

基于最佳立方体细分的显示器颜色再现模型

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, 郑州 450007)

摘要: **目的** 建立一个显示器颜色再现模型, 模型以 NEC 显示器为实例, 实现 Lab 到 RGB 的转换。**方法** 模型以修正的立方体细分算法为基础, 通过对色域外的点进行处理, 并且选定一个最佳细分等级, 来平衡转换精度和算法计算量, 从而实现显示器的颜色再现。**结果** 采用 CIELab 色差公式^[1]分析实验数据, 模型转换过程平均色差为 1.8068, 在人的视觉可接受范围内, 最大色差仅有 4.6051, 模型的颜色再现精度高。**结论** 文中建立的模型可以实现显示器从 Lab 到 RGB 的准确转换。

关键词: 颜色再现; 立方体细分; 最佳细分等级

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2014)13-0128-05

Monitor Color Reproduction Model Based on Optimal Cube Subdivision

LIU Pan¹, LIU Zhen¹, ZHU Ming²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450007, China)

ABSTRACT: Objective A monitor color reproduction model was established to realize the conversion from Lab to RGB, using a NEC monitor as example. **Methods** The model was based on the modified cube subdivision algorithm, which processed the points outside the color gamut. Through choosing an optimal subdivision level, the model could balance between the conversion calculation precision and algorithm efficiency, in this way, the color reproduction of the monitor was realized. **Results** The accuracy of the model was analyzed with the CIELab color difference formula, the average color difference during the model conversion was 1.8068, which was in the acceptable range of human vision. The largest color difference was only 4.6051. The model had high conversion precision. **Conclusion** The model established in this paper could realize the accurate conversion of the monitor from Lab to RGB.

KEY WORDS: color reproduction; cube subdivision; optimal subdivision level

对于显示器颜色准确再现的研究, 主要包括正向转换和反向转换 2 个过程。当前国内外对显示器色空间转换的研究主要集中在正向转换方面, 即实现 RGB 到 Lab 的转化, 代表性研究有三维查表法^[2-3]、BP 神经网络法^[4]、PLCC 模型^[5]、GOG 模型^[6-7]、S-shape 模型^[8-9]、多项式回归模型^[10]、分段分空间模型^[11]等。反向转换由于是从不规则空间到规则空间的转换, 过程较复杂, 所以研究较少。Hung^[12]提出了基于四面体插值的

反向变换算法, 但这种算法的计算量大; 徐海松、张显斗等人^[13-14]提出了基于立方体细分的查表插值匹配算法, 但这种算法需要进行多次迭代, 计算量受到一些因素的影响, 高精度需要以比较大的运算量为代价, 而且对色域外的颜色预测精度不高。

文中对立方体细分的插值匹配算法进行修正, 从而建立一个显示器颜色再现模型, 实现显示器的颜色反向转换过程。该模型对色域外的颜色进行处理, 使

收稿日期: 2014-02-11

基金项目: 上海市研究生创新基金(JWCXSL1402)

作者简介: 刘攀(1990—), 男, 湖南张家界人, 上海理工大学硕士生, 主攻色彩管理/颜色科学。

对色域外的颜色预测更加准确,修正后的算法不需要进行多次迭代,而改为选择最优细分等级以平衡计算量和预测精度。新模型以查找表为基础,所以可以被运用于各种显示设备。

1 色域描述

1.1 创建查找表

色域描述以查找表的数据为基础,所以查找表的创建是一个重要过程。文中将 NEC 显示器源色空间进行 11 级均匀分割,即在 R/G/B 3 个坐标方向分别取坐标点 0, 16, 32, 64, 96, 128, 160, 192, 224, 240, 255, 共得到 1331 个样本点的 RGB 值。在暗室环境下用 NEC 显示器依次显示这些样本集,用 eyeone 测量对应的 Lab 值,形成一张样本集的 RGB-Lab 查找表。

