

基于高保真颜色再现的色域拓展方法研究

李效周^{1,2}, 陈广学¹, 贾春江^{1,3}, 问双双¹, 荆凯¹

(1. 华南理工大学 制浆造纸工程国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 山东轻工业学院 轻化与环境工程学院, 山东 济南 250353; 3. 广东轻工职业技术学院, 广东 广州 510300)

摘要: 针对高保真颜色再现的需要, 研究了多种拓展目标色域方法。这些方法包括基于新显示技术的色域映射方法、改善纸张表面性能和采用多种数字印刷纸张、采用超过四色的高保真印刷方式等。并将这些拓展目标色域的方法分为软件方法和硬件方法两类。详细分析了上述方法实现色域拓展的特点, 并比较了其色域拓展的效果。试验结果表明, 采用软件方法和硬件方法拓展色域, 所得色域范围和效果明显不同。该结果有助于进一步研究实现高保真颜色再现的方法, 使颜色在传递过程中达到最佳的视觉效果。

关键词: 色域; 颜色再现; 色域拓展; 高保真印刷

中图分类号: TS801.8

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2011)01-0019-05

Study on Gamut Extension Methods for Hi-Fi Color Reproduction

Li Xiaozhou^{1,2}, Chen Guangxue¹, Jia Chunjiang^{1,3}, Wen Shuangshuang¹, Jing Kai¹

(1. State Key Laboratory of Pulp & Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. School of Light Chemistry and Environment Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353, China;
3. Guangdong Industry Technical College, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Several methods to extend destination gamut were studied for the high fidelity color reproduction in this paper, for instance, gamut mapping methods dependent on new display technologies, improving paper surface performances and using high fidelity printing of more than four color inks. The above methods were classified into two classes, soft method and hard method. The characteristics of the above methods to extend destination gamut were analyzed and the extension results were compared. The ranges, results and mechanisms of the gamut extension made by the two types of methods were different. The results help to make a further study on the methods to achieve high fidelity color reproduction and to extend the destination gamut, then to perceive the best visual effect in color transmission process.

Key words: color gamut; color reproduction; gamut extension; high fidelity printing

0 引言

在颜色再现过程中, 颜色的传递主要是从原稿色域映射到目标媒介色域。一方面, 若目标色域完全包

含源色域, 则直接进行颜色的传递而不丢失颜色信息; 另一方面, 若原稿色域大于目标色域或部分色域不重叠, 则需要对目标色域外的颜色进行色域的映射, 包括色域压缩、裁剪或拓展, 使色域外颜色的失

收稿日期: 2010-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972134)

作者简介: 李效周(1981-), 男, 山东莱阳人, 山东轻工业学院讲师, 华南理工大学博士生, 主要研究方向为数字印刷和印刷图像处理, E-mail: lixiaozhou2000@163.com

通信作者: 陈广学(1963-), 男, 河南杞县人, 华南理工大学特聘教授, 工学博士, 博士生导师, 主要从事数字印刷, 印刷图像处理 and 印刷包装材料方面的研究, E-mail: guangxuecn@yahoo.com.cn

真程度降到最小。颜色再现技术可以分为两大类,即基于显示技术的颜色再现和基于印刷技术的颜色再现。在这两类颜色再现技术中,颜色再现的高品质属性要求目标色域与源色域尽可能匹配。对于基于显示技术的颜色再现来讲,目标色域通常大于源色域,要求源色域内的颜色能够充分地利用目标色域的全部内容。通常采用合适的色域映射技术将源色域的颜色映射到目标色域内,不同的色域映射算法对于源色域到目标色域的拓展效果是有差别的。Justin Laird 等对几种常用的色域映射算法的色域拓展效果进行了比较和心理物理评价试验分析,比如真彩色算法、SDS (spatial difference smoothing) 算法、HCM (hard C-means) 算法、色度自适应算法和亮度-色度自适应算法等^[1]。姜浩等论述了色域拓展技术及其硬件实现方案^[2-3],李彦、徐岩等论述了宽色域电视信号的相关内容^[4-7],Stacey E. Casella 研究了宽色域中色域拓展算法的评价等内容^[8]。对于基于印刷技术的颜色再现来讲,目标色域通常小于源色域。在印刷再现过程中,源色域通常是原稿或者图像捕捉设备的色域,例如数字原稿图像的色域或者显示设备、输入设备的色域,其色彩信号由 RGB 信号构成,以三原色加色法为基础再现原稿颜色。目标色域通常是由 CMYK 四色油墨以三原色减色法为基础,通过硬拷贝的方式再现原稿颜色。由于目标色域小于源色域或者二者部分色域不重叠,为不丢失源色域内的颜色信息,可通过选择适当的色域映射算法将源色域内的颜色映射到目标色域,通过多种方法拓展目标色域,以增加其所包含的颜色信息,提高目标色域与源色域的匹配程度。

