

基于胞元式 RBF 神经网络的高保真分色模型研究

孙小鹏¹, 孔玲君^{1,2}, 刘真¹

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: 采用胞元式 RBF 神经网络模型对七色印刷输出系统构建了分色模型。首先, 借鉴颜色空间分区理论将 7 个主色在整个颜色空间中划分为 6 个颜色区域, 在每个分区中选取了 CIE $L^*a^*b^*$ 明度值 L 上等间隔均匀采样的网点面积率, 用于设计建模所需的训练样本, 然后对每个分区划分胞元, 并且为每个小胞元建立了基于 RBF 神经网络的分色模型。对于任意给定的要复制的目标色, 利用提出的胞元搜索算法确定其所在的胞元位置后, 使用相应的神经网络模型进行分色预测。实验结果表明, 该分色算法能够达到较高的分色精度, 可以满足高质量彩色复制的要求。

关键词: 七色分色模型; 高保真印刷; 分区; 胞元; RBF 神经网络

中图分类号: TS801.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)01-0110-05

Research of Hi-Fi Color Separation Model Based on Cellular RBF Neural Network

SUN Xiao-peng¹, KONG Ling-jun^{1,2}, LIU Zhen¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract: Color separation models for seven-color printing system were established using cellular RBF neural network. Firstly, according to color space partition theory, the color space of the printing system was divided into 6 partitions by 7 primary colors. Dot areas, which were sampled from L of CIE $L^*a^*b^*$ with equal space, were then selected as training samples of RBF neural network model in each partition. Each partition was subdivided into several cells and the color separation algorithm based on RBF neural network model for each cell was established. Any target color would be separated into the CMYKRGB dot areas according to the color separation models of the numbered cell which were determined by the cell search algorithm proposed. The experiment result showed that the color separation algorithm can achieve high accuracy of color separation for seven-color print production.

Key words: seven-color separation model; Hi-Fi color printing; partition; cell; RBF neural network

高保真彩色印刷以增加 OG(橙色、绿色)或 RGB(红色、绿色、蓝色)等专色为手段扩大印刷色域,使用的印刷主色由常规的 CMYK 四色增加到 6 色、7 色或更多色,能够有效解决常规四色印刷尚不能完全再现彩色原稿颜色的问题。实现多色高保真印刷的关键技术是分色,即如何将原稿中的颜色正确分解为多个印刷主色分量,以保证最大限度的颜色再现。在现有的相关研究文献中,史瑞芝^[1]等人提出了基于颜色分区理论的多色分色方案,基于任意色三色表色原理对

给定颜色进行色域空间位置划分,建立一种基于传统 Neugebauer 方程算法原理的 7 色印刷颜色分色模型。郭晋一^[2]等人提出通过胞元式光谱 Neugebauer 方程建立六色分色模型,该方法以光谱反射率作为颜色的量化值,通过划分胞元并对每个胞元采用 Neugebauer 方程建立分色模型,能够达到比较高的分色精度。

同时,随着对神经网络模型研究的不断深入,以及神经网络算法本身所具有的高度非线性拟合特性,很多学者将其应用于不同颜色空间之间的转换研究。

收稿日期: 2012-08-20

基金项目: 上海市科委项目(09220502700); 国家新闻出版总署数字印刷工程研究中心开放基金项目

作者简介: 孙小鹏(1991-),男,河南洛阳人,上海理工大学硕士生,主攻色彩再现与图文信息处理等。

智川^[3]等人提出了基于 RBF 神经网络的 RGB 颜色空间与 $L^*a^*b^*$ 颜色空间之间的相互转换,体现了神经网络模型在解决非线性空间转换问题上的优势。

笔者以青(C)、品(M)、黄(Y)、黑(K)、红(R)、绿(G)和蓝(B)为基本色构建 7 色印刷分色模型。借鉴文献 1 中的分区理论,在此基础上对每个分区按等间隔划分胞元,然后对每个胞元单独训练神经网络模型,进而建立 7 色高保真印刷的分色算法模型。实验结果表明,该算法能够达到较高的分色精度,满足高质量彩色印刷复制的要求。

1 分色原理及其算法实现

1.1 分色算法创建流程

创建的高保真分色算法模型建立在分区理论^[1]的基础上,首先把一个七色印刷分色模型划分为 6 个三色印刷分色模型。然后,通过对每个分区的胞元划分,并基于 RBF 神经网络模型为每个小胞元创建分色模型。因此,所提出的基于胞元式 RBF 神经网络的高保真分色模型是一组三色印刷分色模型的集合。提出的分色算法创建的处理流程见图 1。