1.2 描述色域

以查找表的 Lab 数据为基础,采用基于分区最大化的色域边界描述方法^[15]描述显示器的色域范围。为了让色域范围描述精度和算法运行效率达到平衡,将色域的 θ 角划分为 12 等份, α 角的划分与 θ 角相同,划分后的球状色域可以分成 $12 \times 12=144$ 个分区。因为查找表数据的有限性,所以不是所有的分区都有样本颜色分布。对于这样的分区需要做特殊处理来确定其边界,这里相邻几个分区半径的平均值来作为没有颜色点的分区的半径 r 的取值。将查找表进行处理后写入 ICC 特性文件,然后利用“Profile Editor”软件的“gamut view”功能模块显示 NEC 显示器色域,见图 1,黄线范围是 NEC 显示器的色域范围。

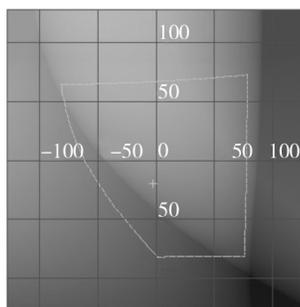


图1 NEC显示器色域

Fig.1 Gamut of NEC monitor

2 创建颜色再现模型

颜色再现模型以立方体细分的插值匹配算法为基础,该算法的原理是通过增加迭代次数来使预测值小于一个设定的阈值,从而提高预测精度。但是过多的迭代次数会影响计算量,迭代次数越多,计算量越大,而且对于一些色域外的颜色,迭代次数的增多并不能使预测值小于设定阈值,即算法对于色域外的颜色预测精度不高。为降低计算量,提高运行效率,改善色域外颜色的预测精度,文中对立方体细分的插值匹配算法进行了修正,以建立更加完善的反向转换模型。

文中反向转换模型的创建有 3 个部分:对色域外的点进行映射、修正立方体细分算法以及最佳细分等级的选择等。

2.1 色域映射

对于一个待预测的 Lab 数据,首先需要判断该颜色是否位于显示器色域内,如果在色域内则直接对该颜色用反向模型进行预测,如果不在色域内则需要进行色域映射处理。判断颜色在色域内还是色域外的步骤为^[16]:根据待测颜色色相角计算等色相面,然后结合色域范围计算相应的 Lgb 线色域边界;以横坐标为彩度值,纵坐标为亮度值在等色相面内可以形成 2 维坐标系,见图 2,图 2 中 L_{max} 和 L_{min} 分别为最大和最小亮度值,故亮度轴中心点值为 $(L_{max}+L_{min})/2$,连接待测颜色点和亮度轴中心点得到一条直线,该直线与 Lgb 线相交于一点,定义该点坐标值为 (C', L') ;待测颜色已知 Lab 值,并且通过 a 和 b 值可以得到彩度值 $C=(a^2+b^2)^{1/2}$;设定条件 $C < C'$ 且 $L_{min} < C' < L_{max}$,如

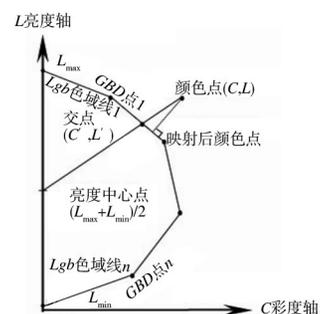


图2 色域映射原理

Fig.2 Principle of the gamut mapping

果满足该条件则说明待测颜色位于色域内,不满足则位于色域外。

如果判断得出颜色是在色域外,色域映射的处理方法为:在Lgb线上找到与待测颜色点距离最近的点,具体操作见图2,过待测颜色点作Lgb线的垂线,垂足的Lab值即为色域映射后的色度值。

2.2 算法修正

对立方体细分的插值匹配算法进行修正,修正后的算法流程见图3。具体的步骤如下所述。搜索查找表,找到与待测颜色A色差最小的样本颜色点,记该色差为 ΔE ,该颜色样本点为 $Q_0(R_0, G_0, B_0)$ 。判断 ΔE 与

