

文章编号:1007-2780(2019)08-0772-06

240Hz 无滤色片液晶显示中色彩分裂现象的抑制

王 萍,张宇宁*,郦光选,耿 迪

(东南大学 电子科学与工程学院 教育部信息显示与可视化国际合作联合实验室,江苏 南京 210096)

摘要:时序彩色显示相比于传统空间子像素显示而言,具有高分辨率低功耗等优点,但其深受色彩分裂现象的困扰,解决此问题对时序显示的发展显得至关重要。本文基于 240 Hz 液晶显示屏,提出一种四场局域基色去饱和算法。该算法选取重心点为第 4 场背光基色,将亮度信息和图像强度更多分配在第 4 子场。通过程序仿真四场和三场局域基色去饱和算法的显示效果,设计了主观评分的感知实验来对比两种算法对时序显示图像色彩分裂现象的抑制效果。不同算法和不同分区数都对评分产生了显著影响,评分随着背光分区数增加而降低,两种算法都对色彩分裂现象的抑制效果有显著影响,且四场算法的抑制效果优于三场算法。结果表明,四场和三场局域基色去饱和算法都可以通过增加背光分区数来抑制图像的色彩分裂现象。四场局域基色去饱和算法对时序显示色彩分裂的抑制效果优于原有的三场局域基色去饱和算法。

关键词:时序彩色显示;色彩分裂;四场局域基色去饱和算法;感知实验;分区数

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193408.0772

240Hz color filterless LCD with suppressed color breakup

WANG Ping, ZHANG Yu-ning*, LI Guang-xuan, GENG Di

(*International Joint Research Laboratory for Information Display and Visualization,
School of Electronic Science and Engineering, Southeast University,
Nanjing 210096, China*)

Abstract: The field-sequential-color display has the advantages of high resolution and low power consumption compared to the traditional spatial sub-pixel display but it is deeply troubled by color breakup. Solving this problem is crucial for the development of the field-sequential-color display. Based on the 240 Hz liquid crystal display, 4-field local-primary-desaturation algorithm is proposed in this paper. The center of gravity is selected as the fourth backlight color, and distributes the luminance information and image intensity more in the fourth subfield. The simulation results of the 4-field and 3-field local-primary-desaturation algorithm are simulated by the program. Perception experiments are designed to evaluate the suppression effect of two algorithms on the color breakup of target images. Different algorithms and different partition numbers have significant influence on the score. The score decreases with the increase of the number of backlight partitions. Both algorithms have a significant

收稿日期:2019-04-12;修订日期:2019-05-30.

基金项目:南京市产学研合作后补助项目(No.201722003)

Supported by Subsidy Project after Industry-University-Research Cooperation in Nanjing (No.201722003)

* 通信联系人, E-mail:zyn@seu.edu.cn

effect on the suppression of color breakup, and the suppression effect of 4-field local-primary-desaturation algorithm is better than 3-field. The results show that 4-field and 3-field local-primary-desaturation algorithm can effectively suppress the color breakup of images by increasing the number of back-light partitions. Compared with the 3-field local-primary-desaturation algorithm, 4-field local-primary-desaturation algorithm can suppress the color breakup more effectively.

Key words: field-sequential-color display; color breakup; 4-field local-primary-desaturation algorithm; perception experiment; partition number

1 引言

时序彩色(Field-Sequential-Color, FSC)显示以高于人眼临界融合频率的高刷新率顺序显示多个子场来实现颜色融合,由于人眼的视觉残留效应和大于人类视觉系统时间敏锐度的显示帧频,最终能将多个子场图像在视觉系统中融合并重建,复现彩色图像内容^[1]。时序彩色显示技术应用时间混色原理,不同于传统的空间子像素混色显示技术^[2]。由于时序彩色显示器没有滤色片和子像素,其光透射率、发光效率和空间分辨率都高于空间子像素混色显示器,可以实现高分辨率、高发光效率和低功耗。

当人眼与图像间存在相对速度时(可由眼跳运动或平滑追踪移动物体引起),会导致子场图像无法在视网膜上完全重合,人眼将感知到图像中出现彩虹般的条纹,尤其在图像中物体边缘处,这种现象称为色彩分裂(Color Breakup, CBU)。色彩分裂现象会降低图像质量,影响观察者对图像的判断甚至引起观察者的不适,其是时序彩色显示器在广泛使用前必须克服的核心问题。提高液晶显示屏的刷新率能有效抑制色彩分裂,但要求刷新频率高于 600 Hz 时人眼才能完全察觉不出色彩分裂^[3],但提高刷新率的方法对显示器的硬件要求较高。近年来,在不同文献中提出了一些不需要额外硬件要求的理论模型和算法,例如局域基色去饱和(Local-Primary-Desaturation, LPD)算法和 RGBW 算法等^[3-6]都被证明了能有效抑制色彩分裂现象。

