

液晶显示器颜色特性化模型比较研究

孙娅妮 李永波 段剑金 罗 熙 徐 楠 杨卫平

(云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092)

摘要 显示器的精确颜色特性化是色彩管理的基础工作之一。液晶显示器(LCD)由于其通道干扰和色品非恒常性等原因在特性化时存在很大困难。采用增益-偏置-伽玛(GOG)模型、双通道干扰(TPC)和分段分空间(PP)模型对同一台液晶显示器进行特性化实验研究。使用 CIEDE2000 色差公式来评价特性化精度。实验结果表明:三个模型的精度相差较大。PP 模型的平均色差为 1.2260 个 CIEDE2000 单位;GOG 模型的平均色差为 3.9849 个 CIEDE2000 单位;TPC 模型的平均色差为 5.8779 个 CIEDE2000 单位。GOG 模型和 TPC 模型的平均色差均可以满足一般的应用需要,而 PP 模型可以用于对颜色复制有较高要求的场合。

关键词 色度学;颜色特性化;增益-偏置-伽玛模型;双通道干扰模型;分段分空间模型;液晶显示器

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0344

Comparison of the Liquid Crystal Display Color Characterization Models

Sun Yani Li Yongbo Duan Jianjin Luo Xi Xu Nan Yang Weiping

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract The accurate color characterization of displays is the basis of the color management. The characterization of the liquid crystal display (LCD) is difficult because of the variant primary chromaticity and primary crosstalk. The gain-offset-Gamma (GOG), Two-trimary crosstalk (TPC) and piecewise partition (PP) were employed to study on the experiments of color characterization of the same LCD. The characterization accuracy were evaluated with the CIEDE2000 color-difference formula. The experimental results show that the performance of the models were quite different. The mean color difference of the PP model reaches 1.2260 CIEDE2000, while the GOG model is 3.9849 CIEDE2000, and the TPC model is 5.8779 CIEDE2000. The GOG and TPC models can satisfy the general needs and the PP model can be used in the higher requisition color reproduction.

Key words colorimetry; color characterization; gain-offset-Gamma (GOG) model; two-primary crosstalk (TPC) model; piecewise partition (PP) model; liquid crystal display

1 引 言

随着电子图像大量被采用,显示器成为最主要、最直观的图像输出设备。阴极射线管(CRT)显示器具有良好的颜色再现特性,但由于其本身的物理特性造成了辐射等问题。液晶显示器(LCD)以其体积小,重量轻,无辐射,低功耗等特点近年来得到了迅速发展,但其对颜色的保真复制效果尚不尽人意。因此,研究一种有效的 LCD 显示器的精确颜色特性化方法越来越重要^[1]。

CRT 显示器的颜色特性化已相当成熟,国际照

明委员会(简称 CIE)综合和比较了各方面的研究成果^[2~4],基于 Berns 教授的研究^[4,5],推荐了增益-偏置-伽玛(GOG)模型为 CRT 显示器的颜色特性化模型。然而,LCD 与 CRT 显示器的呈色机理不同,传统的 CRT 颜色特性化模型是否适用于 LCD 颜色特性化,国际上还没有统一的定论^[6,7]。本文把 GOG 模型应用于 LCD 显示器上,并与近些年国内外学者提出的双通道干扰(TPC)模型^[8]和分段分空间(PP)模型^[9]进行比较。

基金项目: 国家自然科学基金(60768002)、云南省自然科学基金(2005F0033M)和云南省教育厅科学研究基金(07C50332)资助课题。

作者简介: 孙娅妮(1983—),女,硕士研究生,主要从事显示器特性化方面的研究。E-mail: sunnyni83@yahoo.com.cn

导师简介: 杨卫平(1958—),男,教授,硕士生导师,主要从事颜色科学、多光谱成像等方面的研究。

E-mail: yangwpkm@126.com

2 液晶显示器呈色机理

液晶显示器大多以扭曲向列型(TN)、超扭曲向列型(STN)、薄膜式晶体管型(TFT)三种技术为主轴,其中 TN 型的液晶显示技术是液晶显示器中最基本的,而其他种类的液晶显示器大多是以 TN 型加以改良的^[10]。其中,TFT-LCD 已成为 LCD 发展的主要方向。根据 TFT-LCD 结构特点可知,现今使用的 LCD 显示器显示彩色图像时,每一个像素都是由三个液晶单元格构成的,在每一个单元格前面都具有红色、绿色或蓝色的滤光片,在不同的电磁场强度作用下,液晶分子的光透过率不同,透过不同单元格的光线在屏幕上显示不同的颜色。