设定阈值 E_{th} 的大小,如果 $\Delta E \leq E_{th}$,则将 R_0, G_0, B_0 认定为待测颜色的RGB;如果 $\Delta E > E_{th}$,再次搜索查找表,找到最临近 Q_0 的2个点 $Q_1(R_1, G_1, B_1), Q_2(R_2, G_2, B_2)$,满足 $R_1 < R_0, G_1 < G_0, B_1 < B_0, R_2 > R_0, G_2 > G_0, B_2 > B_0$,由 $R_1, G_1, B_1, R_2, G_2, B_2$ 可以组成一个立方体,绝大多数情况下都可以认为待测点A的RGB值就在这个立方体内,如不在立方体内该方法实际求得RGB值对应的Lab值也会与目标Lab值非常接近。对立方体进行N级细分,令:

$$R_i = \text{Round}(R_1 + (R_2 - R_1) / N \cdot (i - 1))$$

$$G_i = \text{Round}(G_1 + (G_2 - G_1) / N \cdot (i - 1))$$

$$B_i = \text{Round}(B_1 + (B_2 - B_1) / N \cdot (i - 1))$$

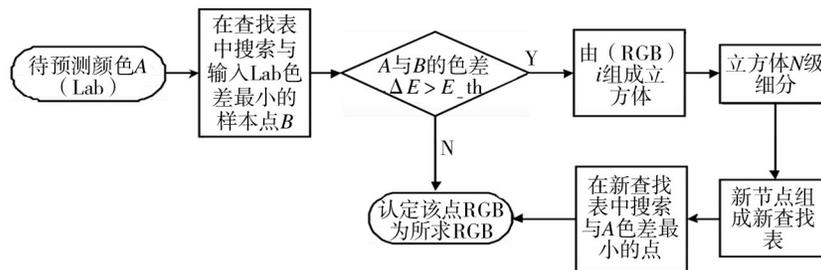


图3 修正的立方体细分算法流程

Fig.3 The process of modified cube subdivision algorithm

细分完之后 $R_i=R_1, R(N+1)=R_2, R_i$ 表示红通道里第*i*个R,绿、蓝通道同理,Round为取整函数。细分后的R/G/B值组合可产生许多新节点,它们的Lab值可以运用正向转换模型(文中运用基于四面体插值的三维查找表算法)预测得到,这样新节点的RGB对应其Lab可产生新的查找表。搜索新的查找表,找到与待测颜色A色差最小的点,将该点的RGB值认定为A的RGB值。

2.3 最佳细分等级的选择

为平衡算法计算量和预测精度,将细分等级N依次取3,4,5,6等多个级别,通过实验找到最佳细分等级。实验用的测试色块为matlab制作的343个色块,实验结果见表1。

由表1可知,细分等级越高,预测越准确,但是考虑到7级细分以后的转换精度差别不大,且7级运行效率明显高于更高等级的运行效率,所以反向转换模型将采用7级细分等级。

表1 不同细分等级的反向模型色差分析

Tab.1 The color difference analysis of back-forward model with different subdivision levels

	最大色差	最小色差	平均色差
3级	8.1969	0.3824	3.7998
4级	6.9178	0.2326	2.4727
5级	5.4546	0.1874	2.4646
6级	4.7341	0.2119	2.1850
7级	4.6051	0.1522	1.8068
8级	4.6001	0.1480	1.6275
9级	4.5992	0.1463	1.5126
10级	4.5341	0.1463	1.4653
11级	4.5278	0.1382	1.3060
12级	4.5141	0.1331	1.2321

3 模型精度评价

实验设备:显示器,NEC MultiSync EA191m;测试设备,X-rite eye-one Pro。测试环境为暗室环境。

对 matlab 制作的 343 个测试色块,先判断是在色域内还是色域外,色域外的进行色域映射。然后对测试色块用 7 级细分立方体修正算法预测,预测色差分布见图 4。

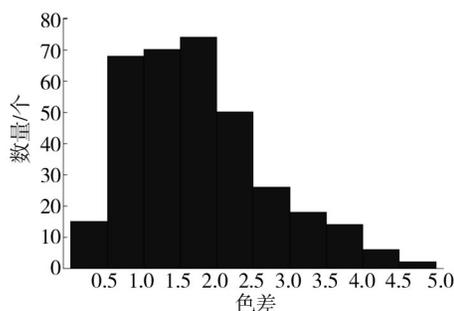


图4 反向模型色差分布直方图

Fig.4 The color difference distribution histogram of back-forward model

与未修正的立方体细分算法进行比较,结果见表 2。

表2 修正前后的立方体细分算法色差对比

Tab.2 The color difference comparison of cube subdivision algorithm before and after modification

