

提高图像亮度的子像素着色算法

冯俊¹ 严利民² 夏明治²

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072

²上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200072

摘要 介绍了两种 RGBW 排列结构的子像素着色算法,既保证了与传统 RGB 传统排列一样的分辨率,又提高了图像的亮度。图像处理过程包含两个算法:RGB 到 RGBW 的转化算法和 RGBW 的子像素着色算法。RGB 到 RGBW 的转化算法使图像获得新的 RGBW 数据,可在保证原 RGB 排列图像的色彩饱和度的同时提高图像的亮度,RGBW 的子像素着色算法使图像更加逼真柔和,减少锯齿感。仿真结果表明,所提出的 RGBW 排列及着色算法可明显提高图像亮度。

关键词 成像系统; 图像亮度; 子像素着色算法; RGB; RGBW

中图分类号 TN27 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091101

Sub-Pixel Rendering Algorithm of Improving Image Brightness

Feng Jun¹ Yan Limin² Xia Mingzhi²

¹ School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

² Microelectronics R&D Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Two sub-pixel rendering algorithms of RGBW arrangement structure are proposed. The algorithms can keep the same resolution as traditional RGB arrangement, and improve the image brightness. The image processing includes two algorithms: mapping algorithm from RGB to RGBW and sub-pixel rendering algorithm of RGBW. The image receives new RGBW data from mapping algorithm of RGB to RGBW, and the algorithm improves the image brightness and keeps the color saturation. Sub-pixel rendering algorithm of RGBW makes the image realistic and soft, and it can reduce jagged sense. Simulation results show that the proposed RGBW arrangement and rendering algorithm can significantly improve the image brightness.

Key words imaging systems; image brightness; sub-pixel rendering algorithm; RGB; RGBW

OCIS codes 110.2960; 110.2990; 110.3010

1 引言

现在的显示屏一般采用三基色显示系统,即红(R)、绿(G)、蓝(B)系统。然而,随着大屏手机的出现和显示技术的不断发展,这种传统的三基色显示系统的缺点逐渐浮现,已无法满足人们日益提高的需求。例如:1)显示屏幕越来越大,用户对显示屏所显示图像的色彩饱和度和细节要求也越来越高,而三基色系统可覆盖的色域较窄,已很难再提高其显示质量;2)用户在户外使用电子设备的频率越来越高,传统的三基色排列在太阳下看不清图片的问题凸显,因而对显示屏亮度的要求也逐渐提高,而三基色显示屏很难做到在不增加功耗的基础上提升显示屏幕的亮度。对此,2006年,在日本横滨的平面显示器展上,Clair Voyante公司首次展出了 RGBW PenTile™ 排列方式的高分辨率穿透式和半穿透半反射式显示屏,成为了第一个实现

收稿日期: 2016-04-20; **收到修改稿日期:** 2016-05-15; **网络出版日期:** 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61376028)

作者简介: 冯俊(1991—),男,硕士研究生,主要从事新型显示驱动技术方面的研究。E-mail: 774391719@qq.com

导师简介: 严利民(1971—),男,博士,副教授,主要从事平板显示驱动技术方面的研究。

E-mail: yanlm@shu.edu.cn(通信联系人)

RGBW 系统硬件显示的公司;2010 年,夏普公司提出了创新的 Quad-Pixel 技术,使得 AQUOS 电视可显示的色彩增加了一千倍。Quad-Pixel 技术在原有的 RGB 三原色子像素基础上添加了黄色子像素,从而形成了 RGBY 四基色子像素排列。ClairVoyante 公司提出的 RGBW 排列和夏普公司提出的 RGBY 排列相比传统三基色 RGB 排列分别增加了白色子像素和黄色子像素,使得显示的色域更广、颜色更加丰富,同时又可以很好地提高图像的亮度。在此基础上,多基色显示技术应运而生^[1-8]。

本文介绍的 RGBW 四基色子像素排列方法和着色算法,能够有效地解决上述传统的三基色显示所面临的问题。既能保证在色彩不失真的情况下提高图像的亮度和显示质量,又能在提高亮度和显示质量的同时保持与传统 RGB 排列同样的分辨率,且不增加功耗。

2 像素排列

目前,平板显示屏幕有多种像素排列的方式,主要分三基色的子像素排列和多基色的子像素排列。三基色的排列主要有条纹式排列、Delta 排列、Mosaic 排列等,多基色的排列主要有条纹式 RGBW 排列和三星公司的 PenTile 排列。图 1 为传统的条纹式 RGB 排列^[9],图像清晰度高、显示细腻。图 2 为 Delta 排列^[10],可以较好地展现图像中不规则的曲线,且开口率较高,适合显示自然景物图像。图 3(a)为 RGBR Mosaic 排列,图 3(b)为对角线 Mosaic 排列^[11],适合应用于运动图像,例如体育馆等大视角、远距离、高速度的画面显示。图 4 为条纹式 RGBW 排列^[12],加入了白色子像素,因而条纹式 RGBW 排列总体增加了 1/3 的子像素,每个像素包含了 4 个子像素,增加了数据线的数量,因此要求子像素尺寸更小,对工艺方面的要求更高,但图像显示亮度明显提高。图 5 为三星公司的 PenTile RGBW 排列^[13],这种排列可以减少 1/3 的数据线数量,可提高孔径比、降低成本。图 6 为本文着色算法 1 的 RGBW 排列,这种排列方式既保证了与传统 RGB 排列相同的分辨率,又提高了亮度。图 7 为本文着色算法 2 的 RGBW 排列,这种排列与图 6 的 RGBW 排列相比,图像的亮度更高。

