异作为评价该方案优劣程度的目标函数.差异越小,目标函数值越小.选择油墨的过程即是在现有油墨范围内,寻找可产生最佳预览图的油墨组合方案.

1.1 印制颜色域

某设备可显示或可印制的所有颜色集合称为该设备的颜色域.印制设备的颜色域(以下简称印制颜色域)由各种彩色半色调点之间扩张、混合形成,是减色原理与加色原理共同作用的结果,故可采用 Neugebauer^[2]模型和 Kubelka-Munk 模型^[3]计算油墨组合的印制颜色域.

纸张和单种油墨的颜色及它们相互叠印成的颜色称为印制基色(printing primaries), n 种油墨可形成 2^n 种基色.利用 Kubelka-Munk 模型,根据油墨的反射光谱可算得基色的 XYZ 刺激值.

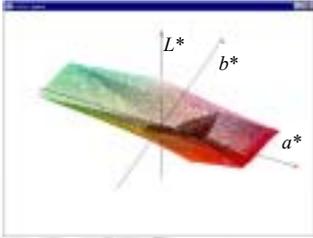


Fig.1 Printing gamut of PANTONE inks: yellow, orange 021, green and rubine red

图1 油墨 PANTONE 黄、橙 021、绿和宝石红的印制颜色域

Neugebauer 模型认为,每一小区域的颜色是该区域内所有基色的加权平均,权重即该基色所覆盖面积的百分比.若油墨 i 覆盖面积百分比以 α_i 表示,而 n 种油墨的覆盖面积百分比表示为 n 元组 $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$,则 n 种油墨的印制颜色域表达式为

$$C(\alpha) = \sum_{q=1}^{2^n} \left[\prod_{i=1}^n f(q, i, \alpha_i) \right] g_q, \quad (1)$$

$$f(q, i, \alpha) = \begin{cases} \alpha, & \text{若基色 } q \text{ 含油墨 } i \\ 1 - \alpha, & \text{否则} \end{cases}$$

其中 g_q 为基色 q 的 XYZ 刺激值.为更精确描述色差,并与人眼感知结果一致,采用 CIELAB 匀色空间进行

域映射和油墨选择.图1为用 OpenGL 显示的4种油墨(PANTONE 黄、橙 021、绿和宝石红)构成的印制颜色域在 CIELAB 空间中的表示.

1.2 域映射

由于印制颜色域可表征的颜色范围有限,通常总有一定数量的图像颜色位于该域之外,因此需要定义一个函数将原始图像的每种颜色映射至印制颜色域,即域映射^[4,5].通过域映射修正原始图像的颜色,可得到相应的印制预览图.本文采用 SMGBD(segment maxima gamut boundary descriptor)方法表示域边界,使每种颜色的处理都是在某一固定色调相角对应的平面中进行.

算法 1.

(1) 利用式(2)对非彩色区进行亮度的线性压缩.

$$L_r^* = (1 - P_c)L_o^* + P_c \left(L_{r(\max)}^* - (L_{o(\max)}^* - L_o^*) \frac{(L_{r(\max)}^* - L_{r(\min)}^*)}{(L_{o(\max)}^* - L_{o(\min)}^*)} \right). \quad (2)$$

这一步对高色度的颜色值改变很小.其中 o, r 分别表示图像颜色域与印制颜色域, max/min 表示给定域中可能的最大/小亮度值, P_c 是与色度值有关的权,计算公式如下:

$$P_c = 1 - \sqrt{\frac{C^{*3}}{C^{*3} + 5 \times 10^5}} \quad (C^* \text{ 为压缩亮度后颜色的色度值}). \quad (3)$$

(2) 以亮度轴上与域的尖点亮度相同点 E_a 为中心,沿连接中心与某颜色点 S_o 的直线对 S_o 的亮度和色度同时压缩.该映射可由式(4)表示.

$$D_{sr} = \begin{cases} D_{so}, & D_{goal} \leq D_{gral} \\ (D_{so} - D_{sf}) \frac{(D_{gral} - D_{sf})}{(D_{goal} - D_{sf})} + D_{sf}, & D_{goal} > D_{gral} \end{cases} \quad (4)$$

