

文章编号:1007-2780(2009)03-0438-05

基于 ICC 标准的 CRT 色空间转换方法的研究与比较

许宝卉^{1,2}, 李 言¹

(1. 西安理工大学 机械仪表学院, 陕西 西安 710048; 2. 运城学院 机电系, 山西 运城 044000)

摘 要: 分别采用阶调矩阵模型、多项式拟合、三维查找表和神经网络方法, 建立 CRT 显示器设备颜色空间 RGB 与设备无关色空间的非线性对应关系, 完成设备颜色显示的特征化。对两个常用的显示器进行了实验, 并进行色差分析, 比较了几种方法的精确度。对常用显示器的特征化实验结果表明: 阶调矩阵模型色差居中, 多项式拟合的方法精度较低, 三维查找表和神经网络技术可以满足精度要求, 其中神经网络方法最具优势。

关 键 词: 阶调矩阵模型; 多项式拟合; 三维查找表; 神经网络; 色差
中图分类号: O432.3 **文献标识码:** A

1 引 言

彩色显示器是用来传达颜色信息的重要工具, 遵循的是加色法呈色原理的 RGB 空间。但是由于制造显示屏的厂家很多, 不同品牌、不同型号显示器质量和性能不同, 所以表现出来的色彩无法统一, 加上使用者自行调校后, 更是没有一致的标准。为了减少色彩在不同设备和系统上的差异, 很有必要建立一个色彩管理系统。为此国际彩色联盟 ICC (International Color Consortium), 制定了色彩管理的标准, 即 ICC Profile Format Specification, 用以支持开放式的、跨平台的 CMS 的标准化。ICC 标准化有 3 个步骤: 设备校准、特征化和色空间转换。色空间转换的精度直接影响到色彩的复制效果, 因此色彩转换的方法一直是色彩工作者研究的重点。

本文对彩色 CRT 的色彩特性进行了基于 ICC 标准的研究, 主要内容为: 对彩色 CRT 的 ICC Profile 文件的结构分析; 彩色 CRT 色彩特性的检测; 基于矩阵模型、多项式拟合、三维查表模型以及神经网络模型的 CRT Profile 文件的建立及实验结果分析。本文的研究为建立显示器的色彩管理系统提供了依据^[1]。

2 显示器色彩数据检测^[2]

2.1 测试仪器及校准

实验中使用的彩色 CRT 显示器为神舟纯平

显示器(型号 786N)和联想 38 cm 彩色显示器(型号 LXB-N15054)。采用 X-Rite(爱色丽) Color Monitor Optimizer、Monaco Optix 屏幕色度测量仪对显示器进行测试。辅助测量图像处理软件为 Photoshop 7.0、Colorshop 2.5 和 Colorshop X。

测量前用 Photoshop 中 Adobe Gamma 工具将显示器调到一个固定状态, 其中色温为 D_{65} , 用标准黑板对爱色丽测色仪标定一次, 并对显示器、测色仪进行 30 min 的预热, 使它们进入稳定的工作状态。

2.2 实验数据方案的选择

(1) 用 C++ 程序编写产生色块, 要求每隔 32 为一个级差, 在暗调和亮调部分各加一级 16 和 240, 这样就将 0~255 非均匀地分成 11 个等级, R、G、B 三基色的不同组合共有 $11 \times 11 \times 11 = 1\,331$ 个色块。

(2) 使用爱色丽测色仪测量并记录各个色块的 RGB 驱动值、Lab 值、XYZ 值以及在爱色丽 ICC 管理下 RGB 测量值。

3 显示器 ICC Profile 文件结构分析^[3]

3.1 ICC Profile 文件的一般结构分析

ICC 标准规定设备特征描述文件的格式如图 1 所示, 由特征描述文件头、标签表及标签元素数据组成。

文件头 128 个字节, 包括 Profile 文件大小、

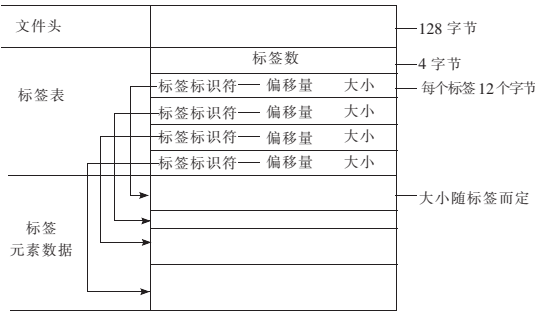


图 1 ICC Profile 文件结构
Fig. 1 Structure of ICC Profile

版本号、Profile 文件类别、色彩空间和色彩匹配方式等。接下来是标签表中标签元素的个数。标签表中每个标签的说明占 12 个字节,由 3 个部分组成:标签标识符、标签元素数据存放位置及标签元素数据长度。标签元素数据部分记录各个标签中的数据。