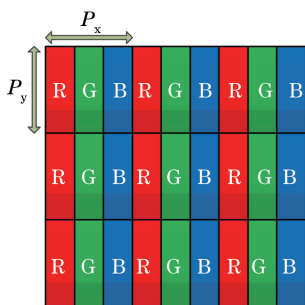


图 1 条纹式 RGB 排列

Fig. 1 Stripe RGB arrangement

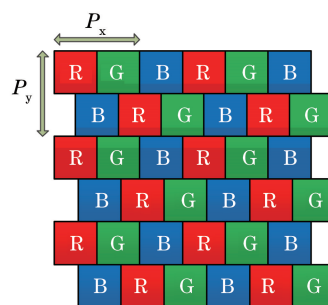


图 2 Delta 排列

Fig. 2 Delta arrangement

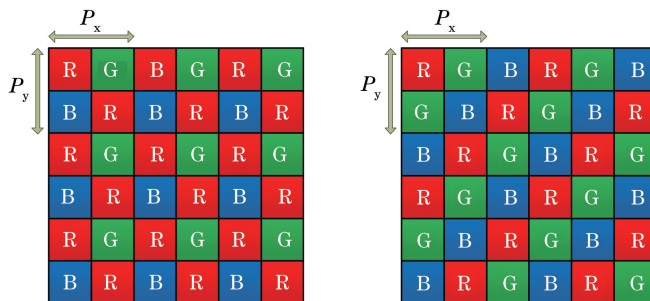


图 3 (a) RGBR Mosaic 排列;(b)对角线 Mosaic 排列

Fig. 3 (a) RGBR Mosaic arrangement; (b) diagonal Mosaic arrangement

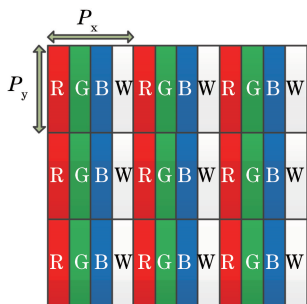


图 4 条纹式 RGBW 排列

Fig. 4 Stripe RGBW arrangement

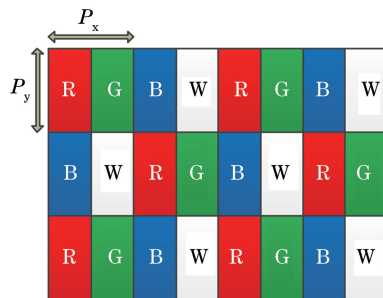


图 5 三星公司的 PenTile 排列

Fig. 5 Samsung PenTile arrangement

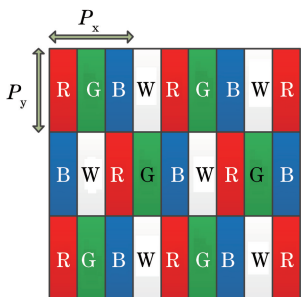


图 6 着色算法 1 的 RGBW 排列

Fig. 6 RGBW arrangement of rendering algorithm 1

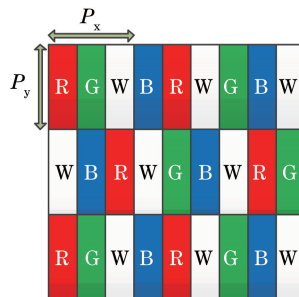


图 7 着色算法 2 的 RGBW 排列

Fig. 7 RGBW arrangement of rendering algorithm 2

3 RGB 到 RGBW 的转换算法

RGBW 多基色显示技术对亮度和显示质量的提高起着至关重要的作用,然而,目前市场上主流的视频或图像数据传输信号仍以 RGB 三基色信号为主,如何将输入的 RGB 三基色信号,转为 RGBW 多基色输出信号,即 RGB 至 RGBW 的色域转换算法,是实现多基色显示系统的基础^[14-16]。

色域转换的基本方法是通过各种数学方法计算出源色域与目标色域之间的关系式,将源色域内每种颜色一一映射到目标色域中,实现这种方法的算法被称为色域转换算法(GMA)。

实现 RGBW 系统转换算法的常用方案主要有两种:1)以国际照明委员会(CIE) 1931 XYZ 系统为中介,采用数学计算的方式,将源 RGB 数据映射至 CIE 1931 XYZ 系统后,通过逆映射实现目标 RGBW 的数据信号计算^[17];2)直接提取白色分量的方法,根据色彩的非线性特性从源 RGB 信号中扣除该分量的值,得到目标 RGBW 的数据^[18]。

