

基于分区分空间的多色打印机通道信号复制方案

刘攀¹, 刘真¹, 朱明²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 河南工程学院, 河南郑州 450007)

摘要: 针对打印机在 CIE 空间的非线性和不一致问题, 提出了一种分区分空间的色彩校正方法, 首先修正理想分区理论, 然后在修正分区中引入“邻域”概念, 通过调整“邻域”, 优化目标信号的处理范围, 使得复制信号满足精度要求. 实验表明新方法具有很高的精度和稳定性.

关键词: 色彩管理; 色彩校正; 分区修正; 分区分空间

中图分类号: TP391, TP334.4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)01-0069-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.01.011

The Channel-Signal Reproduction of Multi-Color Printer Based on Gamut Partition Iterative Subdivision

LIU Pan¹, LIU Zhen¹, ZHU Ming²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou, Henan 450007, China)

Abstract: In order to solve the nonlinear and inconsistent problem of printer in CIE color space, a new channel-signal reproduction method based on gamut partition iterative subdivision was proposed. First, the theory of gamut partition was modified, then the “neighborhood” concept was introduced in modified partition. With the adjustment of “neighborhood”, the calibration range of object color signal was optimized, and the precision of reproduction color signal could meet requirement. The experiment result showed the new method has higher precision and stability.

Key words: color management; color characterization; partition correction; gamut partition iterative subdivision

1 引言

多色打印机由于基色的增加, 不能直接运用 Neugebauer 模型^[1,2]、多项式回归拟合^[3~5]等传统算法复制颜色信号, 现在的多通道彩色信号复制方法都是借鉴颜色分区理论, 将多色降维为三色来处理, 王义峰^[6]通过数学推导验证了打印机色域分区的可行性, 朱明^[7]、史瑞芝^[8]提出了基于分区 Neugebauer 方程的多色复制方案, 该方法采集样本数少, 但是方程修正过程繁琐, 并且没有验证精度, 张桢杰^[9]建立了基于分区多项式回归的多色复制模型, 该方法在每个子区域内都需创建回归关系, 多项式项数的选择也比较复杂. 另外主流的多色复制修正算法大多采用简单理想分区来分色, 没有考虑到色域分区的非线性给复制效果带来的影响.

本文提出了一种基于分区分空间的多色打印机通

道信号复制方法, 新方法与以往的方法不同, 首先在将多色降维为三色过程中并没有采用简单分区操作, 而是在简单分区的基础上对非线性情况比较严重的分区边界进行修正, 修正方法采用以色相角为评判基准的基色线边界扩充为“边界分区”的处理方法, 然后在修正的分区内引入“邻域”的概念来调整原始信号的校正范围, 新方法能够有效改善多色打印机的信号输出质量. 图 1 为新方法的主要流程. 以 HP Designjet Z3200 七色打印机为例, 利用颜色分区理论对打印机进行降维, 针对分区边界的特性修正非线性严重的分区, 在每个分区内创建校准样本集; 确定目标颜色所在分区后, 在对应的校准样本集中找到与其色彩特性最为接近的子空间, 称其为“邻域”, 通过对该“邻域”进行迭代细分或扩大的调整, 不断优化目标颜色的校正范围以保证最终的复制精度.

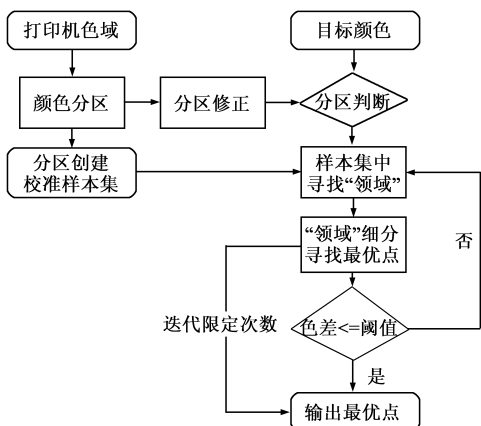


图1 基于分区分空间的多通道信号复制方案流程图

2 多色打印机的色域划分

2.1 颜色分区

如图2,借鉴颜色分区理论,七色色域被分成了6

个分区, $\Omega_{\text{printer}} = \sum_{n=1}^6 \Omega_{ijk}$, 其中 Ω_{printer} 为打印机色域, n 为分区数, i, j 为除了黑之外的两个基色, 对任一目标颜色信号 $P \in \Omega_{ijk}$, 都可以表示为:

$$P = i \oplus j \oplus k \quad (1)$$

其中, \oplus 表示墨色信号混合复制。

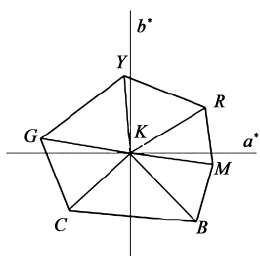


图2 七色打印机色域分区图

2.2 分区建立校准样本集

对于7色色域,采用以往的全色域采集方法,单通道以取样间隔为10%计算,所需采集的总样本数为 11^7 , 这么庞大的样本将产生严重的颜色冗余现象,也给样本测量带来了难度.所以本文在每个分区单独采集校准样本,单通道以相同的取样间隔采样,每个分区样本数为 11^3 , 总的样本集数为 6×11^3 , 样本数量减少几个数量级,大大简化了样本测量的工作量,同时颜色冗余也得到消除,有利于颜色的一致性。

2.3 颜色分区误差修正

图2是一种理想的色域分区情况,但在实验中发现,基色油墨非线性问题比较严重.在2.2节建立的分区分校准样本集中提取出各基色油墨单色梯尺(11级),在 a^*b^* 平面观察其测量色度值,得到如图3所示的实

际色域分区情况,可以看出,分区实际边界并不是理想的直线,而是带有一定的非线性,不同的分区边界非线性程度不同,其中绿和蓝边界趋近于直线,而青和品红边界非线性表现得比较明显,尤其是高饱和度部分。

图3和图2相比,分区边界有较大的偏差,所以简单采用理想的色域划分方法会影响到最终的输出精度.以RMK分区为例进行分析,随机生成300个样本色块 $\text{sample}_i \in \Omega_{\text{RMK}} (i = 1, 2, \dots, 300)$, 打印输出并测量其色度信号,在 a^*b^* 平面观察分布情况,如图4所示,部分 $\text{sample}_j (j < i)$ 越过了 M 理想边界,若以理想边界来划分色域,这 j 个色块用式(1)表示为 $\text{sample}_j = M \oplus B \oplus K$, 显然产生了误差.另外,理想RMK分区还包含了实际YRK分区的部分区域,同理也会对输出精度也会产生影响。

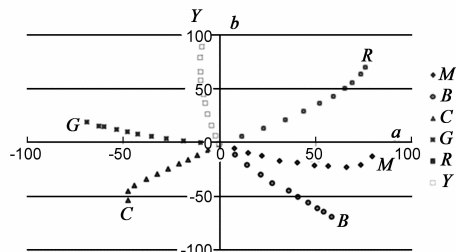


图3 七色打印机实际色域边界分布

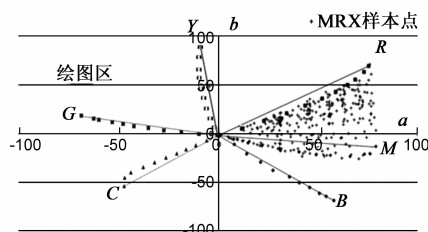


图4 七色打印机色域边界误差分析

针对颜色分区引起的误差,本文采用以色相角为评判基准的基色线边界扩充为“边界分区”的处理方法来修正.以RMK分区为例,具体方法如下:

(1)计算分区基色理想边界 L 和组成实际边界的梯尺样本点 sample 的色相角偏差:

$$\Delta\theta(i) = |\theta_L - \theta_{\text{sample}(i)}| \quad (2)$$

其中 $\Delta\theta(i)$ 表示第 i 个样本点与 L 的色相角偏差, θ_L 表示理想边界 L 的色相角, $\theta_{\text{sample}(i)}$ 表示第 i 个样本点的色相角, $|\cdot|$ 表示绝对值。

(2)计算 L 与实际边界的最大偏差,用以作为判断实际分区边界线性情况的依据:

$$\Delta\theta_{\text{max}} = \max(\Delta\theta(i)) \quad (3)$$

$\Delta\theta_{\text{max}}$ 即为偏离 L 最远的样本与 L 的偏差.如图5所示, R 区域部分实线是 R 基色理想分区边界,点划线是偏离 R 理想边界最远样本与原点的连线,它们之间角