3.2 基于矩阵模型的显示器 Profile 文件

建立矩阵模型的 ICC Profile 文件,第一步是要形成 3 个标签所描述的红、绿、蓝各通道的阶调复制曲线;其次,要完成 3×3 矩阵系数的建立,实质上是要建立红、绿、蓝 3 个通道的数字驱动值 RGB 与其对应的亮度值 XYZ 之间的对照表。

彩色显示器的阶调曲线是描述显示器 RGB 数字驱动值 $D_i(i=r,g,b)$ 与输出亮度 $Y_i(i=r,g,b)$ 的关系函数,称为 Gamma 校正。它的一般表达式为:

$$Y_i = K_i D_i^{\gamma_i} \tag{1}$$

阶调曲线的求解就是要确立式(1)中的 K_i 与 γ_i 的值,将方程两边取对数变换为:

$$\lg Y_i = \gamma_i \lg(D_i) + \lg(K_i) \tag{2}$$

式(2)可以认为是数字输入值的对数 $\lg(D_i)$ 与其亮度输出值的对数 $\lg(Y_i)$ 间的线性关系表达式,而 γ_i 、 $\lg(K_i)$ 就是线性方程的系数。为了求解这个线性方程,我们采用最小二乘法对实验数据进行线性回归分析,利用实验数据得到显示器的特征函数为^[4]:

$$Y_r = 0.0065 \times D_r^{1.4058} \tag{3}$$

$$Y_g = 0.0027 \times D_g^{1.8365} \tag{4}$$

$$Y_b = 0.0385 \times D_b^{0.9927} \tag{5}$$

然后将三通道的 RGB 值通过一个 3×3 的矩阵转换成 PCS 空间中的 XYZ 值。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_r \\ Y_g \\ Y_b \end{bmatrix} \tag{6}$$

模型转换结果误差 ΔE 范围较大,在 4~6 之间。

3.3 多项式拟合方法

多项式拟合法即由多项式来表示 RGB 与 XYZ 之间的关系。三次(非线性)多项式关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T = A_{3 \times 19} \begin{bmatrix} R & G & B & R^2 & G^2 & B^2 & RG & RB & GB & R^3 & G^3 & B^3 & R^2G & R^2B & G^2R & G^2B & B^2R & B^2G & RGB \end{bmatrix}^T. \tag{7}$$

有时也加上常数项,高阶多项式关系即为增加 RGB 的高次项^[5]。

分别对两台显示器进行色空间变换 $XYZ=f_1(RGB)$ 及 $RGB=f_2(XYZ)$, f_1 和 f_2 均由 3 次 19 项和 4 次 34 项多项式拟合。实验结果如表 1 所示。

表 1 多项式拟合的色差

Table 1 Color aberration of multinomial fitting				
多项式	显示器 No. 1			
	RGB→XYZ		XYZ→RGB	
	ΔE	$\Delta E_{\max}$	ΔE	$\Delta E_{\max}$
三次 19 项	7.587 2	27.531 3	8.526 8	37.728 9
四次 34 项	5.590 9	25.721 7	6.350 8	38.106 9
多项式	显示器 No. 2			
	RGB→XYZ		XYZ→RGB	
	ΔE	$\Delta E_{\max}$	ΔE	$\Delta E_{\max}$
三次 19 项	8.092 1	46.587 3	4.616 9	40.630 7
四次 34 项	5.328 1	38.695 4	3.491 3	32.770 8

3.4 基于三维查表模型的显示器 Profile 文件

将测量所得的色块的 Lab 值读入数组 p[11][11][11]中,建立 RGB 值与 Lab 值相对应的 LUT 表。任给一个 RGB 值,根据它确定这个点在色空间中的哪一个立方体中,并确定这个立方体 8 个顶点的 RGB 值及 Lab 值,然后利用插值公式(8)和公式(9)进行计算。

三维几何体插值方法有多种,三棱柱(Prism)插值是其中的一种。插值计算时,首先要确定待测点在色空间的位置,即它在十一级区域的哪个立方体当中,进而再把该立方体切割为两个三棱

柱,确定该待测点在哪一个棱柱当中,然后选用相应的公式进行插值计算^[6]。

待测点在棱柱 1(Prism1)中,则插值公式为:

$$p(x,y,z) = P_{000} + (p_{100} - p_{000})\Delta x/(x_1 - x_0) + (p_{110} - p_{100})\Delta y/(y_1 - y_0) + (p_{001} - p_{000})\Delta z/(z_1 - z_0) + (p_{101} - p_{001} - p_{100} + p_{000})\Delta x\Delta z/[(x_1 - x_0)(z_1 - z_0)] \quad (8)$$