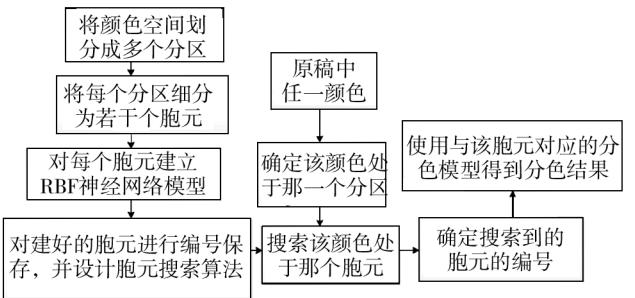


图 1 分色算法的流程

Fig. 1 Flow-chart of the color separation algorithm

1.2 分区基本思想

分区的基本原理见图 2,由 7 个基本色组成的高保真复制系统的整个颜色空间可划分为 6 个颜色区域,各区域中的颜色分别由 RYK, YGK, GCK, CBK, BMK, MRK 基本色混合得到。原稿中任意一种颜色,都可以由 2 种基本色和黑色混合得到^[1]。其中,2 种基本色的组成比例决定了该颜色的色相,而黑色的比例则决定了该颜色的亮度。根据以上原理,对于原稿中的任意一个颜色,首先判断该颜色在颜色空间中的位置,以此确定其落在由哪 3 个基本色组成的分区中。若不在输出设备的色域范围之内,即出现超色域

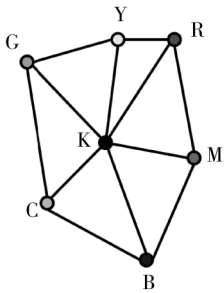


图 2 7 种基色的分区

Fig. 2 Subareas of seven primary colors

的情况时,要进行相应的色域映射。确定 3 个基本色后,再根据在该分区内构建的分色算法模型求出已知颜色所对应的各分色的墨量。

1.3 胞元划分及其搜索算法

胞元划分的基本思想就是将颜色空间采用等间距或不等间距的方式划分成多个小胞元,然后对每一个小胞元分别建立模型进行分色预测。以 BMK 分区为例,在 BMK 3 种基色组成的颜色空间里,在 B, M, K 方向上等间距划分胞元,并为每个胞元依次编号。BMK 分区中等间隔划分胞元后的第一个胞元见图 3。

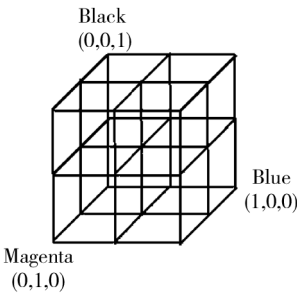


图 3 BMK 分区中一个胞元的模拟

Fig. 3 A mimic cell in the BMK partition

胞元中所有样本的颜色信息都需要事先测量获得,用作后续创建分色模型时所需的训练样本。

对于任意一组给定的 CIE $L^*a^*b^*$ 颜色值,利用创建的分色模型可计算得到一组与之对应的各基色网点面积率值,但在预测计算之前需要先确定该颜色所在的胞元位置。

对于一个任意给定的要复制的目标色,在胞元数目较多的情况下,如何快速定位目标色所在的胞元位置是分色模型研究中需要解决的一个关键问题。文中提出的胞元搜索算法基于目标色 CIE $L^*a^*b^*$ 与各胞元 CIE $L^*a^*b^*$ 值范围的遍历比较后,确定其所在

的胞元编号。其基本方法为:在胞元划分并编号结束后,记录下每个胞元中 8 个顶点处样本的 CIE $L^*a^*b^*$ 值以及整个胞元的 CIE $L^*a^*b^*$ 值的范围;对于任意一个给定的要复制的目标色,先判断该颜色的 CIE $L^*a^*b^*$ 值位于哪些胞元的 CIE $L^*a^*b^*$ 范围内,如果该颜色值只位于一个胞元中,那么该胞元就是搜索的目标胞元,分色时就采用该胞元对应的神经网络分色模型。如果目标色的 CIE $L^*a^*b^*$ 值落在多个胞元的 CIE $L^*a^*b^*$ 范围内,则需要分别计算该目标色与每个胞元的 8 个顶点颜色的色差之和,并取色差和最小的胞元作为目标胞元,然后再利用该胞元对应的神经网络分色模型进行预测。

1.4 基于 RBF 神经网络创建分色算法

神经网络方法在解决非线性系统建模问题上具有很多优势,目前已有的基于神经网络的分色算法大多数利用 BP 网络来实现^[4]。但由于 BP 神经网络权值和阈值的调节采用负梯度下降的方法,这种权值和阈值的调节方法收敛速度慢,并且容易陷入局部极小,为了克服这些缺点,必需寻找其它的神经网络模型^[5]。

