

基于子空间划分的多项式回归多色分色算法

张桢杰¹, 刘真¹, 吴明光²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 200046)

摘要: 提出了一种新的分色算法。方法首先对多色打印机进行色域分区, 再将每个分区划分成若干个子空间, 在每个子空间内运用最小二乘法建立多项式模型, 对目标色度值进行分色时, 搜索目标色度值所在最优子空间, 求解对应的多项式方程, 即可得到分色结果。实验表明, 这种分色算法具有较高的精度和稳定性, 能够满足多色高精度印刷的要求。

关键词: 多色分色; 多项式回归; 子空间; 分区

中图分类号: TS801.3; TS807 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2013)07-0065-03

Polynomial Regression Multi-color Separation Method Based on Subspace Partition

ZHANG Zhen-jie¹, LIU Zhen¹, WU Ming-guang²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 200046, China)

Abstract: A new color separation method was proposed. Multi-color printer gamut was separated into partitions; every partition was divided into subspaces. Polynomial models were created in subspaces with least square method. Optimal subspace was found first when the targeting colorimetric value was in color separation. Separation result was obtained by solving polynomial equation. The experiment showed that this separation method performs well in accuracy and stability and satisfies the requirement of multi-color high-precision printing.

Key words: multi-color separation; polynomial regression; subspace; partition

分色算法描述了从设备无关色空间到设备值之间的对应变换关系。分色算法的优劣直接决定了颜色能否在输出设备上准确的复制和再现。目前主流的分色算法包括修正的纽介堡方程、多项式回归、神经网络等^[1]。周倩等人对3种分色算法进行了理论分析并通过实验论证了多项式回归算法精度较高^[2]。Kyuseo Han等人提出了一种基于多项式回归的分色算法^[3], Mark S. Drew等人提出了基于灰度的多项式回归分色算法^[4], 但两者精度都不高。Philipp Urban, Mitchell R Rosen等人提出了基于子空间纽介堡方程的分色算法, 同时提出了子空间搜索算法, 提高了分色精度^[5]。

笔者将每个分区划分成若干子空间, 对每个子空间建立多项式方程, 以提高多项式回归分色算法的精度。

1 多项式回归理论

设定输入矩阵 R , 转换矩阵 M , 输出矩阵 H , 则多项式模型:

$$H = R \times M \quad (1)$$

式中: 输入矩阵 R 为 $m \times n$ 矩阵, m 为样本数, n 为多项式的项数, 行向量 r 为由色块基色网点面积率组成的多项式, 即 $R = [r_1^T, r_2^T, \dots, r_n^T]^T$ 。输出矩阵 H 为 $m \times 3$ 矩阵, 行向量 h 为色块的 L^* , a^* , b^* 值, 即 $H = [h_1^T, h_2^T, \dots, h_n^T]^T$ ^[6]。

打印输出足够数量的色块, 组成样本, 在已知样本的网点面积率和 L^* , a^* , b^* 的前提下, 根据最小二乘法, 转换矩阵 M 可由式(2)求解得到:

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271446)

作者简介: 张桢杰(1989-), 男, 江苏人, 上海理工大学硕士生, 主攻色彩再现理论与应用。

$$M = (R^T R)^{-1} R^T H \quad (2)$$

2 分色算法建模过程

将打印机色域按照 7 个基色 C, M, Y, K, R, G, B 的色相角进行分区, 共分为 BCK, CGK, GYK, YRK, RMK, MBK 6 个分区^[7]。各分区分布投影在 a^*b^* 平面上见图 1。

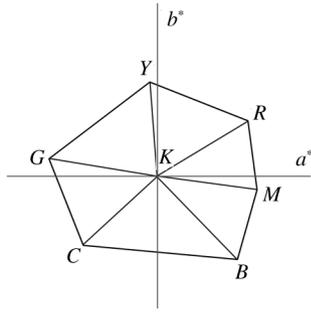


图 1 BCK, CGK, GYK, YRK, RMK, MBK 分区分布
Fig. 1 Distribution of BCK, CGK, GYK, YRK, RMK, MBK partitions