度差即为 R 基色理想边界和实际边界的最大偏差, 品红区域部分实线是 M 基色理想分区边界, 点划线是偏离 M 理想边界最远样本与原点的连线, 它们之间即为 M 基色理想边界和实际边界的最大偏差。

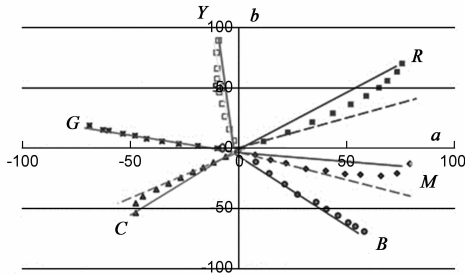


图5 颜色分区修正示意图

(3) 以 $\Delta\theta_{\max}$ 为评判依据, 1 度角为评判基准将基色实际边界划分为 linear 和 non-linear 两个等级, 若基色边界的 $\Delta\theta_{\max} \leq 1$, 则判定该基色实际边界为 linear , 否则判定为 non-linear . 对前者的基色实际边界修正方法为直接采用理想边界代替, 对于 non-linear 的边界则采用扩充为“边界分区”的方法修正, 图 5 中是本文最终的分区分区修正图, 分区边界中 R 基色、 M 基色、 C 基色实际边界被判定为 non-linear , 其他基色则认为是 linear , 那么将 R 基色、 M 基色、 C 基色实际边界扩充为“边界分区”, 此时在原来的 6 个分区的基础上又加入了 3 个特殊的分区区域, 而其他基色的实际边界则直接用理想边界代替。

(4) 经上述操作后, 目标颜色信号 P 在色域内的位置分为分区内部和“边界分区”内两种情况, 对在分区内部的直接采用该分区的算法校正, 对落在“边界分区”上的颜色, 则先分别使用临近“边界分区”的两个分区的算法进行处理, 将效果好的作为最终的输出信号。

3 基于分区分空间的色彩校正

如上所述, 对于任一目标颜色信号 $P(L, a, b) \in \Omega_{\text{printer}}$, 都可以用相应分区算法来求输出, 用 F_{printer} 表示校正算法, output 表示输出, 那么目标颜色的校正过程表示为:

$$\text{output} = F_{\text{printer}}(P) \quad (4)$$

本文提出的校正算法 F_{printer} 流程如图 6 所示, 规范分区三通道信号到 $[0, 1]$, 每个通道的校准样本集取样间隔用 step 表示, 算法具体步骤如下:

(1) 确定 P 所在分区, 在对应样本集中找到与 P 色差 detE 最小的点, 作为候选点 Q . 若 $\text{detE} \leq \text{阈值 } A$, 则进行步骤(5), 否则进行步骤(2).

(2) 以 Q 为基础, 构造 P 的“邻域”, 可初步认定 P 在“邻域”内. 假设分区三通道信号用 $W/U/V$ 表示, 校准样本集构成一个立方体空间 S , $Q(W, U, V)$ 是校准

样本集中任一点, 在 S 中的位置分为: (a) 在 S 内部, (b) 在 S 表面边界两种情况, 分别作如下处理:

(a) Q 三通道信号值都减去一个间隔 step : $W_1 = W - \text{step}$, $U_1 = U - \text{step}$, $V_1 = V - \text{step}$ 取得样本集中的一个点 $Q_1(W_1, U_1, V_1)$, 作为“邻域”的一个顶点; Q 三通道信号值都加上一个间隔 step : $W_8 = W + \text{step}$, $U_8 = U + \text{step}$, $V_8 = V + \text{step}$ 取得样本集中的一个点 $Q_8(W_8, U_8, V_8)$, 作为“邻域”的一个顶点. Q_1, Q_8 组成一个立方体空间, 称其为 P 的“邻域”, “邻域”其他点有 $Q_2(W_8, U_1, V_1)$, $Q_3(W_1, U_8, V_1)$, $Q_4(W_1, U_1, V_8)$, $Q_5(W_8, U_8, V_1)$, $Q_6(W_8, U_1, V_8)$, $Q_7(W_1, U_8, V_8)$.