径向基函数(RBF)神经网络的网络结构见图 4^[4]。与 BP 神经网络相比,RBF 神经网络学习速度

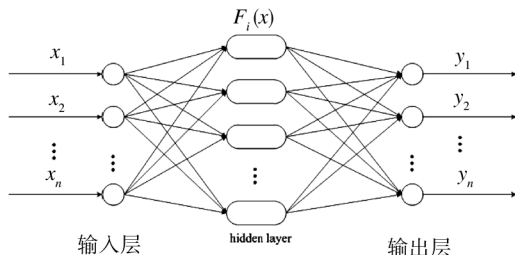


图 4 RBF 网络结构

Fig. 4 The structure of RBF neural network

可以比通常的 BP 神经网络高,容易适应新数据,且具有更好的泛化能力。鉴于这些优点,选择 RBF 神经网络建立分色模型。

在研究中,RBF 神经网络的输入层为某一颜色的 CIE $L^*a^*b^*$ 值,输出层为该颜色对应的三个基本色的网点面积率值。基于这一原理,根据胞元顶点位置上各颜色的网点面积率与测量得到的 CIE $L^*a^*b^*$ 值,建立基于 RBF 神经网络的分色算法,为 6 个分区中的每个小胞元创建一个神经网络分色模型。由于每个胞元含有 27 个颜色样本,因此建立神经网络分

色模型时的训练样本数可达到 27 组。

2 实验与分析

2.1 实验样本及数据采集

采用惠普 Designjet Z3200 Photo 彩色喷墨打印机作为实验研究对象。该喷墨打印机配置 CMYKRGB 7 个基本色的惠普 VIVERA 墨水,并通过 EFI Colorproof XF 软件驱动打印、色彩管理与墨量控制。实验研究选用 EasiColor 顶级半亮面打样纸作为承印物,颜色测量仪器选用 X-Rite Eye-one IO 分光光度计。

为了保证选取实验样本阶调分布的均匀性,在选取实验用训练样本前首先绘制了阶调响应曲线,即打印系统墨量驱动值与 CIE 明度值 L 之间的关系。在研究打印系统的阶调响应特性过程中,每一种基色墨水均从 0(无墨)到 100(最大墨量),以 5% 为间隔选取 21 个等级的网点面积率,并通过单通道控制输出各个基本色的不同阶调色块,见图 5。

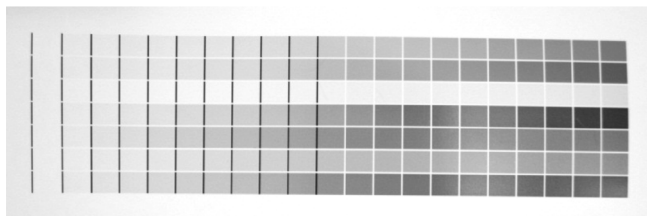


图 5 单通道墨量控制打印图

Fig. 5 Figure of single channel ink control printing

使用 Eye-one IO 测量得到 CMYKRGB 各基色的 21 个等级的输出色块的明度值 L ,得到各基色的阶调响应特性曲线,见图 6,从图中看出,可见墨量与明度值 L 呈非线性关系。

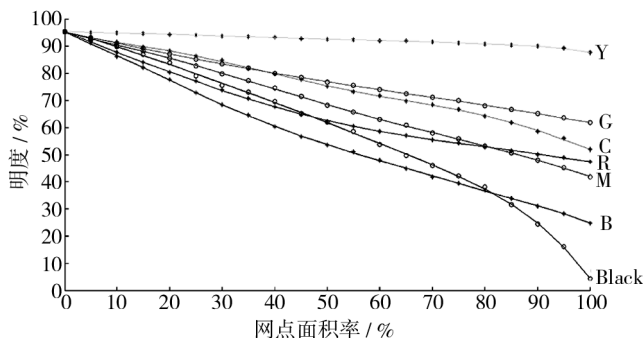


图 6 CMYKRGB 七基色的阶调响应特性曲线

Fig. 6 The tone reproduction curve of seven primary colors (CMYKRGB)

然后,根据阶调响应曲线,在 7 个通道所涵盖的明度值 L 区间上等间隔采样选取 10 个等级,并映射得到每个等级所对应的 CMYKRGB 的网点面积率量化值(见表 1),用于设计和创建分色模型时所需的训练样本^[7]。

表 1 训练样本所选用的 7 种基色的网点面积率等级
Tab.1 The grade of seven primary colors'
dot area selected by training samples

