

基于多尺度区域混色的 RGB 欠采样图像颜色错误评价

赵小明^{*①} 邵晓鹏^① 张建奇^① 周筱媛^②

^①(西安电子科技大学技术物理学院 西安 710071)

^②(西安科技大学计算机科学与技术学院 西安 710054)

摘要: 针对彩色阵列显示设备中由于采用亚像素寻址技术引起的颜色错误问题, 该文提出了一种定位和量化的方法。基于人眼空间混色特性, 指出颜色误差的度量应在多尺度混色区域下进行。以亚像素矩形排布为例, 从点阵理论的结构基元出发, 设计多尺度混色区域的形状与大小, 实现了颜色错误的定位与量化。分析和实验表明, 以多尺度区域混色颜色误差为基础的自适应颜色误差消除法在弱化颜色错误的同时保持了更多原有图像的细节。

关键词: 图像处理; 亚像素寻址; 颜色错误; RGB 欠采样图像; 多尺度区域混色

中图分类号: TN873

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2071-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00088

Objective Assessment of the Color Errors in RGB Undersampled Images Based on Color Blending of Multi-scale Region

Zhao Xiao-ming^① Shao Xiao-peng^① Zhang Jian-qi^① Zhou Xiao-yuan^②

^①(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(School of Information and Computing, Institute of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A novel method of locating and quantifying the color errors introduced by subpixel addressing technology in color matrix displays is proposed. According to the spatial color blending of human visions, the paper indicates that the measurement of color errors should be performed within multi-scale region of color blending. Taking rectangular arrangement of subpixels as an example, the shape and size of the multi-scale blending region is designed base on the structure basis of lattice theory, and color errors' locating and quantifying is achieved. Analysis and experiments show that the adaptive method of eliminating color errors based on the multi-scale blending region can keep more original image details while weaken color errors efficiently.

Key words: Image processing; Subpixel addressing; Color error; RGB undersampled image; Color blending of multi-scale region

1 引言

空间分辨率是衡量显示设备显示质量的重要参数。提升分辨率的最直接方法就是增加显示阵列的密度与规模。然而这样的做法必然导致设备成本的攀升, 且受到制造工艺的限制, 很多显示设备(如 LED 显示屏)的点阵密度不可能做得很小。因此如何以较低的成本提高设备的显示分辨率, 使之能够显示高质量的画面成为显示行业的研究焦点之一。

彩色阵列显示设备(Color Matrix Display, CMD)的物理像素都是由在空间上分离且可单独寻址的三基色(红、绿、蓝)亚像素按照某种组合排列方式(SubPixels Arrangement, SPA)聚集而成。若抛

开物理像素的束缚以亚像素作为显示、处理的基本单位, 在制造成本不变的情况下相当于增加了点阵密度, 理论上能够提高显示系统的空间分辨率。这就是诸多文献^[1-9]提到的亚像素寻址技术。

根据空间混色理论, 亚像素寻址技术能够产生和源图像基本一致的显示图像, 它是 CMD 优化图像显示质量的主要发展与研究方向。然而, 实际应用及大量实验表明, 由于亚像素的单基色属性, 使得其在展示图像的细节内容时会出现背离于原始图像的颜色错误。这是影响亚像素寻址广泛应用的主要问题。

为了减少亚像素寻址后可能发生颜色错误的区域, 目前普遍的做法^[1-6]是在寻址之前对整幅图像做低通预处理, 虽然减弱或消除了颜色错误但却不同程度的模糊了整个高频子图像。因此, 本文认为

2012-02-02 收到, 2012-04-24 改回

中央高校基本科研业务费专项资金资助课题

*通信作者: 赵小明 xzmzh@mail.xidian.edu.cn

消除颜色错误的方法应该是一种自适应的方法,其运算应该仅针对发生颜色错误的区域。然而颜色错误的区域判定及评测还停留在主观评价阶段,客观上缺乏有效的计算手段和衡量体系,涉及的文献很少。文献[3]定义的颜色误差度量主要基于主观调查与心理学实验,带有一定的片面性,且仅适合于非彩色图像的字体渲染中。文献[6]在 YUV 颜色空间中,对 U, V 分量计算亚像素寻址与像素寻址后结果图像间的 PSNR。文献[7]将显示颜色与目标颜色和背景颜色在色品图上的距离作为评价指标。这些方法均未考虑亚像素(像素)的位置,及与位置有关的小片区域中的颜色混合,即没有考虑人眼视觉系统(Human Vision System, HVS)的空间混色特性。

为了保持图像清晰度的同时,更加准确、高效的减弱或消除亚像素寻址后显示图像的颜色错误,本文结合 HVS 特性,提出了多尺度区域混色的颜色错误评测方法。分析和实验表明该方法不仅实现了颜色错误的判定与量化,而且其统计参数还可以作为衡量各种 SPA 的重要指标。