(b) Q 在 S 表面边界上即说明 Q 有通道值为 0 或 1, 对为 0 的通道信号加上一个 step , 为 1 的通道信号减去一个 step , 调整后 Q 点在 S 内, 再对其进行 (a) 操作找到“邻域”。

(3) 对“邻域”进行 K 级细分, 构造“邻域”样本集, 其中样本的三通道信号值由 S 的顶点插值得到, 如式 (5), 其中 i 表示第 i 个样本, 而色度值可通过正向模型 (钮介堡模型、多项式回归模型、三维查找表等) 计算得到, 本文采用胞元划分钮介堡模型, 实验中已经验证过其精度, 其平均色差精度可达到 0.6 左右, 满足精度要求, 因篇幅限制, 本文并没有详细涉及该部分内容。

$$\begin{aligned} W_i &= \text{Round}(W_1 + (W_8 - W_1)/K \times (i - 1)) \\ U_i &= \text{Round}(U_1 + (U_8 - U_1)/K \times (i - 1)) \\ V_i &= \text{Round}(V_1 + (V_8 - V_1)/K \times (i - 1)) \end{aligned} \quad (5)$$

(4) 在“邻域”样本集中再次找到与 P 色差 detE 最小的点, 作为候选点 Q . 此时对 detE 做三种判断:

(a) 若 $\text{detE} \leq \text{阈值 } A$ 或者“邻域”细分的迭代次数超过 N 次, 则进行步骤(5).

(b) 若 $\text{阈值 } A < \text{detE} \leq \text{阈值 } B$ 且迭代次数不超过 N 次, 则进行步骤(2).

(c) 若 $\text{detE} > \text{阈值 } B$, 则步骤(2)中 P 在“邻域”内的假设无效, 此时对“邻域”进行扩大处理, 为避免“邻域”扩大时出现超出分区 1331 个样本集范围的情况, 本文采用“邻域”自适应扩大方法, 方法首先判断“邻域”八个顶点的三个通道值是否有 0 或者 1 的值, 如果所有顶点通道值都不为 0 和 1, 那么将顶点的通道值都增加或减少一个 step , 得到 P 的新“邻域”; 如果某一顶点的任一通道值为 0 或者 1, 那么保持该通道值不变, 其它通道值增加或者减去一个 step , 得到 P 的新“邻域”. 如图 7 为“邻域”扩大示意图, 虚线部分表示原“邻域”, 实线部分表示新“邻域”. 对新“邻域”进行步骤(3).

(5) 通过“邻域”不断优化过程, 得到理想的最优点 Q , 作为最终的输出信号 output .

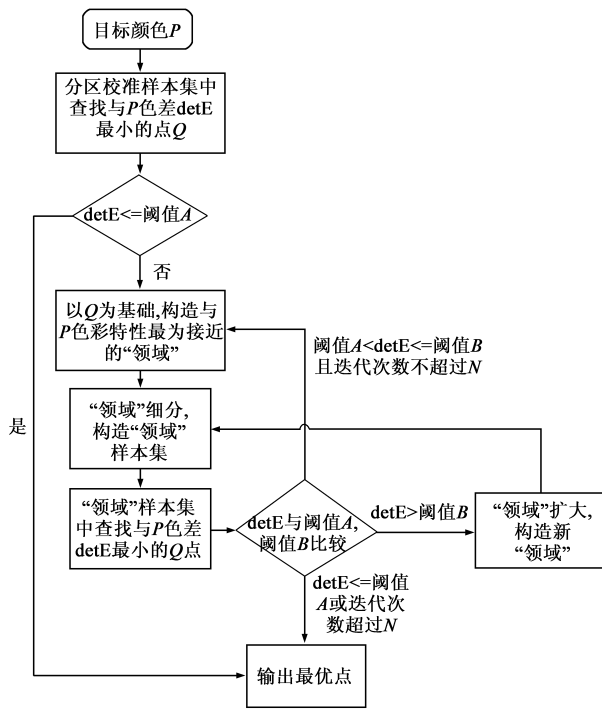


图6 新分色算法流程图

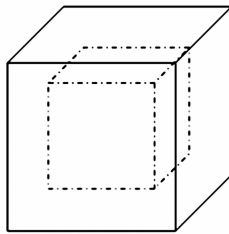


图7 “邻域”扩大

4 实验结果及分析

采用新方法对 HP Designjet Z3200 打印机进行多通道色彩信号校正. 利用 2.2 节分区采样的方法建立校准样本集, 检测样本集的采集过程相似, 校准样本集的取样间隔为 10%, 每个分区采集 1331 个样本, 全色域组合成 $6 \times 1331 = 7986$ 个样本集; 检测样本集按基色网点面积率 0, 16.7, 33.3, 50, 66.7, 87.3, 100 排列组合而成, 每个分区采集 $7^3 = 343$ 个样本, 全色域组合成 $6 \times 343 = 2058$ 个样本集. 打印校准样本集和检测样本集并测量其色度值.