D 表示某颜色到中心点的距离, αL 表示域边界. 当某直线上的图像颜色域小于印制颜色域时, 图像颜色保持不变. 否则, 根据图像颜色域与印制颜色域的差异程度, 将距离在 D_{sf} 和 D_{goal} 之间的颜色值按比例压缩至 D_{sf} 和 D_{gral} 之间, 其中

$$D_{sf} = kD_{gral} \times \max \left(1 - \frac{(D_{goal} - D_{gral})}{D_{gral}}, 0 \right), \quad (5)$$

当 D_{sf} 取值为 0 时, 算法对图像颜色的亮度和色度作线性压缩; 当 D_{sf} 等于 D_{gral} 时, 算法进行域裁剪. 图像颜色域与印制颜色域的差异越大, 压缩的范围就越大. 系数 k 用于控制两颜色域的差异对压缩范围的影响程度, 可人为选择. 这样既使印制结果忠于原图像, 又保证了像素间亮度及色度对比关系不会发生太大变化.

1.3 遗传算法选择油墨

对任一油墨组合方案 c , 调用上文讨论的域映射算法修正原始图像 O 的颜色, 可得到相应的印制预览图 R . 采用下列目标函数量化使用方案 c 印制图像 O 的优劣程度:

$$F(c) = \beta_1 F_{difference} + \beta_2 f_c, \quad (6)$$

$$F_{difference} = \frac{1}{m \times k} \sum_{i,j} [(L_{O_{i,j}}^* - L_{R_{i,j}}^*)^2 + (a_{O_{i,j}}^* - a_{R_{i,j}}^*)^2 + (b_{O_{i,j}}^* - b_{R_{i,j}}^*)^2] \quad (m \times k \text{ 为图像像素总数}),$$

$$f_c = |n - n_{ref}|.$$

$F_{difference}$ 为 R 与 O 所有像素之间色差的平方和的平均值, f_c 为当前油墨组合中油墨数 n 与用户选择的理想数目 n_{ref} 之差的绝对值, 该项可限制结果方案中的油墨数. β_1, β_2 为人为规定的系数, β_2 越大, 结果方案中的油墨数越接近用户指定数目.

本文采用遗传算法^[6]选择合适的油墨组合. 算法执行期间始终保持 $m(m > 1)$ 个当前解, 可为用户提供多种选择. 遗传算子包括 3 种: 交叉、局部变异和全局变异. 算法步骤如下:

算法 2.

(1) 随机选取 m 个油墨组合方案 c_1, c_2, \dots, c_m , 按目标函数值 s_i 排序, 组成初始解集合 C .

(2) 计算 C 的平均代价 $cost = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i$.

$T=0$; //记录迭代步数, 最大迭代步数为 T_{max}

(3) 重复(4)~(7).

(4) 产生一个 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 P 作为变异概率.

Case $P \leq P_G$ 对集合 C 执行局部变异操作: 随机选择组合方案 c_i , 将 c_i 中各油墨的颜色向邻近颜色改变得到 c_i' (故优化前应确定每种油墨的邻近油墨集). 独立重复这一过程直至得到下一代群体 $C'(c_1', c_2', \dots, c_m')$.

Case $P_G < P \leq P_C$ 对集合 C 执行全局变异操作: 随机选择组合方案 c_i , 随机且完全地改变 c_i 的组成油墨得到 c_i' . 独立重复这一过程直至得到下一代群体 $C'(c_1', c_2', \dots, c_m')$.

Case $P_C < P$ 对集合 C 执行交叉操作: 从 c_1, c_2, \dots, c_m 中等概率、独立地选择两个组合, 以各 50% 的概率从两组中选择油墨组成新组合方案. 独立重复这一过程直至得到下一代群体 $C'(c_1', c_2', \dots, c_m')$.

(5) $T=T+1$;

$$P_G = P_G + \frac{K_G}{T_{max}}, \quad P_C = P_C + \frac{K_C}{T_{max}}.$$

(6) 将 c_1', c_2', \dots, c_m' 按目标函数值排序.

(7) FOR C' 的每一组合方案 c_i' DO

IF c_i' 优于 C 中最差方案 c_j THEN

BEGIN 以 c_i' 替换 c_j , $cost = cost + (s_i' - s_j) / m$ END

(8) UNTIL $T > T_{\max}$ 或集合 C 不再变化.

(9) 算法结束.