本文针对高保真颜色再现的需要,通过多种方法来扩大色域,包括采用基于图像的色域映射算法,改善纸张表面性能并采用多种不同的数字印刷纸张,采用超过四色的多色印刷方式和采用变频调幅加网的印刷方式等,以期颜色在传递过程中达到最佳视觉效果。

1 色域拓展的方法

针对同一媒介或设备,其色域往往是固定的,要拓展色域,往往需要改变呈色方式、采用新的显色技术或者采用更多的原色油墨来实现。因此,本文将色域拓展的实现方法分为两大类,即软件方式和硬件方式。实现色域拓展的软件方式,主要集中在色域映射算法的研究上,比如在显示设备到显示设备的传递过程以及视频信号从 CRT 到 HDTV 的传输过程中,往往采用不同类型的色域映射算法,以优化图像色彩传输到目标色域的显示效果^[7, 9-10]。色域拓展的硬件实现方式主要是指在彩色印刷过程中,根据目标色域的实现

手段进行,主要包括:采用超过四色油墨的多色油墨印刷,即四色油墨+专色油墨的印刷方式,比如数字喷墨印刷和高保真彩色印刷;采用提高加网分辨率、改进加网模式、利用新型网点技术等可以拓展目标色域^[11-13];选用高性能印刷设备和印刷材料来实现高保真印刷等。

色域拓展可用如下模型表示:

$$GamutExtension = \begin{cases} f(a) + k_1, \\ g(p, i, s, d) + k_2, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(a) + k_1$ 表示基于软件的色域拓展方法,其中, a 表示基于软件方法中的算法, k_1 表示调整系数;

$g(p, i, s, d) + k_2$ 表示基于硬件的色域拓展方法,其中, p 表示纸张等承印物, i 表示油墨等呈色物质, s 表示加网方式, d 表示呈色设备, k_2 表示调整系数。

2 实验与讨论

2.1 实验设备及实验条件

本研究采用的输出设备为 Epson Stylus Pro7880C; 喷墨墨水为 Epson UltraChromeK3 VM; 显示设备为 EIZO ColorEdge CG211, Lenovo LXB-HF769A; 色彩管理软件为 ProfileMaker5.0.8; 数字化工作流程控制软件为 EFI; 采用 6 种数字印刷纸样,分别为 1# 仿铜纸, 2# 符合欧标的 180 g 定量纸, 3# 防水半亮面铜版打样纸, 4# 高光纸, 5# 哑光相纸, 6# 哑光打样纸; 色彩测量仪器为 X-Rite Eye-one io; 输出的标准色标采用 ECItic2002R CMYK, 观察条件为 D65/2°; 数据分析软件为 Matlab2008a 和 Excel2003。

2.2 基于图像-设备的色域映射

基于图像的色域映射是目前色域映射研究的热点,也是色域映射发展的主要趋势。本文以一种简单的数学模型为基础^[14],对如图 1 所示的 6 幅图像分别进行基于图像-设备和设备-设备的色域映射,并比较采用这 2 类映射方法所得的结果。