实验过程中阈值 A 和阈值 B 的选择对最终的输出精度至关重要, 阈值 A 是判断是否直接输出候选采样点 Q 的依据, 阈值 B 的作用是调整“邻域”, 即调整原始信号的校正范围, 根据色差工业标准说明, 当色差在 3 以内时, 人眼对两个不同的刺激感受不出明显区别, 当色差超过 6 时, 人眼对两个不同的刺激能感受出很强烈的区别, 所以本文实验中选取阈值 A = 3, 阈值 B = 6, 当

候选采样点 Q 的色度值与原始信号的色差 ≤ 3 时, 说明人眼对 Q 与原始颜色的色差感觉不明显, 可以将 Q 的打印机通道信号值作为输出, 当候选采样点 Q 的色度值与原始信号的色差 > 6 时, 本文认为构造的“邻域”无效, 需要扩充“邻域”范围调整原始信号的校正范围, 从而达到控制输出精度的目的.

将检测样本的测量色度值 Lab 作为目标颜色信号, 首先判断目标颜色信号在色域的位置, 若在分区内部, 则采用该分区的算法进行校正; 若在“边界分区”上, 则比较临近两个分区的校正效果, 将效果好的作为最终输出. 对校正结果再次用打印机打印测量得到新方法的预测 $L' a' b'$ 值, 用 ΔE_{ab} 色差公式计算 Lab 和 $L' a' b'$ 的色差, 图 8 为色差分布.

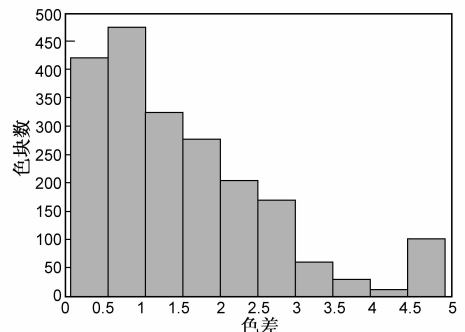


图8 新方案色差分布

表 1 为本文多通道信号复制方案的整体精度表现, 结合图 8 可以总结出, 新方案色差分布在 0 到 5 之间, 大部分在 0 到 3 范围内, 平均色差只有 1.09, 精度表现优异.

表 1 新方案的精度表现

算法	最大色差 ΔE_{ab}	平均色差 ΔE_{ab}
基于分区分空间的校正算法	4.87	1.09

表 2 列出了新方案各个分区的精度表现, 并且与文献[9]中的利用颜色分区和胞元划分修正的一些复制模型进行了对比.

通过对比新方案 6 个分区的精度表现, 可以看出, BCK、GYK、YRK 和 MBK4 个分区平均色差都在稳定 1 左右, 而且最大色差都小于 4, 色彩信号校正效果理想, 而 RMK 和 CGK 的最大色差和平均色差相比其他分区都稍大, CGK 的最大色差甚至接近 5, 考虑其原因, 可能是 C 基色和 M 基色非线性比较严重造成的.

通过与几种修正模型的分区色差比较, 可以看出, 基于分区分空间的多通道信号复制方案 ($N = 3$) 精度表现要优于 $5 \times 5 \times 5$ Neugebauer 方程模型, 而和 $5 \times 5 \times 5$ 多项式回归拟合算法相当; 而稳定性方面, 新方案每个分区的平均色差相对稳定, 最大色差波动不大, 明显要优于 $5 \times 5 \times 5$ Neugebauer 方程模型, 和 $5 \times 5 \times 5$ 多项式

回归模型接近。

表 2 新方案与几种修正算法的分区精度对比

算法	色差 ΔE_{ab}	BCK	CGK	GYK	YRK	RMK	MBK
$5 \times 5 \times 5$ Neugebauer 方程模型	最大色差 ΔE_{ab}	3.38	4.28	6.74	9.68	3.85	4.02
	平均色差 ΔE_{ab}	1.11	1.56	1.52	1.25	0.72	1.15
$5 \times 5 \times 5$ 多项式回归	最大色差 ΔE_{ab}	4.33	4.23	4.96	4.81	4.74	4.87
	平均色差 ΔE_{ab}	1.10	0.85	1.12	0.95	0.90	0.78
基于分区空 间的复制算法 ($N=3$)	最大色差 ΔE_{ab}	3.51	4.87	3.21	3.26	4.03	3.44
	平均色差 ΔE_{ab}	1.07	1.14	1.03	0.87	1.39	1.05