3 三种 LCD 特性化模型

3.1 GOG 模型

GOG 模型是一种比较精确的 CRT 特性化方法,CIEXYZ 三刺激值与 RGB 间的变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R \cdot \max} & X_{G \cdot \max} & X_{B \cdot \max} \\ Y_{R \cdot \max} & Y_{G \cdot \max} & Y_{B \cdot \max} \\ Z_{R \cdot \max} & Z_{G \cdot \max} & Z_{B \cdot \max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(d_r) \\ G(d_g) \\ B(d_b) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $X_{R \cdot \max}, Y_{R \cdot \max}, Z_{R \cdot \max}, X_{G \cdot \max}, Y_{G \cdot \max}, Z_{G \cdot \max}, X_{B \cdot \max}, Y_{B \cdot \max}, Z_{B \cdot \max}$ 分别为显示器三原色最大红、绿、蓝所对应的 CIEXYZ 三刺激值, X_0, Y_0, Z_0 为暗场值。

以红通道为例, $R(d_r)$ 与数字计数 d_r 之间的非线性关系如下^[4]:

$$R(d_r) = \begin{cases} \{k_{g,r}(d_r) + k_{o,r}\}^{\gamma_R}, & k_{g,r}(d_r) + k_{o,r} \geq 0 \\ 0, & k_{g,r}(d_r) + k_{o,r} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 d_r 为归一化的数字计数,即 $0 \leq d_r \leq 1$ 。式中 k_g, k_o 是由视频信号发生器和视频放大器的增益(gain)和偏置(offset)决定的,其中 $k_g + k_o = 1$; γ 决定显示器的对比度和层次关系, γ 值较小时有利于表现较亮的颜色, γ 值较大时对暗调的表现能力较好。 $G(d_g), B(d_b)$ 的形式与上式一致。

从上述介绍可知,GOG 模型是根据 CRT 显示器的特有机理提出的特性化模型,而 LCD 显示器与 CRT 显示器呈色机理不同,此模型是否适用于 LCD 显示器还没有统一的说法。有学者曾尝试将 GOG 模型运用于 LCD 显示器,但结果不是很理想^[6]。本文也将使用 GOG 模型对 LCD 显示器进行特性化。

3.2 TPC 模型

与 CRT 显示器相比,LCD 显示器还存在着两个重要问题:色品坐标的非恒常性和通道之间的相互干扰^[11]。这给显示器的精确颜色特性化带来了很大的问题。2006 年,Senfar Wen 等^[8]通过研究发现,LCD 显示器的各通道间是两两相互干扰的。基于这点他们提出了 TPC 模型。如果没有通道干扰,即只有单通道作用时,以红通道为例,CIE 三刺激值的转换函数为

$$T_R^S = a_{r0}^S + \sum_{k=1}^P a_{rk}^S d_r^k, \quad (3)$$

其中 $S = X, Y, Z; 0 \leq d_r \leq 1$; 系数 $a_{rk}^S (k = 0, 1, 2, \dots, P)$ 的个数由 P 决定。

对于有通道干扰的情况,通道的干扰函数为:

$$T_{ij}^S = \sum_{l=0}^Q \sum_{m=0}^Q c_{ijlm}^S d_i^l d_j^m, \quad (4)$$

$i, j = r, g, b$, 分别代表红、绿、蓝通道, ij 代表 j 通道对 i 通道的干扰; $l, m = 0, 1, 2 \dots Q$, 多项式的次数 Q 决定该式中系数的个数。