本文提出了新的 RGB 到 RGBW 的转换算法,相比于前两种有更好的转换效果。

3.1 色域转换算法介绍

色域转换算法采用直接提取亮度分量的方式,确定 W 的值并进行调整得到 W',将转换后的 RGB 数据减去 W'分量的值即可得到目标数据^[19-20]。

该算法的原理:白色可以由 R、G、B 三原色等比例混合,因此,由输入信号中 R、G、B 的最小值即可得到 W 分量,首先将白色分量进行调整得到 W',再将源数据中的 R、G、B 减去处理后的白色分量 W'的值即可得到输出数据的 R₀、G₀、B₀ 值,W₀ 的值取 W'的值。

1)输入原图像的每个像素 R、G、B 的数值。

2)获得图像转换算法的加权值 M 为

$$M = \frac{\min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} \tag{1}$$

3)计算白色子像素 W 值为

$$W = \min(R, G, B) \tag{2}$$

4)对 R, G, B, W 的值进行调整,计算得到 R_w, G_w, B_w, W' 的值为

$$\begin{cases} R_w = (1 + M) \times R \\ G_w = (1 + M) \times G \\ B_w = (1 + M) \times B \\ W' = 255 \times (W/255)^\alpha, \alpha < 1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 α 为非线性转换因子,其值一般取 $0.8 \sim 1$ 。

5)计算转换算法最终转换后的输出 R_o, G_o, B_o, W_o 的值为

$$\begin{cases} R_o = R_w - W' \\ G_o = G_w - W' \\ B_o = B_w - W' \\ W_o = W' \end{cases} \quad (4)$$

3.2 三种算法方案的效果对比

图 8 为 4 种不同转换算法效果对比图,图 8(a)~(d)分别为条纹式 RGB 排列图、文献[17]中的转换算法效果图、文献[18]中的转换算法效果图、本文转换算法效果图。图 8(a)~(d)的平均亮度值分别为 31.4, 54.9, 41.2, 43.2。结合平均亮度数据及图片仿真结果可以看出,文献[17]中的转换算法相比较图 8(a)的传统 RGB 排列,虽然提高了亮度,但图像颜色变化较大,失真比较严重,文献[18]中的转换算法相比较图 8(a)的传统 RGB 排列,在保证图像有较好显示效果的情况下提高了亮度,本文转换算法在保证图像的显示效果和提高亮度方面比文献[18]中的转换算法更优越,图像饱和度更好。

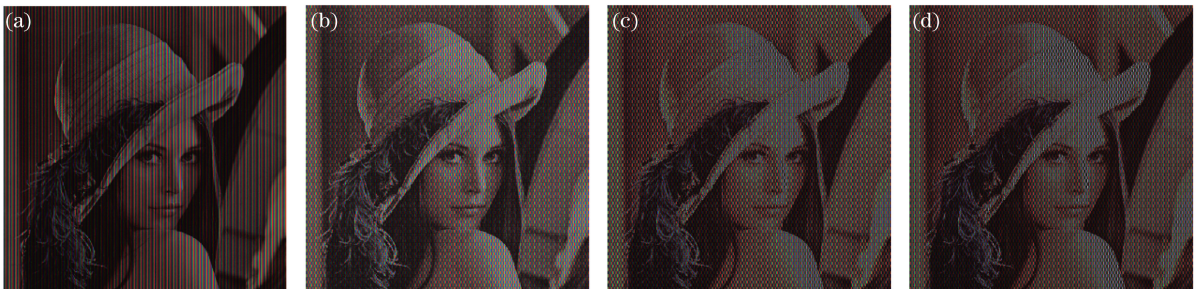


图 8 4 种不同转换算法效果对比图

Fig. 8 Comparison of four different mapping algorithms

4 子像素着色算法

子像素的着色算法是对得到的 R_o, G_o, B_o, W_o 进行着色运算。着色后得到新的 RGBW 排列与传统 RGB 排列具有相同的分辨率,即在相同的分辨率下,用 RGBW 子像素来显示原来传统 RGB 三子像素显示的信息,保留了原图像的所有信息并提高了图像亮度和图像质量。

在本文算法中涉及三种子像素,即着色子像素、转换子像素和借用于像素。着色子像素是需要进行着色算法运算的子像素,转换子像素是直接传递给着色算法运算后的子像素,借用于像素是需要被下一个像素借用的子像素。

图 9 为本文算法的总流程图。首先将 RGB 通过转换算法转换成 RGBW,然后分别用两种着色算法得到最终的 RGBW 值。通过仿真模拟,该子像素着色算法能有效提高图像的亮度。

4.1 着色算法 1

着色算法 1 有 4 种不同结构的像素(即 RGB、GBW、BWR 和 WRG),如图 10 所示,这 4 种排列结构的像素都是通过着色算法的借用方案进行着色得到的。RGBW 排列的着色算法的最小重复单元如图 11 所示。

以图 10(a)举例,其他三种情况同理可得,具体着色步骤如下。

1)在得到的 R_o, G_o, B_o, W_o 子像素中,可将 R_o 定义成着色子像素,将 G_o 和 B_o 定义成转换子像素,将 W_o 定义成借用于像素。