	最大色差	平均色差
立方体细分算法	13.7200	2.4900
修正的立方体细分算法	4.6051	1.8068

由表 2 可知,修正后的立方体细分算法精度得到了很大改善,尤其体现在最大色差上,最大色差由 13.72 减小到 4.61,提高了 3 倍,而平均色差显著降低,由 2.49 降到了 1.81,说明修正后的算法对于显示器颜色的反向预测更加精确。其原因主要有:对色域外的颜色进行了色域映射处理,色域外颜色的预测准确度得到提高;算法修正以前,预测一般过程都是当精度小于设定阈值后就停止,当阈值设定不合理时,整个模型的精度都会受到影响,而文中的修正算法通过实验选择最佳细分等级,这个等级是最适合实验用显示器的等级,即使有些颜色的预测还是有较大偏差,但是整个模型的精度可以得到保证。

通过实验证明,算法的运行效率比修正前更加稳定。修正前的算法因为迭代次数未知,当小于阈值时就停止,大于阈值时就继续迭代,所以算法的运行效率受到设备和设定阈值的影响。阈值设定较大时,可能运行速度很快,但预测精度会受到影响。阈值设定较小时,运行效率会成倍增加,而且有时不管迭代多少次

都不能使预测值小于设定值。文中的修正算法通过实验选择最佳细分等级,在提高精度的同时,也保证了运行效率的有效性。文中 NEC 显示器以 7 级细分的修正算法实验,运行效率比修正前的算法有较大改善。

4 结语

文中提出了一种颜色再现模型,模型通过对色域外的点进行处理,并以修正的立方体细分算法为基础,选定一个最佳细分等级,实现显示器从 CIELab 到 RGB 的准确转换。实验证明,该方法在显示器进行颜色再现时,精度上可以达到很高水平,运行效率的稳定性和有效性都有很大的改善,而且模型以查找表为基础,所以适用于各种显示设备。

参考文献:

- [1] 汪哲弘. 颜色视觉辨别特性及色差评价研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.
WANG Zhe-hong. Study of Color Vision Discrimination Characteristic and Color-difference Evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [2] 许宝卉. 基于三维查找表插值算法的显示器色彩空间转换模型的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 77—79.
XU Bao-hui. Research on Display Color Space Conversion Model Based on Three-dimensional Lookup Table Interpolation Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 77—79.
- [3] 马玫娟. 基于三维查找表的数字图像颜色校正[D]. 北京:北京工业大学,2009.
MA Mei-juan. Color Correction of Digital Image Based on Three-dimensional Lookup Table[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
- [4] LIAO N, GAO Z. A Comparative Study of a CRT Colorimetric Prediction Model by Neural Networks and the Models by Conventional Method[J]. Color Research and Application, 1999, 24(1): 45—51.
- [5] POST D L, CALHOUN C S. An Evaluation of Methods for Producing Desired Colors on CRT Monitors[J]. Color Research and Application, 1989, 14(4): 172—186.
- [6] BERNS R S. Methods for Characterizing CRT Displays[J]. Displays, 1996, 16(4): 173—182.
- [7] 何华, 黄慧, 孙娅妮. GOG 模型在 LCD 特性化中的适用性研究[J]. 昆明学院学报, 2009, 31(3): 99—101.
HE Hua, HUANG Hui, SUN Ya-ni. Study on Applicability of GOG Model for LCD Characterizing[J]. Journal of Kunming