已有的局域基色去饱和算法一般应用于 3 子场显示,本文提出了一种四场局域基色去饱和算法(4-field Local-Primary-Desaturation, 4-field LPD),与三场局域基色去饱和算法(3-field Local-Primary-Desaturation, 3-field LPD)相比

增加了第 4 子场显示。本文提出的新算法重点关注第四子场背光基色和液晶驱动信号的确定、与前 3 个子场的联系以及完整显示的仿真过程。并将本文提出的算法应用于时序显示图像,通过主观评分实验,邀请被试对实验图像的色彩分裂严重程度进行评分,以评价四场局域基色去饱和算法对时序显示图像色彩分裂的抑制效果。

2 算法与仿真

2.1 四场局域基色去饱和算法

色彩丰富的自然图像中所有像素点的色坐标几乎全部覆盖在 sRGB 色域范围内,4-field LPD 将图像适当分区,基于每个分区的图像内容可知各分区内像素点色坐标在色度图上的分布情况,由此可确定新的小色域三角形。如图 1 所示,图像“鹦鹉”中所有像素点色坐标分布在 CIE1931 色度图中 RGB 区域内(黑色实线),而部分“鹦鹉”图像(黑色方框区域)像素点色坐标分布在较小的

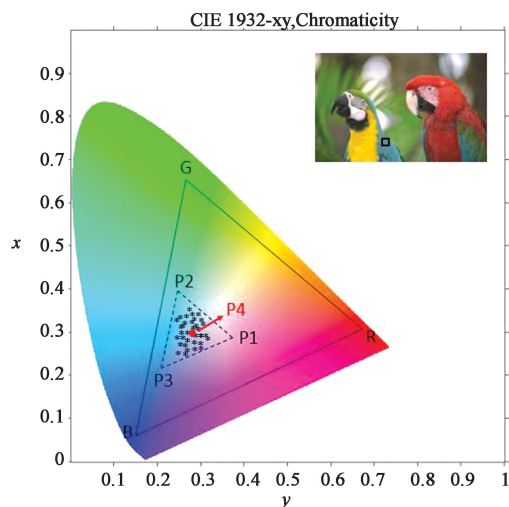


图1 四场局域基色去饱和算法背光基色选择
Fig.1 Backlight base color selection of 4-field Local-Primary-Desaturation

新色域范围内(即 P1P2P3 虚线三角形),其包含了该分区像素点的所有目标颜色。将 P1P2P3 新色域三角形的顶点作为该分区前 3 个子场的背光基色,子场背光采用 LED 矩阵式背光。第四子场的背光基色 P4 的色坐标和由该分区图像中所有像素点色坐标的加权平均值确定,即式(1)所示。以第 n 个分区为例,该分区共有 m 个像素点,表示第 i 个像素点的色坐标。

$$x_n = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}, y_n = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \quad (1)$$

每个分区的四场背光基色确定后,可得到如图 2(a)列所示的网格图,每一小方格表示不同分区,具有不同的背光基色。通过高斯函数式(2)对分区背光进行匀光处理。 I 为分区间有明显网格边缘的图像, I_σ 为无网格边缘的背光轮廓图像,图 2(b)列即为高斯模糊处理后消除网格效应的背光轮廓。

$$I_\sigma = I * \left[\frac{1}{2\pi\sigma} \exp(- (x^2 + y^2) / 2\sigma^2) \right] \quad (2)$$

单个分区的子场背光基色 P1、P2、P3 和 P4 对应各自的三刺激值,设背光基色 P1 的三刺激值为 (X_1, Y_1, Z_1) , P2 的三刺激值为 (X_2, Y_2, Z_2) , P3 的三刺激值为 (X_3, Y_3, Z_3) , P4 的三刺激值为 (X_4, Y_4, Z_4) 。设目标三刺激值为该分区图像中某个像素点颜色(即最终需复现的目标像素点颜色)的三刺激值。已知减小子场间色差能有效抑制色彩分裂现象^[4],从色度图上可以看出第四场背光基色分别与前三场背光基色相差最小,所以本文提出将亮度和颜色信息在合理范围内尽可能多分布在第四场,即对第四场液晶透过率进行条件约束。则该像素点的液晶驱动信号可由式(3)决定,分别表示目标像素点的四场液晶驱动信号:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{\text{target}} \\ Y_{\text{target}} \\ Z_{\text{target}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \\ 0 \leq T_4 \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