合并上述两式,整个 TPC 模型的表达式就为

$$T_R^S = a_0^S + \sum_{k=1}^P a_{rk}^S d_r^k + \sum_{k=1}^P a_{gk}^S d_g^k + \sum_{k=1}^P a_{bk}^S d_b^k + \sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q c_{rglm}^S d_r^l d_g^m + \sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q c_{gblm}^S d_g^l d_b^m + \sum_{l=1}^Q \sum_{m=1}^Q c_{brlm}^S d_b^l d_r^m, \quad (5)$$

式中 $i, j = r, g, b; k = 1, \dots, P; l, m = 1, 2, \dots, Q$ 。(5)式的系数个数 $M = 1 + 3 \times (P + Q^2)$ 。

3.3 PP 模型

PP 模型是张显斗等^[9]提出的一种 LCD 显示器特性化模型,该模型的特点是当考虑到色品坐标非恒常性和通道之间的干扰情况时,采用分段表达式来表示数字驱动值与 CIEXYZ 三刺激值之间的关系。具体表达式为:

1) 单通道(以红通道为例),根据色品特性把数字驱动值分成三段:

$$\begin{cases} T_{ri} = a_{1i}^r + b_{1i} \times d_r + c_{1i} \times d_r^2, & r \leq M \\ T_{ri} = a_{2i}^r + b_{2i} \times d_r + c_{2i} \times d_r^2, & M < r \leq N \quad (i = X, Y, Z) \\ T_{ri} = a_{3i}^r + b_{3i} \times d_r + c_{3i} \times d_r^2, & r > N \end{cases} \quad (6)$$

r 为红通道的数字驱动值, d_r 为归一化的驱动值。 M, N 分别为三通道的驱动值分界点。绿、蓝通道作同样的处理。

2) 根据每个通道的两个分界点,将整个色域空

间分成 27 个子空间,根据通道的干扰情况又将这些空间分成 3 类:

i) 三通道的驱动值中最多只有一个大于 M 的,共 7 个子空间,此类空间不考虑干扰;

ii) 三通道的驱动值中有两个大于 M 的,共 12 个子空间,只考虑驱动值大于 M 的两个通道间的干扰,例如 $M < r, g \leq N, b < M$ 时,三刺激值可表示为

$$T_i = T_{ri} + T_{gi} + T_{bi} + d_i + e_i \times d_r \times d_g, \quad (7)$$

其中后两项是干扰项, d_i, e_i 为常数,其他子空间也可以作同样处理。

iii) 三通道的驱动值都大于 M 的,共 8 个子空间,考虑两个通道间和三个通道间的干扰,例如 $M < r, g, b \leq N$ 时,三刺激值可表示为

$$T_i = T_{ri} + T_{gi} + T_{bi} + d_i + e_i \times d_r \times d_g + f_i \times d_g \times d_b + h_i \times d_r \times d_b + k_i \times d_r \times d_g \times d_b, \quad (8)$$

同样 d_i, e_i, f_i, h_i, k_i 为常数。

4 实验和结果

本实验采用上述三种模型对 LCD 显示器进行颜色特性化。

4.1 实验仪器和实验条件

1) LCD 显示器型号:方正 FH780-FD,刷新频率 60 Hz,分辨率 1024 pixel×768 pixel,颜色显示为 32 位真彩色;

2) 白场设置:D65 白场(实测值 $x=0.312, y=0.3297, Y=102.79 \text{ cd/m}^2$);

3) 黑场亮度: 0.38 cd/m^2 ;

4) 测量仪器:美国爱色丽(X-Rite)公司的 eye-one pro 分光光度计;能用于测量显示器屏幕的颜色;工作电压为 5 V,工作电流为直流 500 mA;

5) 测量软件:麦克贝斯(GretagMacbeth)公司的 KeyWizard V2.5,该软件能把测量的数据加载到 Windows 应用程序中(如 Excel 文件),方便数据的管理。