新方案在整体和分区的精度表现上都很理想,并且稳定性高,分析其原因,主要有以下几点:

(1)颜色分区思想极大的提高了算法的灵活度,将色域划分为色彩特性不同的多个分区,对不同的分区做不同的处理可以提高整体的精度。

(2)通过划分“边界分区”修正了分区边界的非线性,将一些原本复制偏差较大的颜色信号进行了校正,在降低误差的同时提高了稳定性。

(3)“邻域”迭代细分的方法还兼顾胞元划分的特点,可以在更小的空间内进行色彩校正,尤其是非线性比较明显的区域,改善效果更加突出。

(4)算法中“领域”的选择对最终精度有较大影响,新方案对无效的“邻域”采取“邻域”再扩大操作,最大程度的将目标颜色信号控制在处理范围内,使得输出结果更加准确。

5 结论

本文提出了一种基于分区空间的多色打印机通道信号复制方案,通过划分基色“边界分区”的方法来修正分区,减小分区理论带来的误差,通过在分区内对“邻域”迭代细分或者扩大的调整,优化目标颜色信号的处理范围,提高输出精度。新方案兼顾了修正的颜色分区、查找表、胞元划分的特点,拥有很高的精度、灵活度和稳定性,可以成功解决打印机在 CIE 色彩空间的非线性和不一致问题。实验结果表明,新方案与一些修正模型相比,无论在精度方面还是稳定性方面都表现得不落下风。

参考文献

- [1] Zeng Huanzhao, Peter G Anderson. Extended Neugebauer model for printer color formation [A]. Proceedings of the Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts IV [C]. USA: SPIE, 1999. 27 - 36.
- [2] C De M Bezerra, C J Hawkyard. Color matching for ink-jet prints on paper [J]. Color Research and Application, 1998, 23

(1): 18 - 26.

- [3] David Littlewood, Ganesh, Subbarayan. Maintaining an accurate printer characterization [A]. Proceedings of the Color Imaging Conference: Color Science, System, and Applications [C]. USA: IS&T, 2004. 203 - 210.
- [4] 刘瑞华, 曾平, 王义峰. 一种自适应分区回归的打印机色彩校正方法 [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 Electronica Sinica, 2007, 35(11): 2201 - 2204. (in Chinese)
- [5] 苏晓红, 郭茂祖. 基于偏最小二乘回归分析的混色数据学习算法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 429 - 431.
Su Xiaohong, Guo Maozu, et al. Research of mix-color data learning algorithm based on partial least square regression [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 429 - 431. (in Chinese)
- [6] 王义峰, 曾平. 基于色域划分的多通道打印机色彩校正 [J]. 电子学报, 2010, 38(3): 507 - 511.
Wang Yi-feng, Zeng Ping. Multi-channel printer characterization based on gamut partition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 507 - 511. (in Chinese)
- [7] 朱明, 刘真, 陈广学. 基于分区纽阶堡方程的 6 色印刷分色模型研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(7): 1 - 10.
Zhu Ming, Liu Zhen, Chen Guangxue. Research on six-color separation model based on subarea neugebauer equations [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 1 - 10. (in Chinese)
- [8] 史瑞芝, 曹朝辉. 基于 7 色高保真彩色印刷的颜色分色模型 [J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 58 - 60.
Shi Ruizhi, Cao Chaohui. A color separation model based on 7-color Hi-Fi press [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 58 - 60. (in Chinese)
- [9] 张桢杰, 等. 基于子空间划分的多项式回归多色分色算法 [J]. 包装工程, 2013, 34(7): 65 - 67.
Zhang Zhenjie, et al. Polynomial regression multi-color separation method based on subspace partition [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 65 - 67. (in Chinese)

作者简介



刘攀 男, 1990 年 12 月出生, 湖南张家界人. 上海理工大学硕士研究生, 主要研究方向为色彩管理、颜色科学和图像处理。

E-mail: jynslp@163.com

刘真 (通讯作者) 女, 1953 年 1 月出生, 江苏泰州人. 上海理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字图文信息处理、色彩再现理论与应用、印刷数字化工作流程。

E-mail: lunaprint@163.com