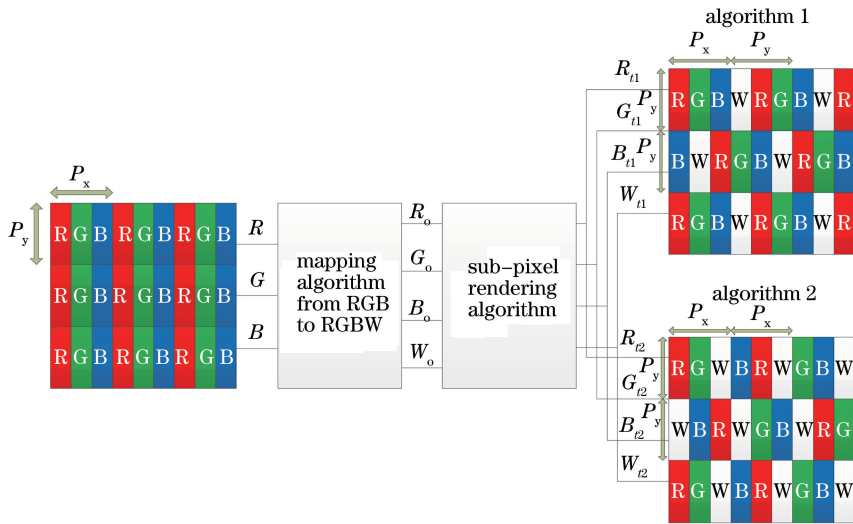


图 9 着色算法过程总流程图

Fig. 9 Total flowchart of rendering algorithm

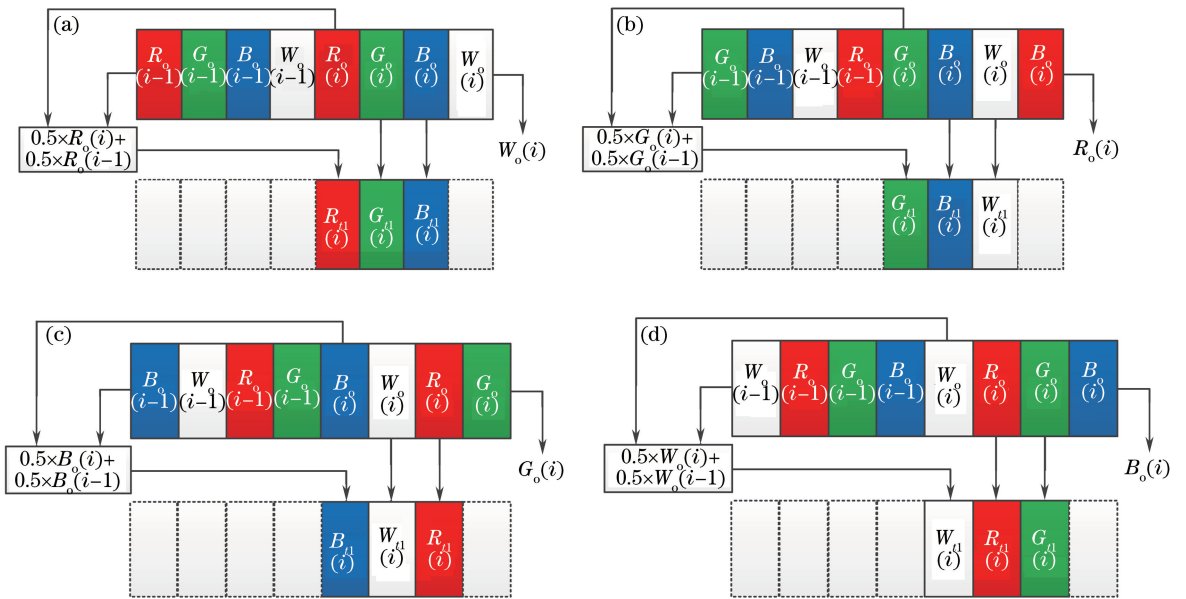


图 10 着色后的 4 种排列的像素。(a) RGB 排列；(b) WRG 排列；(c) BWR 排列；(d) GBW 排列

Fig. 10 Pixel of four arrangements after rendering. (a) RGB arrangement; (b) WRG arrangement;