实验在暗室中进行,在实验前对液晶显示器和测量仪器预热 2 h。测量的色块由有 VB 程序生成,背景是三通道数字驱动值为(128, 128, 128)的灰色,待测色块大小为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,位于屏幕中央。

4.2 实验数据的设置

实验要求测量的数据分为 5 组:

第 1 组数据为:

$$(r, g, b) = (H[i], 0, 0),$$

$$(r, g, b) = (0, H[i], 0),$$

$$(r, g, b) = (0, 0, H[i]),$$

其中 $H[i] = \{0, 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 144, 160, 176, 192, 208, 224, 240, 255\}$,共有 $17 \times 3 - 2 = 49$ 个样本;

第 2 组数据为:

$$(r, g, b) = (I[i], J[j], 0),$$

$$(r, g, b) = (I[i], 0, J[j]),$$

$$(r, g, b) = (0, I[i], J[j]),$$

其中 $I[i] = \{36, 109, 218\}, J[j] = \{72, 145, 218\}$,共有 27 个样本;

第 3 组数据为:

$$(r, g, b) = (K[i], L[j], 32),$$

$$(r, g, b) = (K[i], 32, L[j]),$$

$$(r, g, b) = (32, K[i], L[j]),$$

其中 $K[i], L[j] = \{64, 128, 255\}$,共有 27 个样本;

第 4 组数据为:

$$(r, g, b) = (M[i], M[j], M[k]),$$

其中 $M[i], M[j], M[k] = \{64, 128, 255\}$,共有 27 个样本;

第 5 组数据为:

$$(r, g, b) = (T[i], T[j], T[k]),$$

其中 $T[i], T[j], T[k] = \{0, 36, 72, 109, 145, 182, 218, 255\}$,共有 $8 \times 8 \times 8 = 512$ 个样本。

根据各模型的特点,选择不同的训练样本,其中 GOG 模型采用第 1 组数据来拟合参数;TPC 模型采用第 1 和第 2 组数据;根据显示器的色品特性,确定 PP 模型的两个分界点分别为 $M=64, N=128$,并采用第 1、第 3 和第 4 组数据拟合参数。第 5 组数据中均匀分布于整个 RGB 空间的 512 个色块作为三个模型的检验样本。

4.3 实验结果

使用上述设置的训练样本对 GOG 模型,TPC 模型和 PP 模型的参数进行拟合,其中 GOG 模型的参数估计见表 1。

表 1 GOG 模型的参数值

Table 1 The parametric value of the GOG model

Channel	k_g	k_o	γ
R	0.4108	0.5892	8.7809
G	0.6239	0.3661	4.9467
B	0.8176	0.1824	3.2132

对于 TPC 模型,通过反复试验比较,模型中 P, Q 的值分别取为 6 和 2 时拟合的效果最理想,此时模型的参数总共为 93 个。PP 模型的参数有 273 个。这些参数都通过软件拟合确定。

4.4 模型的性能评价

CIE于2001年公布的CIEDE2000色差公式^[12]是目前较为精确的色差公式,较符合人眼视觉特性。本文对各模型性能评价均采用该色差公式。通过512个检验样本计算各模型预测值与实际测量值之间的CIEDE2000色差,并计算平均色差。图1是各模型色差分布图,横坐标表示CIEDE2000色差,纵坐标表示各色差范围内的检验样本的个数。从图中可以发现PP模型在色差小于2的范围内的测试样本数达到了427个,占总的测试样本的约83.39%,是这三个模型中精度最高的一个。而GOG模型和TPC模型在色差小于2的范围内的测试样本只有55和59个,模型的精度较低。

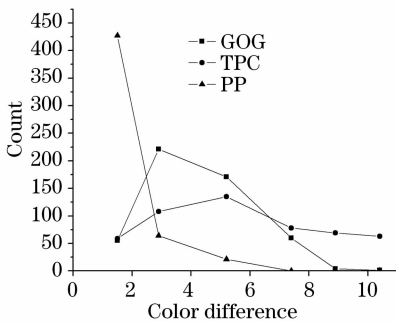


图1 各模型色差分布图

Fig.1 Color difference distribution of the models

表2为各模型的平均色差、最小色差和最大色差及训练样本数。

表2 各模型的色差评价

Table 2 The color difference of the models

Model	$\Delta E_{Average}$	$\Delta E_{Minimum}$	$\Delta E_{Maximum}$
GOG(49)	3.9849	0.5696	10.6170
TPC(76)	5.8779	0.2853	23.0932
PP(100)	1.2660	0.0501	5.0607

