

一种基于 LUT 表的色域匹配方法^{*}

柴啸龙¹, 张宗国¹, 邢卫杰², 罗笑南¹

(1. 中山大学计算机应用研究所, 广东 广州 510275;

2. 中山大学附属二院研究生科, 广东 广州 510120)

摘 要: 在基于 ICC Profile 的色彩再现机制中, 利用 LUT 表与打印机色域特征, 提出了一种新的色域匹配插值方法, 实现了 $L^*a^*b^*$ 色域到 CMYKcmk 色域的匹配。该算法具有开放性、实时性和自适应性。

关键词: 色域匹配; 插值; LUT 表; 色彩管理

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) S2-0124-03

CRT 显示的图像都是基于 RGB 加色色域的, 打印机输出图像是基于油墨的减色域, 因此在计算机上设计好的图像要打印出来就涉及到色域匹配技术。鉴于这方面研究的重要性, SIGGRAPH 于 1998 年将色域匹配等色彩管理技术做为一个新的分支正式纳入图形图像研究范畴^[1]。本文提出了一种由 $L^*a^*b^*$ 色域到 CMYKcmk 色域的匹配转换算法, 该算法的机制也适合于 $L^*a^*b^*$ 色域到 CMYK 色域和 CMYKcm 色域的转换。我们采用七种油墨的 Epson 9600 做为彩色打印机, 它的色域是 CMYKcmk。如果由 RGB 色域直接匹配到 CMYKcmk 色域, 那么匹配效果不理想, 而且这样的匹配不具备开放性, 也不具备可移植性。近些年来, 基于 ICC Profile 的色彩再现模式已经成为事实上的工业标准^[2], 其中关键的色域匹配部分采用与设备无关的 $L^*a^*b^*$ 色域做为中间转换空间, 本文基于 LUT 表的匹配方法同样通过 ICC 机制实现。

1 色域的插值匹配

定义 1 完全没有杂质而且渲染效果完全理想的墨, 称为理想墨。我们把理想青墨, 理想品红墨和理想黄墨分别记为 C^* , M^* , Y^* 。

定义 2 色域 C 中的有限色点集 G , 如果 G 覆盖了 Munsell 表色体系全部色相, 并且覆盖 90% 以上的 Munsell 标准色卡, 那么我们把这样的 G 称为色域 C 的特征色点集。

定义 3 F 是从色域 C_1 到色域 C_2 的匹配映射, 如果对色域 C_1 中任意色点 a , 色点 $F(a)$ 和 a 在对应的 Munsell 标准色卡中是相同或相邻的关系, 那么

称 F 是从 C_1 到 C_2 的基本无损映射。

定义 4 F 是从色域 C_1 到色域 C_2 的匹配映射, 对色域 C_1 中任意色点 a , 色域 C_2 中任意色点 b , 如果 a 和 b 在对应的 Munsell 标准色卡中是相同的关系, 并且 $F(a)$ 和 b 在对应的 Munsell 标准色卡中是相同或相邻的关系, 那么称 F 是从 C_1 到 C_2 的最大保真映射。

定理 1 $L^*a^*b^*$ 色域和 $C^*M^*Y^*$ 色域都有特征色点集。

证明 $L^*a^*b^*$ 色域和 $C^*M^*Y^*$ 色域都是实数集 R 的笛卡儿积空间的单连通域, 都包含了 Munsell 标准色卡对应的离散色点, 由特征色点集的定义知, $L^*a^*b^*$ 色域和 $C^*M^*Y^*$ 色域都有特征色点集, 证毕。

定理 2 从 $L^*a^*b^*$ 色域到 $C^*M^*Y^*$ 色域的匹配映射不存在基本无损映射, 但存在最大保真映射。

证明 ①标准设备无关的马蹄型 $L^*a^*b^*$ 色域完全覆盖三刺激值构造的三角型 $C^*M^*Y^*$ 色域, 且大出许多, $L^*a^*b^*$ 色域边界上同 $C^*M^*Y^*$ 色域上存在距离最远的一对点, 两点在 Munsell 标准色卡上不会相同或相邻, 否则 $L^*a^*b^*$ 色域不会在视觉上比 $C^*M^*Y^*$ 色域大出许多。由定义 3 可知, 从 $L^*a^*b^*$ 色域到 $C^*M^*Y^*$ 色域不存在基本无损映射。②在 $L^*a^*b^*$ 色域中, 把同 $C^*M^*Y^*$ 色域色谱相覆盖的区域称为 A 域, 其余部分称为 B 域, 构造映射 Φ , 使 A 域中的色点映射到同色谱的对应 $C^*M^*Y^*$ 色点, 使 B 域中色点映射到同它色谱距