(c) BWR arrangement; (d) GBW arrangement

2) 计算 $R_{t1}(i)$ 的值为

$$R_{t1}(i) = \frac{R_o(i-1) + R_o(i)}{2} \tag{5}$$

3) 将两个转换子像素 $G_o(i)$ 、 $B_o(i)$ 的值直接给着色后的子像素 $G_{t1}(i)$ 和 $B_{t1}(i)$ ，即

$$\begin{cases} G_{t1}(i) = G_o(i) \\ B_{t1}(i) = B_o(i) \end{cases} \tag{6}$$

在此即已得到着色后的子像素 R_{t1} 、 G_{t1} 、 B_{t1} 的值。

4) 将借用子像素 $W_o(i)$ 留给下一个白色子像素借用，也即

$$W_{t1}(i+1) = \frac{W_o(i) + W_o(i+1)}{2} \tag{7}$$

5) 以此类推，可分别得到其他三种子像素排列(WRG、BWR、GBW)的着色后像素值。

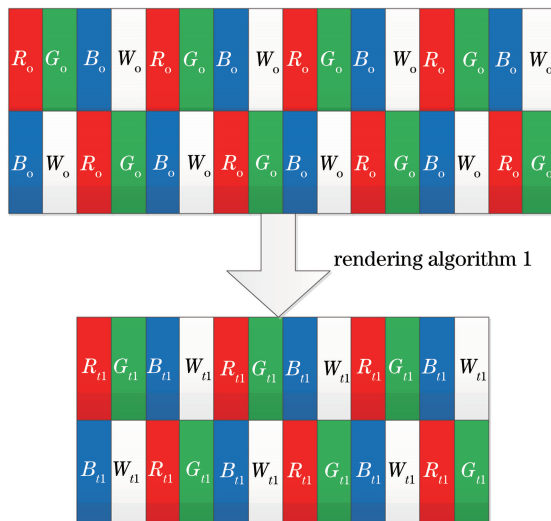


图 11 着色算法 1 的最小重复单元

Fig. 11 Minimal repeating unit of rendering algorithm 1

4.2 着色算法 2

着色算法 2 有 3 种不同结构的像素(RGW、BRW、GBW),如图 12 所示,这 3 种排列结构的像素都是通过着色算法的借用方案进行着色得到的。该 RGBW 排列的着色算法的最小重复单元如图 13 所示。

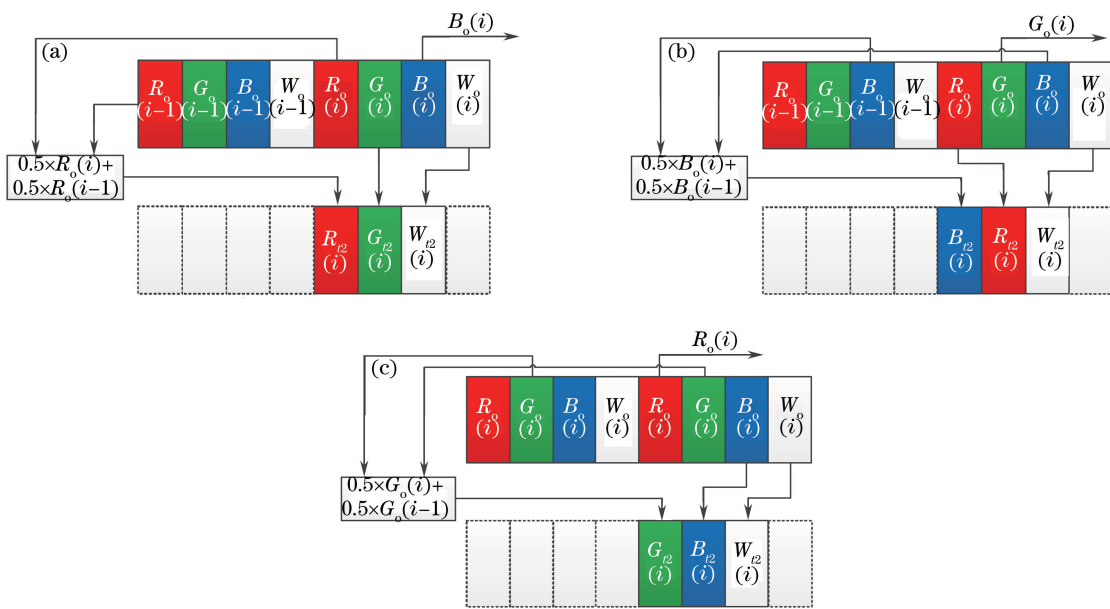


图 12 着色后三种排列的像素。(a) RGW 排列;(b) BRW 排列;(c) GBW 排列

Fig. 12 Pixel of three arrangements after rendering. (a) RGW arrangement after rendering; (b) BRW arrangement; (c) GBW arrangement

以图 12(a)举例,其他两种情况同理,具体着色步骤如下。

1)在得到的 R_o, G_o, B_o, W_o 子像素中,可将 R_o 定义成着色子像素,将 G_o 和 W_o 定义成转换子像素,将 B_o 定义成借用子像素。

2)计算 $R_{i2}(i)$ 的值为

$$R_{i2}(i) = \frac{R_o(i-1) + R_o(i)}{2} \tag{8}$$

3)将两个转换子像素 G_o, W_o 的值直接给着色后的子像素 $G_{i2}(i)$ 和 $W_{i2}(i)$,即

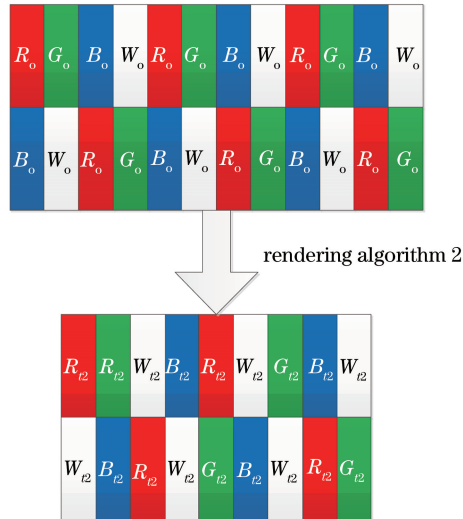


图 13 着色算法 2 的最小重复单元

Fig. 13 Minimal repeating unit of rendering algorithm 2

$$\begin{cases} G_{t2}(i) = G_o(i) \\ W_{t2}(i) = W_o(i) \end{cases}, \quad (9)$$