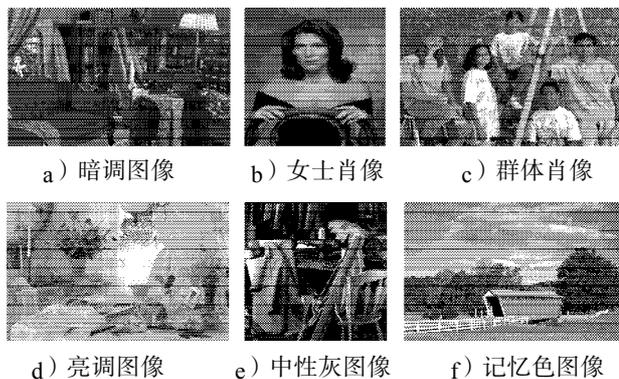


图 1 六幅原稿图像

Fig. 1 Six original images

基于图像的色域映射数学模型可描述如下:

亮度映射:

$$L_r = k_L \times L_o, \quad (2)$$

$$k_L = \frac{L_{rmax} - L_{rmin}}{L_{omax} - L_{omin}}$$

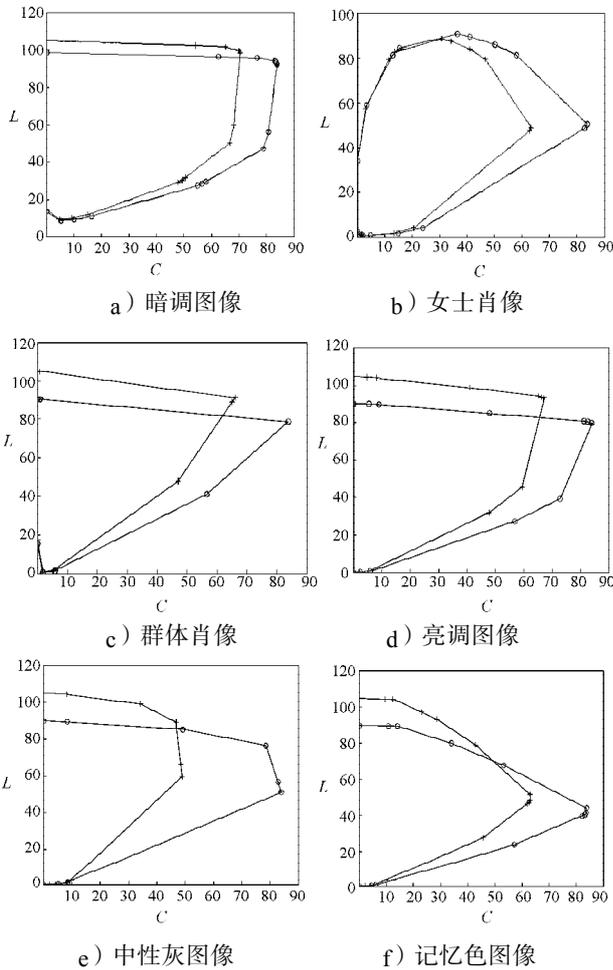
色度映射:

$$C_r = k_C \times C_o \times \left(\frac{C_o}{C_{omax}} \times (k_C - 1) + 2 - k_C \right), \quad (3)$$

$$k_C = \frac{C_{rmax}}{C_{rmin}}$$

式(2)和(3)中: r 表示目标, o 表示源; L 为亮度, C 为色度; L_{rmax} 和 L_{rmin} 分别为目标色域的最大亮度值和最小亮度值; L_{omax} 和 L_{omin} 分别为源色域的最大亮度值和最小亮度值。

图2所示为6幅原稿图像基于图像-设备和设备-设备的色域映射结果。



—+— 基于设备-设备的映射; —o— 基于图像-设备的映射

图2 6幅原稿图像的两映射方法比较
Fig. 2 Comparison of two mapping methods on six original image

从图2中可明显看出, 基于图像-设备的色域映射在同种输出方式条件下对于原稿色域的压缩较小, 即对于目标色域有了较好的拓展效果。其中, 在色度

方面的拓展效果要优于在亮度方面的拓展。

2.3 纸张对色域拓展的影响

纸张作为承印物, 对于颜色的再现起着重要的作用。本文用公式(4)表示纸张对于色域的影响:

$$P_{gamut} = f(r, g, a, w, o, p), \quad (4)$$

式中: P_{gamut} 为纸张对色域的影响, r 为粗糙度, g 为光泽度, a 为纸张对于油墨的吸收性, w 为纸张的白度, o 为纸张的不透明度, p 为纸张的孔隙率。