待测点在棱柱 2(Prism2)中,插值公式为:

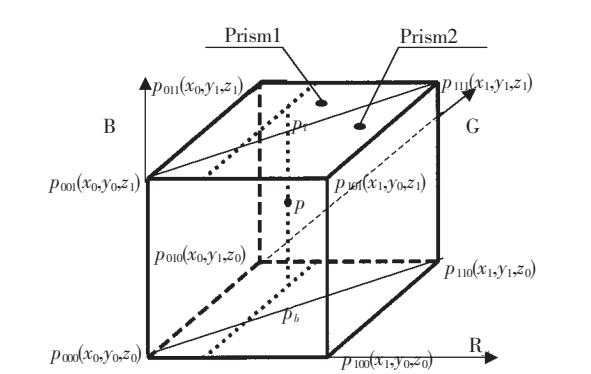
$$p(x,y,z) = P_{000} + (p_{110} - p_{010})\Delta x/(x_1 - x_0) + (p_{010} - p_{000})\Delta y/(y_1 - y_0) + (p_{001} - p_{000})\Delta z/(z_1 - z_0) + (p_{111} - p_{011} - p_{110} + p_{010})\Delta x\Delta z/[(x_1 - x_0)(z_1 - z_0)] + (p_{011} - P_{001} - P_{010} + P_{100})\Delta y\Delta z/[(y_1 - y_0)(z_1 - z_0)] \quad (9)$$


图 2 三维插值的立体图
Fig. 2 3D diagram of insert-value

3.5 BP 神经网络法

人工神经网络具有很强的处理非线性关系的能力,误差反向传播的 BP 神经网络应用最为广泛。由于 BP 神经网络具有模糊性、高速并行处理和非线性映射等特点,与色空间转换过程的特

点相吻合。因此,用它来描述显示器的阶调曲线更符合将显示器从设备相关色空间 RGB 转换到与设备无关色空间 CIELab 的非线性关系,原理如图 3 所示^[7]。

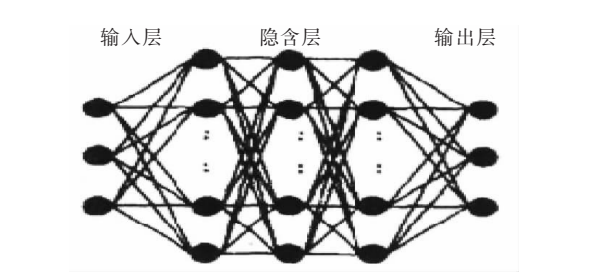


图 3 BP 神经网络结构
Fig. 3 Structure of BP network

通常 BP 神经网络是由输入层、隐含层和输出层组成。网络的输入层和输出层分别有 3 个神经元,对应 3 个输入色度值 RGB 和 3 个显示值 Lab,网络中间层的层数和神经元具体数目是可变的。隐含层的层数和神经元个数按具体情况选定,现选用 2 层和 3 层的隐含层来训练,隐含层中的节点数从 15~20 变化。网络的最终目的是实现 RGB→CIELab 的精确转换,转换精度通过 1 331 个色块的色差 ΔE_{ab} 来评价。

色差的定义为:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (10)$$

为了在色空间转换后得到最小的色差,分别在不同的条件下对网络结构进行训练,网络结构从 3 层(3-8-3)到 5 层(3-20-20-20-3),在变换隐层数目的同时还要变换神经元的数目。

表 2 BP 网络训练结果
Table 2 Results of BP network training

编号	BP 网络结构	层数	训练色块的 ΔE_{ab}			测试色块的 ΔE_{ab}		
			最大值	>6	平均色差	最大值	>6	平均色差
1	3-8-3	3	10.358 0	8	1.903 7	11.201 9	35	3.012 3
2	3-10-3	3	5.231 8	0	0.991 5	12.414 9	25	2.644 1
3	3-15-3	3	9.502 9	62	2.815 1	34.621 4	40	3.653 7
4	3-10-10-3	4	7.789 9	14	2.020 6	25.001 7	32	3.141 9
5	3-15-15-3	4	4.704 1	0	0.862 5	12.567 9	20	2.457 8
6	3-20-20-3	4	4.128 2	0	1.136 7	13.266 9	26	2.676 9
7	3-10-10-10-3	5	11.023 2	40	2.586 7	20.138 5	43	3.696 8
8	3-15-15-15-3	5	4.047 0	0	0.987 5	12.723 4	24	2.549 2
9	3-20-20-20-3	5	3.658 9	0	0.763 5	12.286 7	20	2.584 0