2.1 打印机设备空间到 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的预测模型

将每个分区按网点面积率均匀划分成 $N \times N \times N$ 个子空间。在每个子空间内, 运用最小二乘法求得转换矩阵 M , 记录所有子空间的转换矩阵。对于任意由分区三基色组成的网点面积率, 根据基色及其网点面积率判断分区和子空间后, 经计算即可求得预测 $L^*a^*b^*$ 值:

$$h = [L^*, a^*, b^*] = r \times M \quad (3)$$

2.2 CIE $L^*a^*b^*$ 空间到打印机设备空间的分色模型

由于不能直接确定目标 $L^*a^*b^*$ 值的所在子空间, 因此, 在分色过程中必须首先搜索目标 $L^*a^*b^*$ 值的最优子空间。分色模型具体步骤见图 2。

第 1 步: 根据色相角判断目标 $L^*a^*b^*$ 值所在的分区。

第 2 步: 求每个子空间的 8 个顶点 $L^*a^*b^*$ 值的平均值, 作为子空间的假想中心点。计算目标 $L^*a^*b^*$ 值与分区内所有子空间假想中心点在 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的欧氏距离, 按照欧氏距离升序进行排列^[8]。

第 3 步: 用子空间搜索算法^[8], 选取前 7 个子空间 s_1, s_2, \dots, s_7 作为可能子空间。

第 4 步: 依次把 7 个可能子空间的转换矩阵和目标 $L^*a^*b^*$ 值代入式(3), 用牛顿迭代法求解并把求

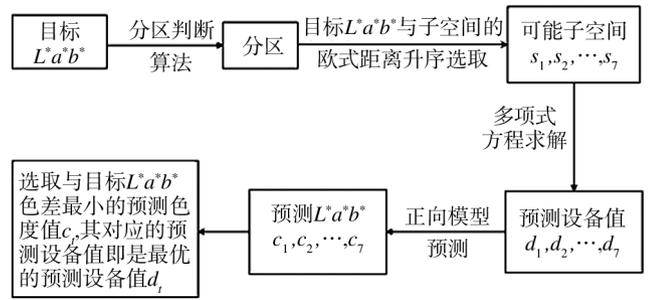


图 2 分色模型具体步骤

Fig. 2 Steps of color separation model

得的预测网点面积率范围裁剪至 0 ~ 100%, 得到每个子空间的预测网点面积率 d_1, d_2, \dots, d_7 。

第 5 步: 将预测网点面积率 d_1, d_2, \dots, d_7 用打印机设备空间到 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的预测模型预测, 得到预测 $L^*a^*b^*$ 值 c_1, c_2, \dots, c_7 , 与目标 $L^*a^*b^*$ 色差最小的预测 $L^*a^*b^*$ 值 c_i 对应的子空间 s_i 为最优子空间, 其对应的预测网点面积率 d_i 为最终分色结果, 其中, $t \in [1, 7]$ 。

3 实验

3.1 设备及材料

打印输出设备: HP Designjet Z3200 (24inch) HT (CMYKRGBmkk'); 纸张: EasiColor EP520H 顶级半光面打样纸; 颜色测量设备: gretagmacbeth iLiO。

3.2 过程及结果分析

将每个分区的 3 个基色按网点面积率 0, 10, 20, ..., 100 排列组合成色块, 每个分区共 1331 个色块组成建模样本。每个分区 3 个基色按网点面积率 0, 16.7, 33.3, 50, 66.7, 83.3, 100 排列组合成色块, 每个分区共 343 个色块组成检测样本。

参考文献[8-9], 将每个分区按网点面积率均匀划分成 $5 \times 5 \times 5$ 个子空间, 每个子空间包含 27 个分色样本。考虑每个子空间的样本数量较少, 输入矩阵 R 的行向量 r 选择 10 项多项式, 如式 3, 式中 x, y, z 分别表示分区三基色的网点面积率。

$$r = [1, x, y, z, xy, xz, yz, x^2, y^2, z^2] \quad (3)$$

由于分色模型在确定最优子空间时需要使用打印机设备空间到 CIE $L^*a^*b^*$ 空间的预测模型, 因此预测模型的精度会影响最终分色结果的精度, 首先需要对预测模型在精度上进行评价。