通过上述算法的计算公式可知真实的时序彩色显示器工作过程大致如下:各个分区的四场背光基色通过 LED 矩阵式背光源^[7-9]显示,应用匀

光模组^[7]处理后得到无网格效应的背光轮廓,再将四场液晶驱动信号赋给液晶模组,既可复现目标彩色图像并实现动态调节。但目前市场上尚缺少无滤色片的液晶显示器,所以本文是基于有滤色片显示器进行的算法仿真。仿真程序中,得到四场的背光信息(图 2(b)列)和液晶驱动信号(图 2(c)列)后,还需计算出四场的子场图像用于顺序显示。以第一场子场图为例:假设第一子场中某个像素的液晶驱动信号为 T ,该像素所在分区的第一场背光基色三刺激值为 (X_1, Y_1, Z_1) ,可由式(4)得出该像素在第一子场图中的三刺激值,同理也可得到其余像素点的颜色信息。最终得到四个子场的子场图(图 2(d)列),通过时间混色即可得到目标图像。

$$\begin{bmatrix} X_{F1} \\ Y_{F1} \\ Z_{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} T \quad (4)$$

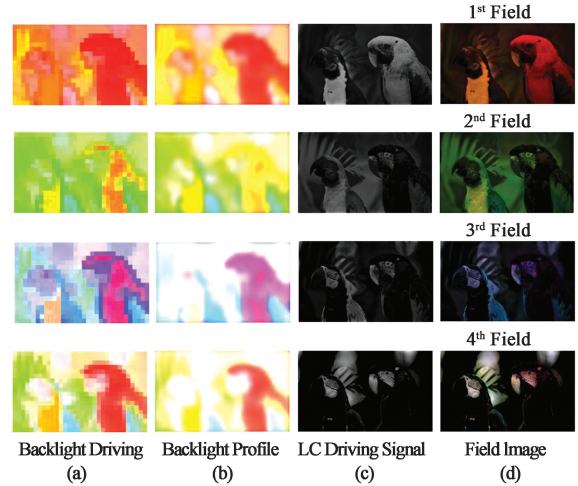


图 2 四场局域基色去饱和算法仿真流程

Fig.2 Simulation process of 4-field Local-Primary-Desaturation

3 实验方案

为了评估该算法抑制色彩分裂的效果,进行了模拟仿真实验。实验平台主要包括 FPGA 开发板和 BENQ XL2540 240 Hz 液晶显示器。由于提高液晶显示屏的刷新率能有效抑制色彩分裂,所以使用现有的刷新率尽可能高的液晶显示屏进行实验。使用 FPGA 控制 4 个子场图顺序显示图像内容,平均每个子场图的刷新率为 60 Hz。应用局域基色去饱和算法处理时序显示图像并得到完整的仿真

过程,将分区数设为 1×1 、 16×9 、 32×18 、 48×27 、 64×36 ,选取 6 幅图像进行实验(图 3),目标图像分辨率为 960×540 ,显示在屏幕中央。图 3(a)具有高对比度和大面积的低饱和色区域;图 3(b)和图 3(c)总体颜色饱和度不高,对比度低,细节信息丰富;图 3(d)和(e)对比度高,低饱和色和高饱和色区域兼有,图像内容丰富;图 3(f)色彩饱和度高,颜色丰富。保证局域基色去饱和算法处理后的目标图像仿真图与原图色坐标公差在 ± 0.01 以内。将 6 幅实验图像用四场和三场局域基色去饱和算法处理后,进行主观实验。一幅目标图像对应 5 种分区数和两种处理算法,所以实验中共 60 幅目标图像需被试者评价。