- University, 2009, 31(3): 99—101.
- [8] WANG Y, XU H. Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Display Using an Improved Two-stage Model[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(7): 432—434.
- [9] 王勇, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的S模型算法[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(3): 491—494.
WANG Yong, XU Hai-song. The S Shape Model for LCD Colorimetric Characterization[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 491—494.
- [10] 洪亮, 楚高利. 基于多项式回归模型的显示器特征化研究[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 85—89.
HONG Liang, CHU Gao-li. Characterization of Display Based on Polynomial Regression Model[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 85—89.
- [11] 张显斗, 徐海松. 液晶显示器颜色特征化的分段分空间模型[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1719—1724.
ZHANG Xian-dou, XU Hai-song. Piecewise Partition Model for Accurate Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Displays[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1719—1724.
- [12] PO-CHIE H H. Colorimetric Calibration in Electronic Imaging Devices Using a Look-up-table Model and Interpolations[J]. Journal of Electronic Imaging, 1993, 2(1): 5.
- [13] 徐海松, 张显斗. 数字图像设备颜色特征化反向变换算法[J]. 浙江大学学报(工学报), 2008, 42(12): 169—177.
XU Hai-song, ZHANG Xian-dou. Inverse Conversion Algorithm of Colorimetric Characterization for Digital Imaging Devices[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(12): 169—177.
- [14] 张显斗. 数字图像颜色复现理论与方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
ZHANG Xian-dou. Study of Color Reproduction Theory and Method for Digital Image[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [15] MOROVI J, LUO M R. Calculating Medium and Image Gamut Boundaries for Gamut Mapping[J]. Color Research and Application, 2000, 25(6): 394—401.
- [16] 朱明, 李稳柱, 李晓春. 基于分区胞元组介堡模型的图像多色分色研究[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 92—98.
ZHU Ming, LI Wen-zhu, LI Xiao-chun. Multi-color Separation Based on Subarea Cell Yule-Nielsen Neugebauer Model[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 92—98.

(上接第122页)

- 135—137.
QI Xiao-guang, SUI Xiu-wu, LI Da-peng. The Control System of Electronic Counting-machine Based on DSP and CCD Sensor[J]. Computer Technology and its Applications, 2012, 38(6): 135—137.
- [7] HE F J, ZHANG R J, DU Z J, et al. Non-contact Measurement of Damaged External Tapered Based on Linear Array CCD[J]. Journal of Physics, 2006, 48: 676—680.
- [8] 项大鹏, 杨江, 杨建. 基于CPLD的线阵CCD驱动时序电路设计[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 123—125.
XIANG Da-peng, YANG Jiang, YANG Jian. Design of Driving Time Sequence Circuit of Linear Array CCD Based on CPLD[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(2): 123—125.
- [9] YAN W B, ZHAO B. CCD Auto-gain Regulation Based on DSP[J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(3): 74—76.
- [10] 邱超, 陈兴洲. 基于DSP+FPGA的烟包包装缺陷视觉检测系统研究[J]. 包装工程, 2008, 29(7): 40—42.
QIU Chao, CHEN Xing-zhou. Visual Inspection System of Cigarette Package Faults Based on DSP+FPGA[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(7): 40—42.
- [11] 郭立智, 赵金环. 基于小波变换的边缘检测[J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(2): 78—80.
GUO Li-zhi, ZHAO Jin-huan. Edge Detection Based on Wavelet Transform[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2007, 28(2): 78—80.
- [12] XUE Lan-yan, PAN Jian-jia. Edge Detection Combining Wavelet Transform and Canny Operator Based on Fusion Rules[M]. International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2009: 324—328.
- [13] RAFAEL C G, RICHARD E W. Digital Image Processing (Second Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 9—10.
- [14] 高军, 陶娜娜, 卢秉恒. 基于小波变换的图像边缘检测算法的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(11): 70—72.
GAO Jun, TAO Na-na, LU Bing-heng. Research on Image Edge Detection Algorithm Based on Wavelet Transformation [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 70—72.
- [15] 蔡锦达, 范壁, 何胜军. 基于DSP的线阵CCD式数粒系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2009, 22(4): 75—76.
CAI Jin-da, FAN Bi, HE Sheng-jun. Design of Linear CCD Counting System Based on DSP[J]. Industrial Control Computer, 2009, 22(4): 75—76.