等级	C	M	Y	K	R	G	B
0	100.00	100.00	99.99	100.00	99.94	100.00	100.00
1	93.99	91.51	100.00	95.83	82.43	89.58	88.56
2	87.38	81.35	96.19	91.54	65.19	78.88	75.94
3	78.48	70.46	88.93	85.06	51.67	67.25	63.12
4	67.05	59.71	81.94	76.26	41.72	55.44	51.12
5	54.85	49.70	70.71	65.65	33.81	44.29	40.59
6	43.95	40.46	56.39	53.84	26.54	34.17	31.58
7	34.70	31.43	42.71	41.42	19.37	24.94	23.61
8	24.93	21.70	30.28	28.83	12.60	16.27	15.95
9	12.11	10.78	15.28	15.78	6.56	7.95	8.05
10	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09

由于实验采用分区建模,且每种基色按明度作 10 等分,即每种基色选取 11 个等级的网点面积率用于创建分色模型时的训练样本,一个分区有 1331 个色块,打印输出后使用 Eye-one IO 测量所用打印样本的 CIE $L^*a^*b^*$ 色度值,作为该分区构建胞元式神经网络模型的初始训练样本。BMK 分区训练样本的实物见图 7。

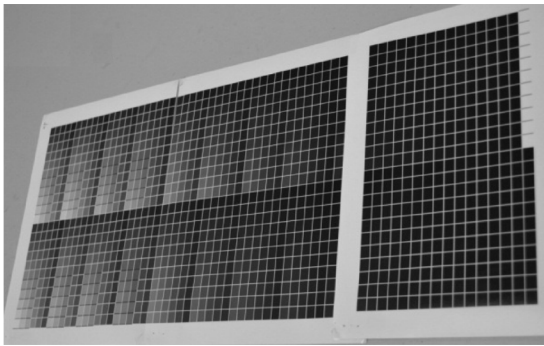


图 7 BMK 分区训练样本实物

Fig.7 The picture of training samples in the BMK partition

另一方面,还需要设计另外一组用于检验模型转换精度的样本,为了保证检验样本能够覆盖尽可能大的色域,而又不失一般性,每个分区中对每一种基色从 0(无墨)到 100(最大墨量)以 25 为间隔选取 5 个

等级的网点面积率,组合得到检验样本,对于一个分区而言,有 125 个色块作为该分区分色模型的检验样本。

2.2 胞元式 RBF 神经网络分色模型的创建与使用

由于 6 个分区的建模方法相同,这里只以 BMK 分区为例阐述创建分色模型的具体过程:

- 1) 根据 1.3 中所描述的胞元划分方法,实验将每一种基色都等间距划分为 5 个等级,对于一个分区而言,其颜色空间可划分为 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 个胞元。
- 2) 为每个胞元分别建立基于 RBF 神经网络的分色模型:每个胞元中有 27 组数据用作训练样本,而且该神经网络的输入和输出都是三维向量。分色模型的创建基于 Matlab 软件编程实现。使用 Matlab 开展 RBF 神经网络建模时最重要的是确定 Spread 值,即 RBF 函数的分布系数。Spread 值越大,网络的逼近过程就越平滑,仿真数据与测试数据的逼近程度越好,但网络的逼近误差会比较大。Spread 值越小,网络的逼近误差也越小,但网络中大量的神经元需要适应缓慢变化的函数,会造成网络的收敛速度很慢,泛化能力较弱。因此,需要对创建的 RBF 神经网络反复训练,以找到最佳的 Spread 值。经过反复训练对比,本实验建立神经网络模型时的 Spread 值取 12,训练效果最好。

- 3) 将创建好的神经网络分色模型按胞元编号后存储,便于搜索和调用。
- 4) 根据 1.3 中所述的胞元搜索算法,编写胞元搜索函数。对于任意给定的要复制的目标色,先通过该胞元搜索函数确定其所在的胞元编号,然后调用与该胞元编号对应的神经网络分色模型进行预测,得到一组网点面积率值,完成分色。

2.3 分色模型的验证与评价

根据选取的检验色块,对已建立好的分色模型利用 Eab 色差进行验证和评价。首先利用 Eye-one IO 测量得到各检验色块的 CIE $L^*a^*b^*$ 值,然后使用胞元搜索算法确定胞元编号并使用相应的分色模型进行分色预测,得到一组网点面积率值,并根据该网点面积率值再次制作检验色块并打印输出,测量该色块的 CIE $L^*a^*b^*$ 值,并与原检验色块的 CIE $L^*a^*b^*$ 值比较后计算色差。6 个分区的检验样本的色差分布情况见图 8,6 个分区检验色块的最大色差、最小色差以及平均色差见表 2。