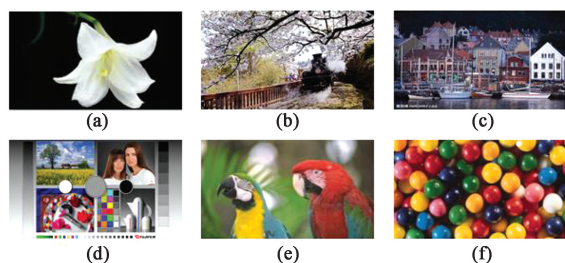


图 3 用于仿真实验的 6 幅目标图像

Fig.3 Six target images for simulation experiment

16 名被试者参与了本次实验,包括 6 名女性,10 名男性,年龄在 22~26 岁之间。所有被试者均具有正常视力或矫正后达到相应标准视力,无色盲。正式实验前每位受试者需进行预实验,实验在标准暗室中(环境光 $< 0.51x$)进行。受试

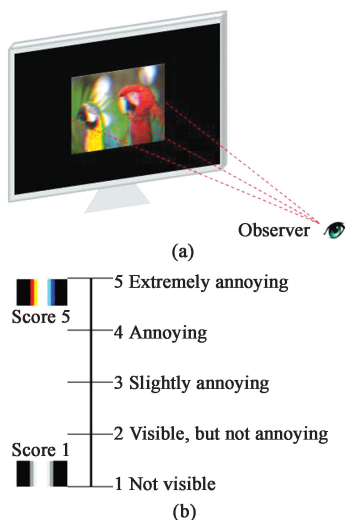


图 4 实验设置(a)及评分等级(b)

Fig.4 Experiment setting (a) and rating (b)

者与屏幕的距离为 3 倍图像高度,实验设置如图 4(a)所示。被试者对屏幕图像进行快速左右扫视并对目标图像的色彩分裂严重程度做出评分^[10],评分范围为 1~5 分,评分等级如图 4(b)所示。实验开始前被试者先左右扫视两幅白块图,如图 4(b)所示,一白块图由 3 个白色子场通过时间混色形成,无色彩分裂现象,定义为 1 分;另一白块图由红绿蓝 3 个子场通过时间混色形成,色彩分裂严重,定义为 5 分。

4 实验结果与分析

实验得到了不同算法和不同分区情况下不同被试者对不同目标图像的评分。对所得数据进行单因素方差分析,所得结果表明不同算法和不同分区数都对评分产生了显著影响(图 5)。16 名被试者对应用四场算法处理后的目标图像评分结果如图 6 所示。随着分区数的增加,被试者的主观评分降低,即更不易察觉到色彩分裂现象。对于四场局域基色去饱和算法,其分区数没有上限,背光分区数越大,对图像色彩分裂现象的抑制作用越显著。四场和三场局域基色去饱和算法对评分都产生显著影响,两种算法的评分对比如图 7 所示。从实验结果可以看出,四场算法所得总体评分均值和每种分区情况下评分均值都小于三场算法。若要达到相同评分,四场局域基色去饱和算法相比于三场算法所需分区数更少,四场算法的抑制效果优于三场算法。

	平方和	df	均方	F	显著性
组间 (组合)	123.267	1	123.267	174.725	.000
线性项 对比	123.267	1	123.267	174.725	.000
组内	675.857	958	.705		
总数	799.124	959			

(a)

	平方和	df	均方	F	显著性
组间 (组合)	317.072	4	79.268	157.039	.000
线性项 对比	225.518	1	225.518	446.777	.000
偏差	91.554	3	30.518	60.460	.000
组内	482.052	955	.505		
总数	799.124	959			

(b)

图 5 单因素方差分析结果。(a)不同算法;(b)不同分区数。

Fig.5 One-way ANOVA analysis results. (a) Different algorithms; (b) Different number of partitions.