在此即已得到着色后的新逻辑像素 R_{t2} 、 G_{t2} 和 W_{t2} 的值。

4) 将借用子像素 B_o 留给下一个蓝色子像素 B_o , 即

$$B_{t2}(i+1) = \frac{B_o(i) + B_o(i+1)}{2}. \quad (10)$$

5) 以此类推, 可分别得到其他两种子像素排列 BRW 和 GBW 的着色后像素值。

5 子像素转换及着色算法的仿真实验

使用 $1152 \text{ pixel} \times 384 \text{ pixel}$ 的文字测试图(即多基色算法字样)和 $1548 \text{ pixel} \times 1548 \text{ pixel}$ 的 Lena 图像测试图, 对其进行 RGB 信号进行提取, 并通过 RGB 到 RGBW 转换算法和两种着色算法, 分别计算出着色后 RGBW 的值, 验证这两种 RGBW 排列的着色算法, 既能够保证图像的分辨率和清晰度, 又能很好地提高图像亮度。

5.1 文字测试

图 14 为实验得到的文字测试结果比较图, 其中图 14(a)~(c) 分别为传统 RGB 排列、着色算法 1 的 RGBW 排列、着色算法 2 的 RGBW 排列的远观显示效果图。由图 14 可以看出, 着色算法 1 可以在色彩不失真的情况下, 较好地提高原图像的亮度, 着色算法 2 可以在色彩不失真的情况下, 更好地提高原图像的亮度。图 15 为三种排列的近观显示效果比较图, 截取了“算”字的近观图, 其中图 15(a)~(c) 分别为传统 RGB 排列、着色算法 1 的 RGBW 排列、着色算法 2 的 RGBW 排列的近观显示效果图。

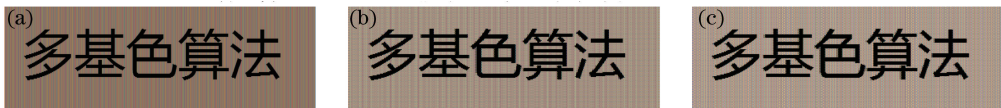


图 14 三种排列的远观对比图

Fig. 14 Far view comparison chart of three arrangements.

5.2 图像测试

图 16 为实验得到的 Lena 图像测试结果比较, 其中图 16(a)~(c) 分别为传统的条纹式 RGB 排列、着色算法 1 的 RGBW 排列、着色算法 2 的 RGBW 排列的远观显示效果图, 图 16(d)~(f) 分别为传统的条纹式 RGB 排列远观图、着色算法 1 的 RGBW 排列远观图、着色算法 2 的 RGBW 排列远观图的灰度级数图。由

图 16(d)~(f)可以看出,图像以 0~255 每隔一定距离进行取样,子像素着色算法 1 灰度级低的相比条纹式 RGB 排列要少,而灰度级高的相比条纹式 RGB 排列要多;同样,子像素着色算法 2 灰度级低的相比子像素着色算法 1 要少,而灰度级高的相比子像素着色算法 1 要多,另外,通过计算三张图像的平均亮度值分别为 31,41,43。因此,子像素着色算法 1 的亮度比条纹式 RGB 排列高,子像素着色算法 2 的亮度又比子像素着色算法 1 的亮度高。由图 16(a)~(c)中可以看出,着色算法 1 相比条纹式 RGB 排列,较好地提高原图像的亮度,着色算法 2 更好地提高原图像的亮度,但柔和感和清晰度相较着色算法 1 要低。图 17 为三种排列的近观显示效果比较图,由于 Lena 图下巴部位包含了多种颜色,所以截取了 Lena 图的下巴部位的近观图,其中图 17(a)~(c)分别为传统 RGB 排列、着色算法 1 的 RGBW 排列、着色算法 2 的 RGBW 排列的近观显示效果图。