3.2.1 预测模型评价

将每个分区的检测样本的网点面积率作为输入值,用预测模型进行预测,获得检测样本的预测 $L^* a^* b^*$ 值,将其和检测样本的实际测量值计算色差,评价结果见表 1。

表 1 预测模型评价结果

Tab.1 Evaluation results of prediction model

色差	分区					
	BCK	CGK	GYK	YRK	RMK	MBK
ΔE_{ab}^*						
平均值	1.03	0.80	1.08	0.87	0.88	0.64
最大值	3.85	2.08	2.59	3.82	2.95	2.10
最小值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

由表 1 可知,预测模型在每个分区预测性能很高,预测模型的预测结果是可信的。

3.2.2 分色模型评价

将每个分区的检测样本的实际测量 $L^* a^* b^*$ 值作为目标 $L^* a^* b^*$ 值,用分色模型对其进行分色。对分色结果再次用打印机打印输出并测量,获得分色模型的预测 $L^* a^* b^*$ 值,将其和对应的目标 $L^* a^* b^*$ 值计算色差。经统计得到分色模型评价结果,并同时和 $5 \times 5 \times 5$ 子空间划分的 XYZ 三刺激值指数修正的纽介堡方程分色算法进行对比,评价结果见表 2。

由分色模型评价结果可知,提出的分色算法平均色差 ΔE_{ab}^* 在 1 左右,最大值色差 ΔE_{ab}^* 小于 5,在精度

表 2 分色模型评价结果

Tab.2 Evaluation results of color separation model

算法	色差 ΔE_{ab}^*	BCK	CGK	GYK	YRK	RMK	MBK
$5 \times 5 \times 5$	平均值	1.10	0.85	1.12	0.95	0.90	0.78
多项式	最大值	4.33	4.23	4.96	4.81	4.74	4.87
回归	最小值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
$5 \times 5 \times 5$	平均值	1.11	1.56	1.52	1.25	0.72	1.15
纽介堡	最大值	3.38	4.28	6.74	9.68	3.85	4.02
方程	最小值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

和稳定性上表现均较好。与 $5 \times 5 \times 5$ 子空间划分的 XYZ 三刺激值指数修正的纽介堡方程分色算法相比,在 6 个分区的平均色差略优,在 GYK, YRK 分区的最大色差优势明显。

4 结论

提出了一种基于子空间划分的多项式回归多色分色算法,对算法进行了理论分析和实验论证,实验结果表明,提出的分色算法平均色差 ΔE_{ab}^* 在 1 左右,最大值色差 ΔE_{ab}^* 小于 5,符合高精度印刷的要求。与 $5 \times 5 \times 5$ 子空间划分的 XYZ 三刺激值指数修正的纽介堡方程分色算法相比,在 6 个分区的平均色差略优,在 GYK, YRK 分区的最大色差上优势明显。

参考文献:

[1] 张桢杰,刘真. 三种基于分区纽介堡方程的分色算法的误差分析[J]. 包装工程,2012,33(15):88-91.
ZHANG Zhen-jie, LIU Zhen. Errors Analysis of Three Color Separation Algorithms Based on Subarea Neugebauer Equation[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 88-91.

[2] 周倩,刘真,朱明. 三种主流分色算法的误差分析[J]. 包装工程,2011,32(7):107-111.
ZHOU Qian, LIU Zhen, ZHU Ming. Errors Analysis of Three Major Separation Algorithms [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 107-111.

[3] KYUSEO Han. Characterizing the Desktop Color Printer with Polynomial regression[Z]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, 1998(5):4369-4372.

[4] DREW M S. Colour Printer Characterization by Regression with Greyspace Constraint [Z]. Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference:1998:193-196.

[5] URBAN P. Accelerating Spectral-based Color Separation within the Neugebauer Subspace [J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(4):43014.

[6] 王勇,徐海松. 基于多项式回归模型的扫描仪色度特征化[J]. 光学学报,2007,27(6):1135-1138.
WANG Yong, XU Hai-song. Colorimetric Characterization for Scanner Based on Polynomial Regression Models [J]. Act A Optical Sinica, 2007, 27(6): 1135-1138.

[7] 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.