从表2可知,PP模型的平均、最小和最大色差都最小,而TPC模型的平均色差和最大色差都较大,GOG模型的平均色差和最大色差位于其他两个模型之间。TPC模型和PP模型都是由多项式模型改进来的,但模型的精度相差却很大,这是因为TPC模型只考虑通道之间的干扰特性,而PP模型同时考虑了LCD显示器的色品特性,通过划分子空间,用分段函数来表示显示器的颜色特性。GOG模型采用了最少的训练样本,其计算较为简单,但色差较大;PP模型用了最多的训练样本,得到的色差较小,精度最高。GOG和TPC模型的平均色差均可以满足一般的需要,而PP模型可以用于对颜色复制有较高要求的场合。

5 结 论

本文采用GOG模型、TPC模型和PP模型对液晶显示器进行特性化。使用相同的检验样本对模型性能进行检验。其中PP模型的平均色差为1.2260个CIEDE2000单位,达到了良好的精度要求。由于LCD显示器的呈色机理不同于CRT显示器,因此传统的GOG模型虽然模型较为简单,但精度不太理想,TPC模型的精度也较差。TPC模型的提出者也提到,由于当时采用的LCD显示器是相同厂家生产的,因此双通道干扰的一般性还无法证明^[8]。这可能是导致本文中该模型的精度较差的一个原因,有待于日后的研究加以证明。

参 考 文 献

- 1 Yasuhiro Yoshida, Yoichi Yamamoto. Proposal for color management of LCD [C]. IS&T/SID Ninth Color Imaging Conference, 2001. 233~238
- 2 Yang Weiping, Liao Ningfang, Huang Qingmei *et al.*. A new method of cathode-ray tube characterization based on munsell system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1039~1044
杨卫平,廖宁放,黄庆梅等. 基于蒙赛尔系统的阴极射线管特性化新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1039~1044
- 3 Shi Junsheng, Yun Lijun, Yang Jian *et al.*. Accuracy of colorimetric characterization and effect of black point for CRT monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 371~376
石俊生,云利军,杨健等. 阴极射线管显示器特性化精度及黑点的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 371~376
- 4 Roy S. Berns. Methods for characterizing CRT displays[J]. *Displays*, 1996, **4**(16): 173~182
- 5 Roy S. Berns, R. J. Motta, M. E. Gorzynski. CRT colorimetry. Part I: Theory and practice[J]. *Col. Res. Appl.*, 1993, **18**(5): 299~314
- 6 Mark D. Fairchild, David R. Wybe. Colorimetric characterization of apple studio display (flat panel LCD) [R]. Munsell Color Science Laboratory Technical Report, 1998
- 7 Jason E. Gibson, Mark D. Fairchild. Colorimetric characterization of three computer displays (LCD and CRT) [R]. Munsell Color Science Laboratory Technical Report, 2000
- 8 Senfar Wen, Royce Wu. Two-primary crosstalk model for characterizing liquid crystal displays [J]. *Color Research and Application*, 2006, **2**(31): 102~108
- 9 Zhang Xiandou, Xu Haisong. Piecewise partition model for accurate colorimetric characterization of liquid crystal display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1719~1724
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
- 10 Zhou Yanqiong, Bai Mu. A review on liquid crystal display technology[J]. *Image Technology*, 2002, **4**: 10~15
周艳琼,白木. 液晶显示技术综述[J]. *影像技术*, 2002, **4**: 10~15
- 11 Youngshin Kwak, Lindsay W. Macdonald. Method for characterizing an LCD projection display[C]. *SPIE*, 2001, 110~118
- 12 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. *Col. Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~250