实验用纸张参数见表1。作为承印物的纸张, 再现颜色时, 受到式(4)中诸因素的综合影响。因此, 可用纸张与油墨作用后的色域图表征纸张对于色域的影响效果, 图3为不同纸张同种油墨获得的色域图。

表1 纸张参数表

Table 1 Paper parameters

纸样编号	粗糙度 / 光泽度 / 吸收性 / 白度 / 不透明度 / 孔隙率 / um	(°)	(G·m ⁻²)	%ISO	%	%
1#	2.78	49.87	49.995	118.47	98.31	37.81
2#	4.32	67.32	30.995	88.59	92.76	35.00
3#	2.78	65.37	35.260	110.04	93.49	40.46
4#	2.41	83.93	113.630	153.61	99.68	44.12
5#	2.53	69.07	29.190	145.50	92.27	39.92
6#	4.55	56.93	116.46	114.04	98.29	45.21

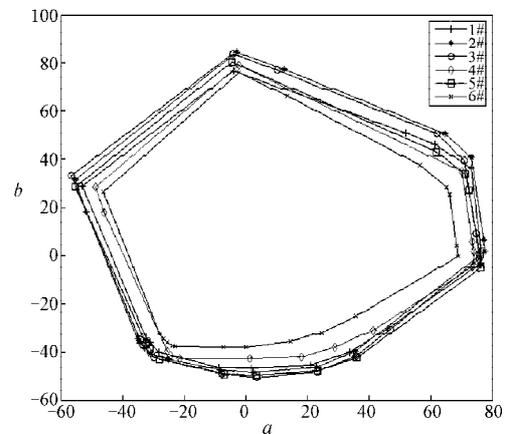


图3 6种纸样色域图

Fig. 3 Color gamuts of the six patterns

从图3可以发现, 6种纸样的色域形状基本相似, 仅色域大小有差别。其中, 2#和3#纸样的色域明显大于6#纸样的色域, 且2#和3#纸样的色域相近, 1#和5#纸样色域相近。

2.4 原色油墨对于色域拓展的影响

油墨是印刷过程中再现目标色域的主要元素。高保真彩色印刷要求油墨在保证印品有足够亮度的情况下扩大再现色域。因此, 在油墨的选择方面, 要适当选择油墨的纯度值 P_c 和亮度值 Y , 使它们的乘积 $P_c \cdot Y$ 为最大, 这样, 既满足了其有较高的亮度, 同时又具

有较高的饱和度。在数字喷墨印刷技术中,通常采用数种专色以提高颜色的饱和度和亮度,满足其色彩品质高保真再现的条件。本文使用Epson的8种专用墨水作为再现颜色的原色,1#-Photo Black,2#-Cyan,3#-Vivid Magenta,4#-Yellow,5#-Light Light Black,6#-Light Cyan,7#-Vivid Light Magenta,8#-Light Black,获得的目标色域图见图4。图4表明,适当地增加原油墨,在不改变加网方式等条件的情况下,可以更好地拓展目标色域的表现范围,有利于颜色的高保真再现。