$g-i$ 依次为 d 算法输出的 $1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 7/8$ 灰度的各向异性曲线; $d-f, j-l$ 依次为传统 Floyed-Steinberg 算法输出的 $1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 3/4, 7/8$ 灰度的各向异性曲线。曲线上的每一点表示在该波长(频率)处频谱图各方向上频谱值之间的差异(以方差值表示),代表着该波长对应的原图像各方向灰度变化程度上的差异。若在人眼较敏感的中低频处差异较大,则说明有人眼可察觉的纹理存在。

通过分析可见,在 $1/16$ 灰度值处的高频部分 d 算法输出结果的各向异性值低于 Floyed-Steinberg 算法,其他灰度值处 d 算法的各向异性都偏高,特别是在中低频处,而且在 $1/4, 1/2, 3/4$ 灰度值处 d 算法输出结果的各向异性值明显偏高,这也印证了用 2 种算法输出渐变条时在滞后纹理方面的表现:即 d 算法的滞后纹理没有明显改善,在中间调附近还有所加重。因此,提高半色调输出质量的另一个关键是降低算法输出结果的各向异性,即提高算法输出结果的对称性。

4 结论

将基于权值抖动的误差扩散加网算法与传统 Floyed-Steinberg 算法的输出结果进行主观视觉对比,分析了它们的径向平均功率谱和各向异性。基于权值抖动的误差扩散算法在 4 个扩散位置上都有权值存在,且最小的两个权值与最大的 2 个权值各分为一组,权值在组内进行抖动。该算法因在中间调以外的阶调范围内引入了合理的绿噪声信号,因而减轻了伪轮廓问题,而在中间调附近因能量依然较集中于高频,伪轮廓问题依然存在。此外,由于该算法在各向异性方面没有更好的改善,特别是在中间调附近反而变差,导致滞后纹理现象依然严重。为了进一步改善算法性能,提高半色调输出质量,今后的研究应从在各阶调引入合理的绿噪声信号和提高输出对称性两方面入手,研究对称的绿噪声误差扩散滤波器及相对应的扫描路径策略。

(上接第 67 页)

- WANG Yi-feng, ZENG Ping. Multi Channel Printer Characterization Based on Gamut Partition[J]. Act A Electronica Sinica, 2010, 38(3): 507-511.
- [8] GUO Jin-yi. Novel Spectral Characterization Method for Color Printer Based on the Cellular Neugebauer Model[J].

参考文献:

- [1] 邝敏威,陈新. 调频加网技术分析和研究[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 12-14.
KUANG Min-wei, CHEN Xin. Analysis and Research on FM Screening Technology[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 12-14.
- [2] 李飞,唐正宁. 数字加网技术[J]. 包装工程, 2005, 26(5): 49-52.
LI Fei, TANG Zheng-ning. Digital Screening Technology[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(5): 49-52.
- [3] ROSENFELD G. Screened Image Reproduction: US, 4456924 [P]. 1984.
- [3] GALL W, WELLENDORF K, KIEL K. Production of Screen Printing Block: US, 4499489 [P]. 1985.
- [5] OPPENHEIM A V, SCHAFFER R W. Digital Signal Processing[J]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975.
- [6] 蒋甫玉,孟令顺,张凤旭,高丽坤. Chebyshev 逼近滤波器在位场分离中的应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(3): 311-315.
JIANG Fu-yu, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-xu, et al. The Application of Chebyshev Approximation Filter to Separating Potential Anomalies[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(3): 311-315.
- [7] 叶玉芬. 数字半色调技术中的误差扩散算法研究[M]. 西安:西安电子科技大学, 2006.
YE Yu-fen. Research on Error Diffusion Algorithm in Digital Halftoning[M]. Xi'an: Xi'an University, 2006.
- [8] WOO B. A Survey of Halftoning Algorithms and Investigation of the Error Diffusion Technique. MIT, S. B. thesis, 1984.
- [9] CHANG Jiang-hao, ALAIN B, OSTROMOUKHOV V. Structure-Aware Error Diffusion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 162-166.
- [10] PANG Wai-man, QU Ying-ge, WONG Tien-tsin, et al. Structure-Aware Halftoning[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 89-93.
- Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1106-1109.
- [9] WANG Bin-yu. Color Separation Criteria for Spectral Multi-ink Printer Characterization [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(1): 13301.