从图 7 可以看出,各分区 125 个检验样本的分色

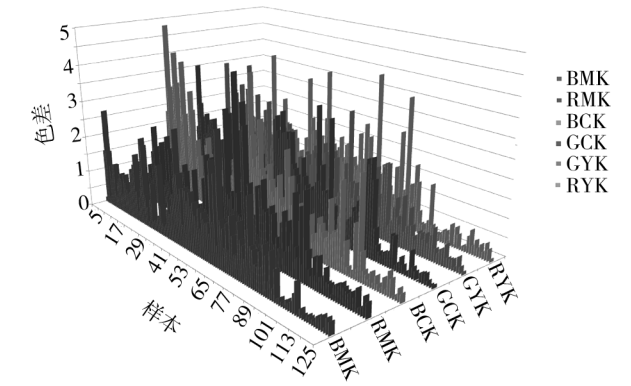


图8 6个分区检验样本的色差分布

Fig. 8 The distribution of color difference of the tested samples in the six partitions

表2 6个分区检验样本的色差

Tab. 2 The color difference of

the tested samples in the six partitions

色差	BMK	RMK	BCK	GCK	GYK	RYK
Max ΔE_{ab}^*	3.439	4.451	4.821	3.541	3.589	3.922
Min ΔE_{ab}^*	0.064	0.153	0.085	0.037	0.088	0.054
Mean ΔE_{ab}^*	0.951	1.069	1.232	1.239	1.271	1.047

误差分布基本上都在2个色差单位以下,只有少数检验样本的分色误差相对较大。同时,从表2可以看出,6个分区中所有检验色块的分色误差的平均值都在1.3个色差单位以下。根据图像阈值相关领域的研究结果,2.2个CIE L*a*b*色差单位可被作为判别人眼视觉分辨两幅图像色彩差异的阈值,即当两幅图像的平均CIE L*a*b*色差小于2.2时,人眼将不能分辨它们之间的色彩差异。考虑到彩色喷墨打印系统的主要应用于彩色图像的硬拷贝输出复制,上述标准可作为评价打印系统特征化模型精度优劣及可接受度的指标。由此可见,研究的基于胞元式RBF神经网络创建高保真印刷分色算法已达到较高的分色精度,可满足图像阈值平均CIE L*a*b*色差小于2.2个色差单位的要求,具有较好的实际应用价值。

3 结论

提出的基于胞元式RBF神经网络模型的高保真分色模型是一组三色印刷分色模型的算法集合,通过对整个颜色空间进行分区并划分胞元后,为每个小胞元建立RBF神经网络分色模型及其胞元搜索算法。

实验结果表明,在不排除系统误差以及测量误差的情况下,该算法能够达到较高的分色精度,满足印刷复制对色差的要求,具有一定的可行性和应用价值。另一方面,考虑到胞元划分是等间距有规律划分的,这种划分方法具有一定的局限性,今后可以从动态自适应划分胞元以及实现更加快速有效的胞元搜索算法的角度开展进一步研究,以达到提高分色效率和分色精度的目的。

参考文献:

[1] 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 Rui-zhi, CAO Zhao-hui. A Color Separation Model Based on 7-color Hi-Fi Press[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 58-60.

[2] GUO J, XU H, LUO M R. Novel Spectral Characterization Method for Color Printer Based on the Cellular Neugebauer Model[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1106-1109.

[3] 智川. 关于颜色空间转换的RBF网络动态子空间自动划分辨识方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 105-107.
ZHI Chuan. On Automatic Division and Identification Method of Dynamic Sub-space of RBF Network for Color Space Conversion[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(1): 105-107.

[4] 熊康鹏,成刚虎. BP神经网络在颜色空间转换中的应用[J]. 中国印刷与包装研究, 2009, 1(6): 16-19.
XIONG Kang-peng, CHENG Gang-hu. Application of the BP Neural Network in Color Space Conversion[J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 1(6): 16-19.

[5] LI Xin-wu. A New Color Correction Model for Based on BP Neural Network[J]. Advanced in Information Sciences and Service Sciences, 2011, 3(5): 72-79.

[6] 张群. 基于RBF神经网络的色空间转换模型[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 71-73.
ZHANG Qun. Color Space Conversion Model Based on RBF Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 71-73.

[7] 郭晋一. 基于光谱匹配法Neugebauer方程的彩色打印系统特征化模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
GUO Jin-yi. Developing the Characterization Model of Color Printing System Using Spectral-based Neugebauer Equations [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.