* 收稿日期: 2003-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60273063); 中山大学与广州市快美印务有限公司合作研究资助项目

作者简介: 柴啸龙 (1980 年生), 男, 硕士; E-mail: chaixiaolongok@163.com

离最小的对应 $C^*M^*Y^*$ 色点, 由定义 4 可见, Φ 是从 $L^*a^*b^*$ 色域到 $C^*M^*Y^*$ 色域的最大保真映射。证毕。

$L^*a^*b^*$ 色域是 CIE 构造的理想色域, 但它并不均匀, 尤其是蓝色附近色域^[3], 我们通过反向均匀化^[4] 得到 $L^*a^*b^*$ 色域的特征色点集 G_{Lab} , 再通过 LUT 表建立 G_{Lab} 各色点对应的 $C^*M^*Y^*$ 色值。打印机色域则是很不规则的。对于 $L^*a^*b^*$ 色域中任一色点 P , 按照所选匹配的策略都可以在 $C^*M^*Y^*$ 色域中找到对应的色点 P' , 当需要对 $L^*a^*b^*$ 空间中的某个色点 P 要找出它对应的打印机色值时, 可以先找到点 P 所在的四面体 $P_1P_2P_3P_4$, 其中 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 都是通过 LUT 表能找到对应 $C^*M^*Y^*$ 色域值的色点, 并且四面体 $P_1P_2P_3P_4$ 内部不再包含其它已知对应 $C^*M^*Y^*$ 色值的 $L^*a^*b^*$ 色点。

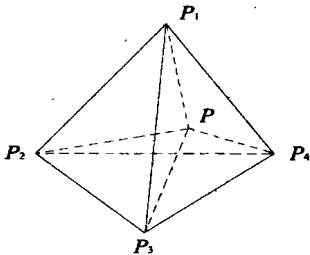


图 1 色域的插值匹配
Fig 1 Gamut mapping by interpolation

点 P 对应的色值需要利用四面体内插值法确定, 各点在 $L^*a^*b^*$ 体系下的坐标就是在 $L^*a^*b^*$ 色域中的色值, 点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的色值向量分别是 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 , 点 P 到点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的距离分别是 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 , 则点 P 的色向量 X_P 的计算公式如下:

$$W_1 = L_2L_3L_4, W_2 = L_1L_3L_4,$$

$$W_3 = L_1L_2L_4, W_4 = L_1L_2L_3$$

$$X_P = \sum_{i=1}^4 \frac{W_i}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4} X_i$$

定理 3 上述算法是从 $L^*a^*b^*$ 色域到 $C^*M^*Y^*$ 色域的最大保真映射。

证明 ①由算法构造可见该算法的映射是拓扑同构映射的; ②每个 Munsell 标准色卡对应一个连续的色谱区间, 假设该算法不是最大保真映射的, 由定义 4 可推知, 存在两个色点, 它们在同一个色卡上, 映射后的两个对应点在两个不同色卡上, 且不相邻。即一个区间中的两个点映射后被另外一个区间的点隔开, 这同算法的映射是拓扑同构映射相矛盾。证毕。

2 灰度平衡与四色到七色的转换

上面是 $L^*a^*b^*$ 色域到 $C^*M^*Y^*$ 色域的匹配, 它把标准设备无关的 $L^*a^*b^*$ 色域转换为打印机的理想色域 $C^*M^*Y^*$, 然后需要把理想 $C^*M^*Y^*$ 色域转换为现实 CMYK 体系, 进一步再转换到 CMYK_{cmk} 色域。这样可以实现色彩在不同体系下的重现。

2.1 灰度平衡调配

基于减色原理的 $C^*M^*Y^*$ 可以合成真正的黑色以及各级标准中性灰^[5], 但是杂质及在不同纸张的渲染效果使实际的 CMY 油墨做不到这些, 引入黑墨 K 不仅能给出像样黑色, 而且用一定黑墨取代部分 CMY 复合墨的灰成分替代 (GCR) 不仅省墨, 主要能降低图像色偏, 图像整体稳定性也提高很多^[6], 但它也使 CMYK 体系的标准以及从 $C^*M^*Y^*$ 色域转换到 CMYK 体系更困难, 我们采用灰度平衡的调配方法来解决这一问题。