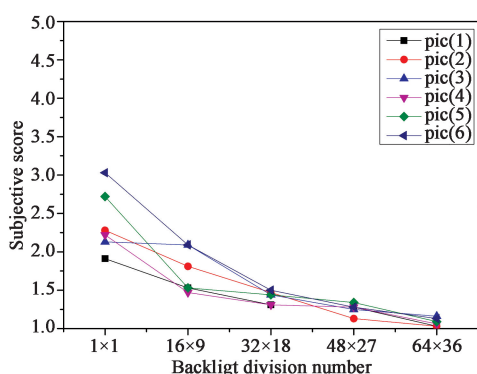


图 6 四场局域基色去饱和算法的目标图像 CBU 评分

Fig.6 CBU score of target images for 4-field local-primary-desaturation

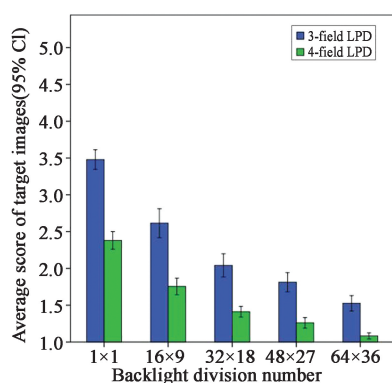


图 7 三场和四场局域基色去饱和算法的平均 CBU 评分

Fig.7 Average CBU score for 3F-LPD and 4F-LPD

随着背光分区数增多,背光系统成本也将增加。实际应用中无法对图像进行过多分区,在权衡背光系统成本与图像画质的前提下,背光分区数为 496 时较为合理^[6]。当背光分区数为 496 时,不仅能有效抑制图像色彩分裂现象,提升图像画质,还能保证合理的背光系统成本,综合效果最优。显然,在分区数为 496 时,应用四场局域基色去饱和算法的各图像色彩分裂评分都较低,抑制色彩分裂现象效果显著。

5 结 论

本文基于 240 Hz 液晶显示屏提出了四场局域基色去饱和算法,选取了重心点为第四场背光基色,并计算了 4 个子场的液晶驱动信号及仿真实验所用子场图,仿真了时序显示图像的完整过程。选取 6 幅图像分别设置 5 种分区数,并设计了视觉感知实验来评价四场和三场局域基色去饱和算法对时序显示图像色彩分裂现象的抑制效果,实验结果表明不同算法和不同分区数都对评分产生了显著影响。通过增加背光分区数可以有效抑制色彩分裂现象。四场局域基色去饱和算法抑制图像色彩分裂的效果优于三场局域基色去饱和算法。在权衡背光系统成本与图像画质的前提下,实际图像无法进行过多分区,较为合理的分区数为 496,此时四场局域基色去饱和算法对图像色彩分裂的抑制效果显著。

参 考 文 献:

- [1] YOHSOA, UKAI K. How color break-up occurs in the human-visual system; the mechanism of the color break-up phenomenon [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(12): 1127-1133.
- [2] 李继军,聂晓梦,甄威,等.显示技术比较及新进展[J].液晶与显示,2018,33(1):74-84.
LI J J, NIE X M, ZHEN W, et al. New developments and comparisons in display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 74-84. (in Chinese)
- [3] ZHANG Y N, LANGENDIJK E H A, HAMMER M, et al. A hybrid spatial-temporal color display with local-primary-desaturation backlight scheme [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(12): 665-673.
- [4] LIN F C, ZHANG Y N, LANGENDIJK E H A. Color breakup suppression by local primary desaturation in field-sequential color LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(2): 55-61.
- [5] ZHANG Y N, LIN F C, LANGENDIJK E H A. A field-sequential-color display with a local-primary-desaturation backlight scheme [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2011, 19(3): 258-264.
- [6] 汤景浪,张宇宁,王坚.矩阵背光时序彩色显示中背光分区数与色彩分裂现象的关系探究[J].光电技术,2018,38(1):14-18.
TANG J L, ZHANG Y N, WANG J. Research on relationship between color breakup and backlight division num-

- ber for LPD algorithm [J]. *Optoelectronic Technology*, 2018, 38(1): 14-18. (in Chinese)
- [7] 郝剑,荆雷,王尧,等.阵列型紫外 LED 匀光照明系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022003.
HAO J, JING L, WANG Y, *et al.* Design of uniform illumination for array LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022003. (in Chinese)
- [8] 张鹤,朱钧,赵燕,等.一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2668-2673.
ZHANG H, ZHU J, ZHAO Y, *et al.* A design of light guide plate for direct illumination of largesided liquid crystal panel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2668-2673. (in Chinese)
- [9] 王尧,荆雷,党博石,等.用于液晶显示屏幕检测的大口径小角度 LED 光源设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022002.
WANG Y, JING L, DANG B S, *et al.* Design of LED source with large aperture and small view angle used in the LCD detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022002. (in Chinese)
- [10] QIN Z, LIN Y J, LIN F C, *et al.* Image content adaptive color breakup index for field sequential color displays using a dominant visual saliency method [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(2): 85-97.

作者简介:



王 萍(1994—),女,硕士研究生,2017年于上海大学获得学士学位。主要从事时序显示及人眼视觉感知方面的研究。E-mail: wangping_977@163.com



张宇宁(1981—),男,博士,硕士生导师,副教授,2008年于东南大学获得博士学位,主要从事基于新型显示和照明技术的光环境构建与感知研究。E-mail: zyn@seu.edu.cn