因概率 P 服从均匀分布,可用 P_G 和 P_C 分得的区间大小控制 3 种遗传算子发生的概率. P_G 和 P_C 在迭代过程中以不同的速率增大,使得执行各算子的概率也随之变化,以避免某方案始终居主导地位.全局变异发生在早期迭代步的概率较高.局部变异发生在晚期迭代步的概率较高.交叉算子早期发生的概率较高,在迭代后期 P_C 的取值大于 1,交叉算子发生的概率随之逐渐降至 0.在实际应用中,我们取 P_G 和 P_C 的初始值分别为 0.1 和 0.5, K_G 和 K_C 分别为 0.8 和 0.6.

由于对每种新的组合方案估计其目标函数值时都要实施域映射算法,计算量较大,故算法执行前要对图像颜色进行量化^[7],使域映射算法仅处理量化后的颜色.目标函数中给每种颜色的色差赋一个权值,即原始图像中具有该颜色的像素个数.

2 图像分色

确定了最佳的油墨组合以后,即可进行分色处理.分色是对域映射算法产生的位于印制颜色域内的每一像素颜色,计算用所选油墨印制该色所需的油墨用量,即覆盖百分比 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ (n 为油墨数).分色的结果为多张表示油墨用量的灰度图,称为分色色片.本文通过 BFGS 拟牛顿法完成分色.

分色目标函数用以确定油墨用量 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$,使颜色域模型据此产生的颜色 $c(\alpha)$ 最接近目标色 \hat{c} .由于实际印制过程的限制, α_i 应介于 0,1 之间.进一步要求油墨总量小于常数 α_{limit} ,以保证油墨总量不超过油墨所能附着于纸上的最大量,通常 $3 \leq \alpha_{limit} \leq 4$.

$$\begin{aligned} f(\alpha, \hat{c}, \alpha_{ref}) &= f_{distance}(\alpha, \hat{c}) + f_{bounds}(\alpha) + f_{limit}(\alpha) + f_{ref}(\alpha, \alpha_{ref}). \\ f_{distance}(\alpha, \hat{c}) &= w_1 \|c(\alpha) - \hat{c}\|^2, & f_{limit}(\alpha) &= w_3 \max(0, \sum_i \alpha_i - \alpha_{limit})^2, \\ f_{bounds}(\alpha) &= w_2 \sum_i \max(0, -\alpha_i, \alpha_i - 1)^2, & f_{ref}(\alpha, \alpha_{ref}) &= w_4 \|\alpha - \alpha_{ref}\|^2. \end{aligned} \quad (7)$$

目标函数中第 1 项是 LAB 颜色空间中目标色 \hat{c} 与用域模型根据 α 值计算的颜色间距离的平方.通常人为选择 $w_1 = 0.005$.第 2 项将每滴油墨用量限制在 0,1 之间.第 3 项防止油墨总量超过油墨限度 α_{limit} .通常规定 $w_2 = w_3 = 1000$.最后一项允许在可印制同一颜色的多个解中选择与给定参照值 α_{ref} 最接近的解.常选较小数 $w_4 = 0.025$ 作为该项的权值.

设置 α_{ref} 是为了保证分色片的平滑性.对 3 种或 3 种以上油墨,函数 $C(\alpha)$ 是从多维参数空间到三维颜色空间的映射,故对同种颜色可解得多个分色值,从而可能使邻近区域内具有相似颜色值的像素对应迥然不同的分色值.在实际工艺中,这种分色值的不连续性可能由于轻微的对版不齐等因素而导致预想不到的效果.因此,在为每一像素计算所需的油墨用量时,应使其尽量与周围邻近像素的 α 值一致.基于这一思想,并根据图像相邻区域内像素颜色值相近的特点,我们采用四连通的扫描方法,从区域的中心点开始计算分色值,每一像素算得的 α 值作为其四连通邻域内未扫描过的像素的 α_{ref} 值,从而进一步保证了分色片的平滑.

3 实验结果和结论

本文采用 15 种 PANTONE 油墨,对一系列图像施以上述算法,并与传统的四色印制结果相比较,实验结果表明,对于标准四色难以精确印制的图像,该算法可达到较理想的印制效果.部分实验结果见表 1(本文实验所用的彩色图像及结果图像在此略去.如有需要,请联系 mxx@sdu.edu.cn).

算法执行速度主要取决于遗传算法的迭代次数.此外,遗传算法中油墨组合的选取策略及域映射算法的速度与精度也直接影响了算法的效率与精度.该算法还有待于进一步改进.