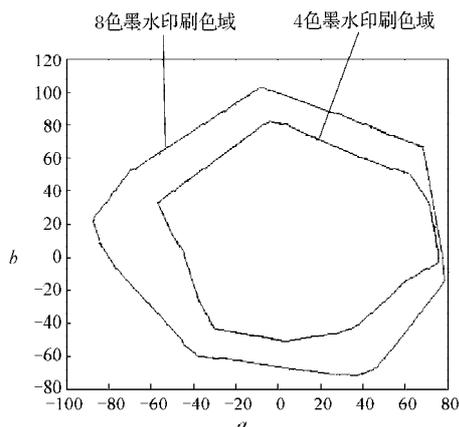


图4 四色油墨与八色油墨产生的色域

Fig. 4 The gamut of four-color ink and eight-color ink

2.5 新的加网方式对色域拓展的影响

图像加网是数字图像输出的核心技术,决定着图像颜色和层次再现的效果。利用改进的加网模式,可以实现超过4色(如6色或7色)的半色调图像输出,并且在叠合印刷中不会产生可视的龟纹。本文采用FCAM变频调幅加网方案^[15],在不改变现有的印刷工艺和设备的条件下,实现图像的高保真颜色再现,使再现的图像具有更广的再现色域,得到更加鲜艳逼真的图像传输效果^[16]。其实现过程可以描述为:对不同的网目调图像,仍然采用调幅加网技术,通过改变不同网目调图像的加网线数,在较小的加网角度下(有时是在相同加网角度下),实现网目图像叠合。在FCAM加网实验方案中,笔者采用CMYK4色和3个专色实现目标色域,其加网线数和加网角度如下:

对CMYK4色油墨采用225LPI作为基本的加网频率,加网角度分别为 $\theta_Y(0^\circ)$, $\theta_M(15^\circ)$, $\theta_C(75^\circ)$ 和 $\theta_K(45^\circ)$;对于3个专色,其加网频率为133LPI,加网角度分别为spot1(15°),spot2(75°)和spot3(45°)。

在4色+3专色的7色高保真彩色印刷中,采用了FCAM的加网方式,特别是对3个专色的加网,可以明显扩展色域范围(见图5),并且能够有效地避免调幅加网中龟纹对人眼的影响,能达到更为满意的颜色再现^[13-16]。

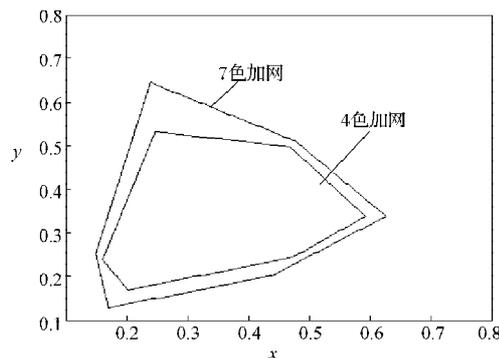


图5 7色加网与4色加网产生的目标色域

Fig. 5 Destination gamuts of seven and four color screening

2.6 其他方式对色域拓展的影响

在基于ICC色彩管理的数字印刷工作流程中,采用不同的色域映射方法将源色域映射到目标色域时,在使用同样的承印物和呈色介质时,得到的目标色域大小不同。如图6,黄线(即曲线1)是利用Profile Maker5.0.8中的LOGO Classic色域映射方式得到的色域1,红线(曲线2)是利用LOGO Colorful色域映射方式得到的色域2。通过比较发现,色域1在黄绿色区域(象限2)的面积上比色域2的更宽一些,有助于更加逼真地再现该区域内的颜色细节。

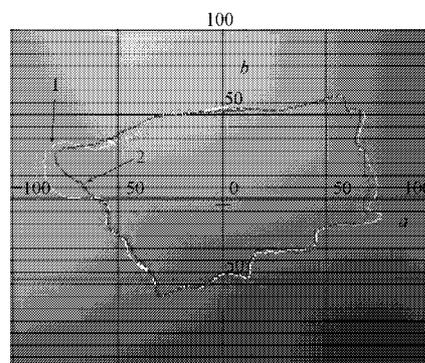


图6 不同映射算法描述的目标色域

Fig. 6 Color gamut described by different mapping algorithms

3 结论

本文针对高保真颜色再现的需要,研究了多种扩大目标色域的方法,可将这些方法分为硬件方法和软件方法,提出了影响目标色域拓展的因素,并对这些因素进行了实验分析。实验结果表明,采用软件方法和采用硬件方法对色域拓展的机理和效果并不相同。由此可以根据高保真颜色再现的具体要求采用不同的方法拓展目标色域。

对于基于新的显示技术的色域拓展,通过新的映射算法,能够实现色彩在不同标准下的转换,并能够

充分利用目标色域的全部色彩空间;对于基于高保真数字印刷输出的色域拓展,可采用纸张、油墨、加网方式和设备等的综合方法,提高颜色再现的效果。本文的研究结果有助于实现高保真颜色的再现,扩大目标色域,并有助于进一步研究色域拓展的新方法,使颜色在传递过程中达到最佳的视觉效果。