2 亚像素寻址图像显示的颜色错误

信号显示是一个涉及到信号捕捉、采样、寻址、显示重构等多个环节的综合性问题。图 1 为 CMD 接收输入的数字图像信号,简称源图像 I_s ,经过寻址和重构后形成显示输出信号,简称显示图像 I_d 。寻址过程负责将 I_s 中的像点定位到设备的物理像素上形成寻址后的图像简称 I_a 。显示重构负责将 I_a 根据需要做进一步处理,并转换成显示图像所需的光强 I_d 。若将 I_s 中的像点以亚像素位置寻址,则由于亚像素的单基色特性,使得寻址后的图像实际上是一幅 RGB 欠采样图像。

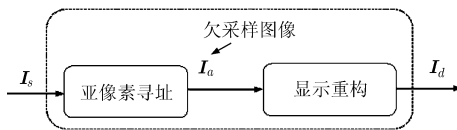


图1 CMD 采用亚像素寻址的信号显示处理模型

2.1 亚像素寻址及 RGB 欠采样图像

为满足亚像素寻址及空间混色的需要,SPA 都是 3 种单基色亚像素交错排列的某种重复布局。图 2(a)为两种常见的矩型 SPA。图 2(b)是纯白色图像分别在这两种排布下放大后的显示效果。

在 RGB 颜色空间中,彩色数字图像是一个具有 3 个分量(R, G, B)的矢量函数 $I_s^{[10]}$ 。

$$I_s(x, y) = [R_s(x, y), G_s(x, y), B_s(x, y)]^T$$

亚像素寻址后, $I_a(x, y) = C(x, y) \cdot I_s(x, y)$ 。不同的

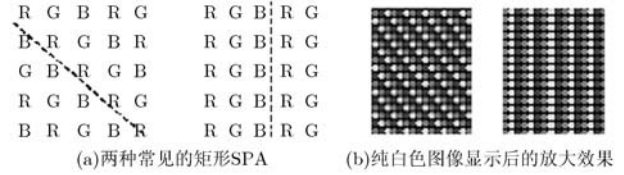


图2 亚像素寻址技术中的常见矩型 SPA

SPA, 滤波阵列 $C(x, y)$ 的取值关系不同。比如对对角线型 SPA 的 $C(x, y)$ 按如下关系取值:

$$C(x, y) = \begin{cases} (1, 0, 0), & x \bmod 3 = i \text{ 且 } y \bmod 3 = i \\ (0, 1, 0), & x \bmod 3 = i \text{ 且 } y \bmod 3 = i + 1 \\ (0, 0, 1), & x \bmod 3 = i \text{ 且 } y \bmod 3 = i + 2 \\ & i = 0, 1, 2 \end{cases} \quad (1)$$

因此, I_a 是一幅 RGB 颜色空间上的欠采样图像。

显然, I_a 中点 (x, y) 与 I_s 对应点间存在很大的色差。此时, 相当于非常近距离的观察显示图像, 看到的是一个一个的色点, 如图 2(b) 所示。而在适当距离以外观看时由于空间混色的出现, 人眼会感知到和源图像基本一致的颜色。因此, 空间混色应是对 I_a 颜色错误评测时考虑的一个重要因素。文中的讨论, 如无特殊说明, 都以适当的观看距离为前提。

另外, 源图像中颜色对比越强的地方空间混色效果越不理想, 对应到 I_a 就是可能出现颜色错误的区域。颜色错误具体是否出现及出现的位置还与 SPA 的排列结构有关。

2.2 RGB 欠采样图像的颜色错误

以对角线型 SPA 为例, 根据形成直线的斜率将排布方向分为水平、垂直、对角线和反对角线, 分别用 $d=1, 2, 3, 4$ 表示^[11]。记 R^d, G^d, B^d 表示不同方向上相应亚像素的个数, 则对某个大于 1 但非常接近 1 的实数 r , 有

$$\frac{1}{r} \leq \frac{R^d}{G^d}, \frac{G^d}{B^d}, \frac{B^d}{G^d} \leq r, \quad d \neq 3 \quad (2)$$

当原始图像边缘线宽小于 $3p_x$ (即输入频率大于 SPA 的 Nyquist 频率) 时, 式(2)在对角线方向 ($d=3$) 上不成立, 即 RGB 配比极不均衡, 导致混色不正常。正是 SPA 的这种布局缺陷使得亚像素寻址后的欠采样图像在不同位置处会出现颜色错误, 如图 3 中用箭头标记处。

因此, 尽可能保持图像清晰度的前提下, 消除颜色错误应该先定位颜色错误, 计算颜色错误的程度, 然后设法减弱或消除。本文结合 HVS 特性提出了一种多尺度区域混色的颜色错误定位与量化方法。