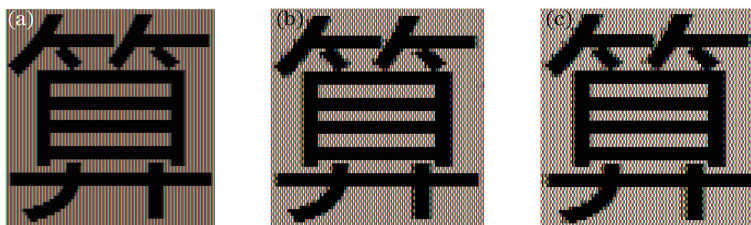


图 15 三种排列的近观对比图

Fig. 15 Close view comparison chart of three arrangements

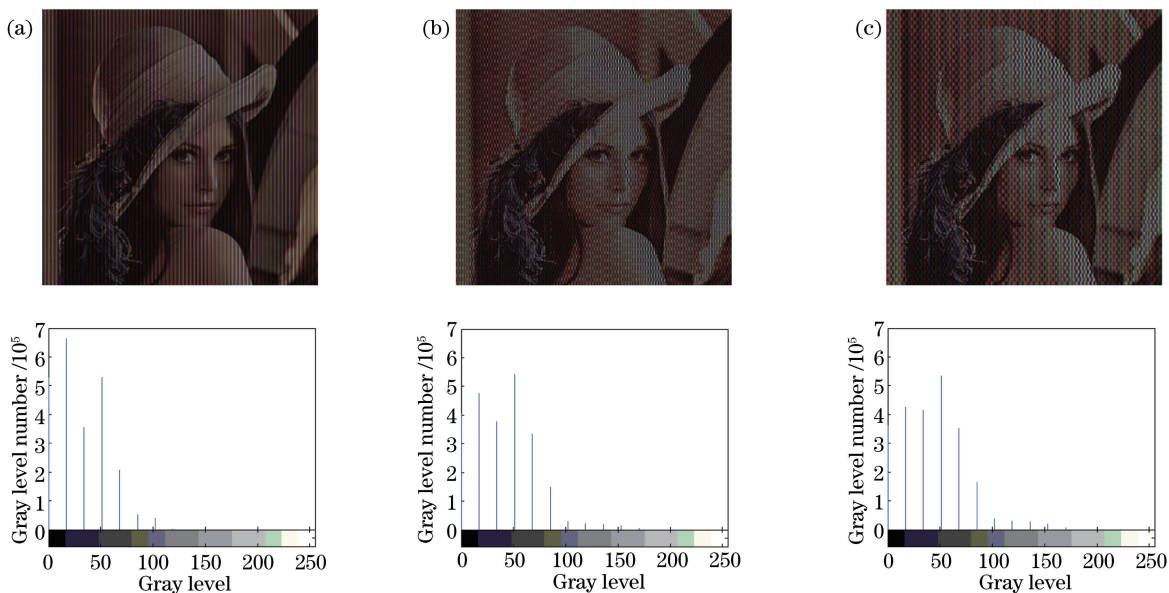


图 16 三种排列的远观对比图及灰度级数对比图

Fig. 16 Far view comparison chart and gray-level number comparison chart of three arrangements

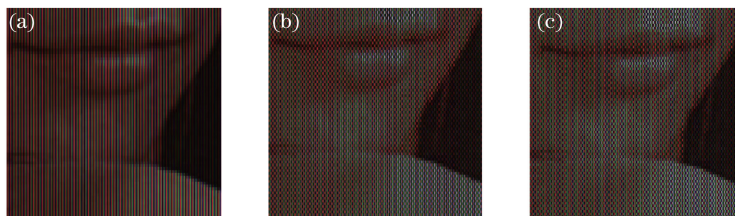


图 17 三种排列的近观对比图

Fig. 17 Close view comparison chart of three arrangements

5.3 多种排列比较对比图

以像素数为 516×516 的传统条纹式 RGB 排列图像为基准,对条纹式 RGBW 排列、三星公司 PenTile

排列、着色算法 1 的 RGBW 排列以及着色算法 2 的 RGBW 排列等 4 种子像素排列方式在数据线数量、扫描线数量、子像素数量、工号以及亮度 5 个方面进行了比较,表 1 列出了对比的结果,可以看出,加入白色子像素的排列亮度都有不同程度的提高,但条纹式 RGBW 排列的子像素数增加 1/3,功耗也增加,这就加大了制造工艺的难度,并且增加了成本。三星公司的 PenTile RGBW 排列子像素减少了 1/3 并且提高了亮度,降低了功耗。着色算法 1 的 RGBW 排列在保持与传统 RGB 排列相同的子像素和不增加功耗的情况下,提高了亮度且提高亮度后的图像有很好的饱和度和柔和感。着色算法 2 的 RGBW 排列在保持与传统 RGB 排列相同的子像素和不增加功耗的情况下,显著提高了亮度。

在显示相同的图像信息时,两种子像素着色算法 1、2 的 RGBW 排列所需的子像素数比三星 PenTile RGBW 排列所需的子像素数多 1/3,但在图像失真度方面比三星的 PenTile RGBW 排列高,且显示的亮度也比三星的 PenTile RGBW 排列高。着色算法 1 的亮度提高度比着色算法 2 低,失真度比着色算法 2 高,各有优点。

表 1 5 种不同子像素排列方式的性能对比

Table 1 Performance comparison of five different sub-pixel arrangements

Sub-pixel arrangement	Stripe RGB arrangement	Stripe RGBW arrangement	Samsung PenTile arrangement	Proposed rendering algorithm 1	Proposed rendering algorithm 2
Data channel number	516×3	516×4	516×2	516×3	516×3
Scan channel number	516	516	516	516	516
Sub-pixel number	516×516×3	516×516×4	516×516×2	516×516×3	516×516×3
Power consumption	As a benchmark	Increase	Decrease	Remain the same	Remain the same
Average brightness values	31.4	41.2	39.7	40.6	43.2