本文研究了非四色彩色印制工艺中提高印制质量的可能性及相关问题,系统地介绍了该方法的实现步骤.进一步的工作包括:改进颜色域模型从而更精确地描述油墨与纸张之间的相互作用^[8,9];选择颜色外观空间(color appearance space)如 ZLAB, CIECAM97s 等进行域映射处理,可更精确地描述色差;改进油墨选择的目标函数,例如可根据重要性为某些颜色加权、评价预览图时考虑图像的整体性而不仅是孤立的像素颜色.

Table 1 Experimental results

表 1 实验结果

Image size	Number of inks	Result	Average of L*a*b* Color aberration between the printing image and the origin one	Average of L*a*b* color aberration between the image of four process color printing and the origin one	Time of selecting inks	Time of color separation
A(219 × 141)	3	1,2,14	0.777 462	1.890 814	4'45"	1'26"
B(203 × 209)	4	2,7,8,14	0.383 048	0.777 015	5'06"	5'21"
C(271 × 169)	4	2,4,8,12	3.538 50	8.867 276	8'01"	3'10"
D(176 × 243)	5	2,4,8,6,11	0.695 334	0.887 731	13'6"	14'52"

Note: The inks used in this paper are respectively 0 magenta, 1 cyan, 2 yellow, 3 black, 4 orange, 5 purple, 6 blue072, 7 yellow012, 8 green, 9 blue, 10 Reflex blue, 11 rose color, 12 ruby, 13 red, 032,14 warm red, and the light source used in the experiment is D65.

图像规格, 油墨数目, 结果方案, 印制图与原图 L*a*b*色差平均值, 四色印制图与原图 L*a*b*色差平均值, 油墨选择时间, 分色时间.

注:本文实验所用油墨为 0 品红、1 青、2 黄、3 黑、4 橙、5 紫、6 蓝 072、7 黄 012、8 绿、9 蓝、10 Reflex 蓝、11 玫瑰红、12 宝石红、13 红 032、14 暖红、实验光源为 D65.

References:

- [1] Ostromoukhov, V. Chromaticity gamut enhancement by heptatone multi-color printing. IS&T/SPIE 1993 International Symposium on Electronic Imaging: Science Technology. SPIE 1909, 1993, 139~151.
- [2] Neugebauer, H.E.J. Die theoretischen grundlagen des mehrfarbenbuchdrucks, the theoretical foundation for multicolor printing. Zeitschrift Fuer Wissenschaftliche Photographie, 1937, 36(4):73~89.
- [3] Hasse, C.S., Meyer, G.W. Modeling pigmented materials for realistic image synthesis. ACM Transactions on Graphics, 1992, 11(4): 305~325.
- [4] Braun, G.J., Fairchild, M.D. Gamut mapping for pictorial images. Proceedings of the TAGA'99. Vancouver, 1999:645~660.
- [5] Morovic, J., Luo, M.R. Developing algorithms for universal colour gamut mapping. In: Macdonald, L.W., et al, ed. Color Imaging: Vision and Technology. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1999.253~282.
- [6] Jiao, Li-cheng. Neural networks computing. Xi'an: Xidian University Press, 1995. 67~72.
- [7] Heckbert, P. Color image quantization for frame buffer display. In: Proceedings of the Siggraph'82. New York: ACM, 1982. 297~307.
- [8] Emmel, P., Hersch, R.D. A model for colour prediction of halftoned samples incorporating light scattering and ink spreading. In: Proceedings of the IS&T/SID 7th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications. Scottsdale, Arizona, 1999, 11(16):173~181. <http://diwww.epfl.ch/w3lsp/publications/colour/amfcphsilsais.html>.
- [9] Emmel, P., Hersch, R.D. Towards a color prediction model for printed. Patches. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, 19(4):54~60.

Color Separation and Printing for Spot Color Printing Technology*

GE Min, MENG Xiang-xu, GONG Bin

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

E-mail: mxx@sdu.du.cn

<http://www.cst.sdu.edu.cn>

Abstract: A method of color images separation and printing for spot printing technology is presented. A combination of inks for printing images is selected by genetic algorithm according to the information of both original color images and given inks. Then a numerical optimization algorithm is used to compute the separations of color images with customization inks. With the ability of producing the same or more vivid reproduction than tradition four-process color printing with just a small number of inks, this method can be widely applied in many industries such as printing, dyeing and ceramics trades, etc.

Key words: spot color printing; color separation; gamut mapping; Neugebauer model; Kubelka-Munk theory

* Received November 14, 2000; accepted May 15, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69873028; the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No.863-511-942-025