参考文献:

- [1] Justin Laird, Remco Muijs, Jiangtao Kuang. Development and Evaluation of Gamut Extension Algorithms[J]. *Color Research and Application*, 2009, 34(6): 443-451.
- [2] 朱磊. 色域扩展技术的研究与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Zhu Lei. Design and Implementation of Gamut Extension Techniques[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2008.
- [3] 姜浩. 色域扩展算法研究及硬件实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Jiang Hao. Research on the Gamut Extension Algorithm and Hardware Implementation[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2007.
- [4] 李彦, 徐岩, 李桂苓. 宽色域HDTV信号兼容传输方案研究[J]. *电视技术*, 2009, 33(12): 45-48.
Li Yan, Xu Yan, Li Guiling. Research on Compatible Transmission Schemes of Extended Gamut HDTV Signals[J]. *Video Engineering*, 2009, 33(12): 45-48.
- [5] 李桂苓, 徐岩, 李彦. 宽色域电视及其标准[J]. *信息技术与标准化*, 2008(11): 20-22.
Li Guiling, Xu Yan, Li Yan. Wide Gamut TV System and Standards[J]. *Information Technology & Standardization*, 2008(11): 20-22.
- [6] 徐岩, 李彦, 安永成, 等. 宽色域视频标准ITU-R BT.1361与IEC 61966-2-4的分析和比较[J]. *电视技术*, 2009, 33(3): 92-94.
Xu Yan, Li Yan, An Yongcheng, et al. Analysis and Comparison of Extended Color Gamut for Video System in ITU-R BT.1361 and IEC 61966-2-4[J]. *Video Engineering*, 2009, 33(3): 92-94.
- [7] 张留朝. 宽色域自适应LED背光源研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
Zhang Liuchao. The Research of Wide Color Gamut and Self-Adjusting LED Backlight[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [8] Stacey E Casella. Gamut Extension Algorithm Development and Evaluation for the Mapping of Standard Image Content to Wide-Gamut Displays[D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2009.
- [9] 安永成, 徐岩. ITU-R BT.1361建议书简介[J]. *电视技术*, 2009, 33(10): 96-97.
An Yongcheng, Xu Yan. The Proposal Introduction of ITU-R BT.1361 [J]. *Video Engineering*, 2009, 33(10): 96-97.
- [10] 刘转果. 宽色域TV型AMOLED显示器的系统设计[J]. *显示器件技术*, 2009(4): 37-47.
Liu Zhuanguo. System Design of AMOLED Display of Wide Gamut TV[J]. *Technology of Display Device*, 2009(4): 37-47.
- [11] Chen Guangxue, Li Xiaozhou. Study on Original Image Gamut and Gamut Mapping Adaptability in Digital Printing[C]//31st International Congress of Imaging Science. USA: IS&T, 2010: 184-188.
- [12] Tai Jinglei, Chen Guangxue, Chen Qifeng, et al. Influence of Coating Paper Properties on Sharpness of Ink-Jet Printing Image[C]//31st International Congress of Imaging Science. USA: IS&T, 2010: 264-267.
- [13] Chen Qifeng, Chen Guangxue, Tang Baoling, et al. Droplets Infiltrating and Diffusing in the Substrate in Inkjet Imaging System[C]//31st International Congress of Imaging Science. USA: IS&T, 2010: 313-316.
- [14] Chen Guangxue, Chen Qifeng, Tang Baoling, et al. Halftoning Method and Reproduction of Color Gamut in Digital Image Output[C]//31st International Congress of Imaging Science. USA: IS&T, 2010: 289-292.
- [15] Chen Guangxue, Chen Qifeng. Study on the Phenomena of Moire Fringe in Digital Halftoning[C]//NIP 25th and Digital Fabrication 2009. USA: IS&T, 2009: 334-336.
- [16] 胡更生. 高保真彩色印刷的色域分析[J]. *广东印刷*, 1997(4): 14-17.
Hu Gengsheng. Analysis of the Gamut of High-Fidelity Color Printing[J]. *Guangdong Printing*, 1997(4): 14-17.

(责任编辑: 廖友媛)