6 结 论

研究了 RGB 至 RGBW 的转换算法,并提出了两种子像素着色算法,在保证图像显示质量的同时很好地提高了图像的显示亮度。对三星的 PenTile RGBW 和所提出的两种子像素着色算法进行比较,各有优劣势,在显示相同信息量图片的情况下,三星 PenTile RGBW 排列比本文算法所需子像素少,功耗低,但本文着色算法的失真度比三星 PenTile RGBW 排列低。另外,本文两种子像素着色算法也各有优劣势,着色算法 2 亮度提高度比着色算法 1 高,但着色算法 1 的清晰度和柔和感更好。

参 考 文 献

- Liu Zuxi. The research for led multi-primary display feature [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
刘祖希. LED 多基色显示特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- Cheng Yan. The research for some key problem of multi-primary display device [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
程 琰. 多基色显示设备颜色再现一些关键问题的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Huang Hanqi. The research for gamut mapping based on wide color gamut display device [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
黄汉奇. 基于宽色域显示设备的色域映射研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- Li Zhiguang, Wu Qiong, Wang Hui, *et al.* Computer integrated circular-viewing plane color hologram [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1109003.
李志光, 吴 琼, 王 辉, 等. 计算集成平板周视彩色全息图 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1109003.
- Fang Yong, Zhang Yingsong, Wu Huaxia, *et al.* Depth anti-aliasing algorithm based on classified mapping for volumetric true-3D display [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0233001.
方 勇, 张应松, 吴华夏, 等. 基于分类映射的真三维显示深度抗锯齿算法 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0233001.
- Cao Qipeng, Ye Zhao, Dong Xiaojing, *et al.* A method of focusing of foreign space camera based on image evaluation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011102.

- 曹启鹏, 叶 钊, 董小静, 等. 基于图像评价的国外空间相机调焦方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011102.
- 7 Wu Yiquan, Shi Junpeng. Image enhancement in non-subsampled Contourlet transform domain based on multi-scale Retinex[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0310002.
吴一全, 史骏鹏. 基于多尺度 Retinex 的非下采样 Contourlet 域图像增强 [J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0310002.
- 8 Zhou Liping, Chen Zhaoliang, Gao Wanrong. Inter pixel shift technique for increasing imaging depth of frequency domain optical coherence tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021701.
周丽萍, 陈朝良, 高万荣. 像素平移法提高频域光学相干层析成像深度 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021701.
- 9 Lee B W, Park C, Kim S, *et al.* 40.5 L: Late-news paper: TFT-LCD with RGBW color system [C]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2003, 34(1): 1212-1215.
- 10 Elliott C. Active matrix display layout optimization for sub-pixel image rendering[J]. Clair Voyante Laboratories, USA, 2000: 1-5.
- 11 Hara Z I, Terazaki N, Shiramatsu N, *et al.* Picture quality of different pixel arrangements for large-sized matrix displays [J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 1994, 77(7): 105-120.
- 12 Lee B W, Song K, Yang Y, *et al.* 9.2: Implementation of RGBW color system in TFT-LCDs [C]. SID Symposium Digest of Technical Papers 2004, 35(1): 111-113.
- 13 Yoon H J, Lee J H, Hong K P, *et al.* P-6: Development of the RGBW TFT-LCD with data rendering innovation matrix (DRIM) [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2005, 36(1): 244-247.
- 14 Ding Baixiu. Research on LED color gamut transformation based on polynomial regression and approximation [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
丁柏秀. 基于多项式回归逼近的 LED 显示色域变换技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- 15 Gu Yifan, Liu Zhen, Zhu Ming. Gamut mapping algorithm based on Laplace of Gaussian function [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 95-98.
顾轶凡, 刘 真, 朱 明. 基于高斯拉普拉斯算子的色域映射算法 [J]. 包装工程, 2014, 35(9): 95-98.
- 16 Yang Lu, Liu Zhen, Wu Mingguang. Research on image-dependent gamut mapping algorithms [J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(3): 11-17.
杨 露, 刘 真, 吴明光. 与图像相关的色域映射算法研究 [J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(3): 11-17.
- 17 Higgins M F, Credelle T L. Systems and methods for implementing improved gamut mapping algorithms: U. S. 8013867 [P]. 2011-09-06.
- 18 Sato M, Ogawa M, Nakakusu T, *et al.* Liquid crystal display apparatus: US5042921 [P]. 1991-8-27.
- 19 Feng Jun, Yan Liming, Chen Jing. A colorgamut optimization algorithm for RGB to RGBW conversation [J]. Optoelectronic Technology, 2015, 35(2): 135-139.
冯 俊, 严利民, 陈 静. 一种 RGB 到 RGBW 的色域转换优化算法 [J]. 光电子技术, 2015, 35(2): 135-139.
- 20 Yan Liming, Chen Jing, Feng Jun. Brightness improvement of flat panel display using sub-pixel structure and mapping algorithm [J]. Optoelectronic Technology, 2015, 35(4): 241-245.
严利民, 陈 静, 冯 俊. 一种提高平板显示器亮度的子像素结构及其映射算法 [J]. 光电子技术, 2015, 35(4): 241-245.