利用色谱法测定实际油墨的灰平衡, 先用色差计测定色谱中接近中性灰的输出色块, 再用密度计测出它的等效中性灰密度和 CMY 网点百分比, 然后依据数据根据设备情况制订不同比率下的黑版生成曲线, 如图 2 所示。然后将测得的数据输入到印前分色设定中, 这样就可以实现对油墨色偏的自动补偿。

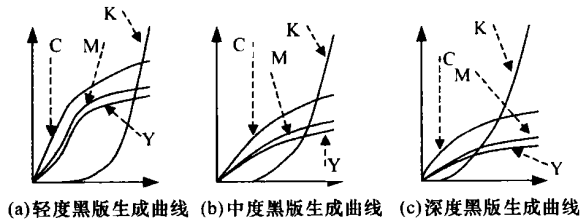


图 2 黑版的生成调配
Fig 2 The curves of black generating

2.2 四色到七色的转换

现实的 C 、 M 、 K 墨都有较大色偏, 只有 Y 墨好些, 如果只用 CMYK 四色墨的话, 由于色偏累加, 在表达一些浅色及较鲜亮的复合色彩时色差较大, 引入浅品红 (m), 浅青 (c), 浅黑 (k) 墨后就大大改善了这一状况, 浅色墨浓度约为相应原色墨 1/4。图 3 是我们通过大量测试制订出的四色转七色曲线。

3 应用结果

我们基于 LUT 表色域匹配方法研发出数码打样系统, 应用于 Epson 9600 上得到如下的效果图。

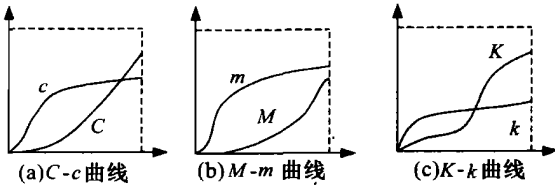


图3 四色到七色的转换曲线
Fig. 3 The cruves of color conversion



图4 基于 LUT 表色域匹配方法的 CMS 应用效果图
Fig. 4 The application of CMS by this gamut mapping method

可以看出, 基于该方法的数码打样系统取得了较好的色彩再现效果。我们进一步还要将算法及转换数据集成为 ICC Profile 数据库, 做成色彩管理模块 (color management module, CMM), 这样系统将会更加具备及时性和开放性。

4 结束语

本文的贡献主要有两方面, 一是提出了一种基于 LUT 表的从 $L^*a^*b^*$ 色域到 CMYKcmk 色域的匹配方法, 并通过 ICC Profile 机制在 Epson 9600 七色打印机上成功实现。另外本文提出的系列定义和定理对色彩管理研究和构造新算法都有一定的借鉴和参考作用。

参考文献:

[1] 石教英. 国际计算机图形学和交互技术会议综述 [J]. 计算机世界, 1998, 36, D.
[2] 徐丹, 蒙耀生, 石教英. 基于 ICC 标准的色彩管理研究 [J]. 软件学报, 1998, 9(10): 740— 747.
[3] BRAUN G J, EBNER F, FAIRCHILD M D. Color gamut mapping in a hue-linearized CIELAB color space [J]. In: IS & T/SID 6th Color Imaging Conference, Scottsdale, 1998: 163— 168
[4] 谢晶. 彩色打印色域匹配的优化技术 [D]. 西安电子科技大学, 2002.
[5] 苏小红, 张田文, 王亚东, 等. 四色打印的灰度平衡方法研究 [J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(12): 1695— 1702.
[6] LITTLEWOOD D J, DRAKOPOULOS P A, SUBBARAYAN G. Pareto-optimal formulations for cost versus colorimetric accuracy trade-offs in printer color management [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(2): 132— 175.

A Gamut mapping Method Based on LUT

CHAI Xiao long¹, ZHANG Zong guo¹, XING Wei jie², LUO Xiao nan¹

(1. Institute of Computer Application, Sun Yat Sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Graduate Student, Sun Yat Sen Memorial Hospital, Guangzhou 510120, China)

Abstract: A new interpolation method in the gamut mapping is proposed, and the method is mainly used in the process of color reproduction based on ICC Profile which is an industrial standard now. The method proposed here has the character of open, in time, and self adapting, and by this method we can realize the transformation from the color gamut of $L^*a^*b^*$ to CMYKcmk.

Key words: gamut mapping; interpolation; LUT; color management