实验表明,在训练样本取 1 331 个的情况下,测试色块的平均色差控制精度达到了 2~4,属于小色差范围。从 1 号、4 号和 7 号网络训练结果看出,并不是网络层数越多越好。如何选择 BP 网络的层数和神经元的数目,以使色空间转换后,得到最小模型色差和检测色差,要根据具体的条件,比如允许训练的时间和要求达到的最小色差等,通过不断的训练取一个适当的值。

3.6 方法对比和误差分析

使用阶调矩阵模型、多项式拟合、三维查找表和神经网络等方法对实验数据进行了处理。结果表明,使用阶调矩阵模型将 RGB 转换到 XYZ,色差为 4~6;多项式拟合的方法,由 RGB 到 CIE XYZ 的平均色差可到 5.4~8.2,反方向的平均色差可到 3.5~8.6;建立三维查找表,色差大都控制在 2 以内,但随着数据量增大,占用内存加大,采样点由 RGB 到 CIE Lab 的色差可以达到 0,反方向的平均色差可以达到 2.0,而检验点的情况分别为 2.1~3.7 和 4.2~4.6;使用神经网络的方法,训练样本由 RGB 到 CIE Lab 的平均色差可到 0.23~3.22,反方向的可到 0.96~3.65,而测试样本的情况分别达到 0.24~3.11 和 1.08~3.71。

显示器特性的影响:通道的非独立性、时间空

间的非均匀性、荧光粉的恒常性都会带来误差;色彩空间 XYZ 不是均匀色彩空间,计算色差又要转换到 CIE Lab 均匀颜色空间,二者的转换关系是非线性的会带来误差;黑点,也就是零点非零也会有影响;另外测量仪器、测量方法都会造成一些影响;环境因素还会有干扰。这些都是在以后的研究中应该注意和提高了。

4 结 论

分别采用阶调矩阵模型、多项式拟合、三维查找表和神经网络方法,建立 CRT 显示器设备颜色空间 RGB 与设备无关色空间的非线性对应关系,完成设备颜色显示的特征化。对两个常用的显示器进行了实验,并进行色差分析,比较了几种方法的精确度。几种方法比较而言,阶调矩阵模型是传统的方法,误差居中;多项式拟合色差较大,不能满足显示器色空间变换的精度要求;三维查找表的方法较为精确,但占内存太多,特征描述文件庞大,插值处理使速度变慢;神经网络方法所得到的平均色差是最小的,是几种方法中最为理想的方法,达到了显示器特征化精度的要求,其中的 3-20-20-20-3 网络结构具有最小的色差,由 RGB 到 CIE Lab 的平均色差小于 0.31,反方向的小于 2.04。

参 考 文 献:

- [1] 田全慧,刘珏.印刷色彩与色度学[M].北京:印刷工业出版社,2003.
- [2] 许宝卉,李言.基于色彩管理的彩色 CRT 特征函数的研究[J].包装工程,2007,(3):74-76.
- [3] 景翠宁.基于 ICC 标准的输出设备的色彩管理研究[D].西安:西安理工大学学位论文,2002.
- [4] 许宝卉,李言,薛红.基于色彩管理的 CRT 色彩空间转换方法的研究[J].液晶与显示,2007,22(3):351-354.
- [5] Besuijen J. The shifting gamma perception[J]. *Color Research and Application*, 2005,30(5):332-340.
- [6] Wen Senfar, Wu Royce. Two - primary crosstalk model for characterizing liquid crystal displays[J]. *Color Research and Application*, 2006,30(2):102-108.
- [7] 柴冰华,赵达尊,廖宇放,等.色貌模型的人工神经网络方法的研究[J].光学技术,2005,31(1):127-129.

- SI 词头是用于构成倍数单位的因数符合,不能单独使用。
- 词头符号与所紧接着的单位符号应作为一个整体对待,它们共同组成一个新单位(十进倍数或分数单位),并具有相同的幂次。例如: $10\text{ hm}^2=10\times(100\text{ m})^2=10^5\text{ m}^2$; $1\text{ cm}^3=(10^{-2}\text{ m})^3=10^{-6}\text{ m}^3$ 。
- 词头不能重叠使用,即不能使用由几个词头并列组成的组合词头。例如:不能用 $\text{m}\mu\text{s}$ (毫微秒),正确的为 ns (纳秒)。
- 摄氏度、平面角和时间单位(s 除外)及 kg 等不得使用词头的倍数单位。例如:“mh”(毫小时),“hkg”(百公斤)是不规范的。