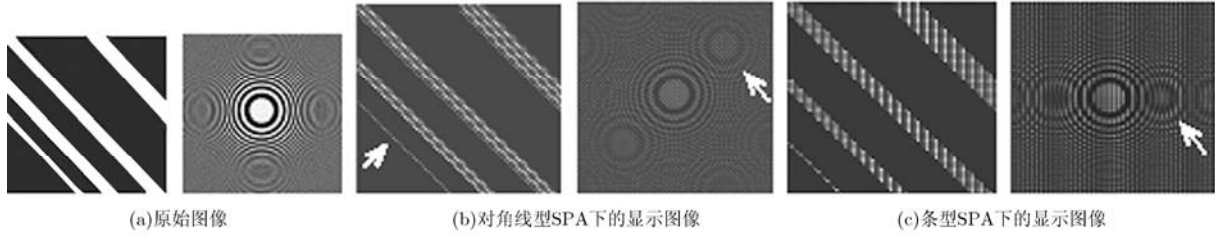


图 3 不同输入频率的原始图像分别在对角线型、条型 SPA 下的显示结果

3 多尺度颜色错误评价方法

人类视觉系统亮度细节分辨力是彩色细节分辨力的 4 倍^[8]。任意 CMD，在适当观察距离以外感知的颜色信息都是以观察焦点为中心的小片区域内各像点共同作用的结果。且随着观看距离和人眼视场的变化，显示图像在人眼中发生混色的区域应该是一个多尺度的积分区域，如图 4 所示。颜色错误的评价结果也应与尺度有关，如在小尺度下颜色正确的区域在大尺度下颜色未必正确，反之亦然。

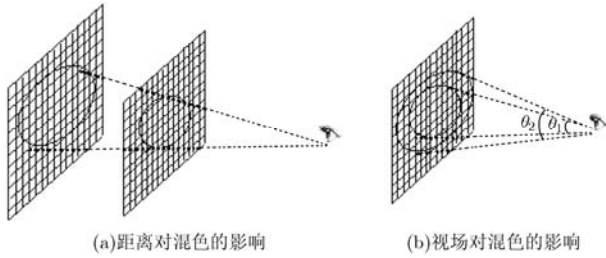


图 4 对人类视觉区域混色的多尺度模拟

3.1 多尺度混色区域的确定

SPA 结构可以用点阵理论的结构基元来描述。结构基元指重复周期中的具体内容^[12]，于是 SPA 结构=点阵+结构基元。SPA 的结构基元有多种取法。图 5(a)显示了对角线型 SPA 的最小结构基元及相应的点阵。

考虑到 HVS 各向同性的特点，混色区域应为各方向最小结构基元的闭包。于是对角线型 SPA 在最小尺度下的混色区域，记 W_1 为图 5(b)所示结构基元覆盖下的区域。若 p_x, p_y 分别为水平、垂直点间距，

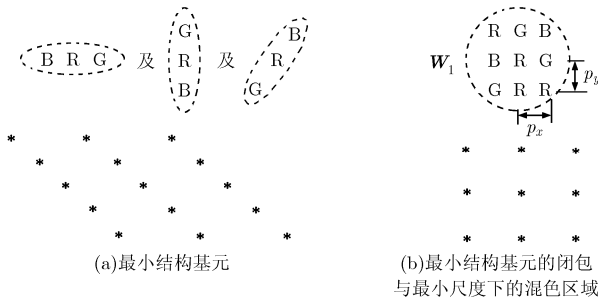


图 5 对角线型 SPA 的结构基元

且 $p_x=p_y$ ，则 W_1 实际上为半径等于 $\sqrt{2} p_x$ 的圆。

随着观看距离的加大，混色区域的规模也随之调整。沿着 SPA 的拓展方向，不妨令尺度增量为 $1p_x$ ，则下一尺度下的混色区域 W_2 为 $\sqrt{5} p_x$ 圆，如图 6 所示。 W_3 为 $\sqrt{13} p_x$ 的圆。

依此类推，混色区域可根据需要确定是否在下一尺度下继续扩大。

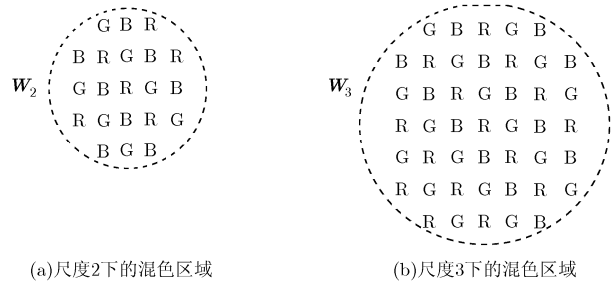


图 6 对角线型 SPA 不同尺度下的混色区域

3.2 多尺度混色区域内颜色差计算

如前描述，模拟人眼混色的区域是多尺度区域。下面仍以对角线型 SPA 为例，描述多尺度区域的颜色差计算方法。

3.2.1 区域内颜色混合模拟 在尺度 $j=1$ 时，对 $M \times N$ 的图像，忽略其边界，依次对像点 $\{(x, y), 1 < x < M-1, 1 < y < N-1\}$ 进行如下运算。

若将 (x, y) 视为观察焦点，则图 7 中粗虚线框所示的尺度 1 下的混色区域 W_1 形成了一个 $n \times n$ 的掩膜，记为 w 。显示图像与源图像的颜色差为包含像点 (x, y) 的任意相应 $n \times n$ 区域(如图 7 中细虚线框所示)的颜色差最小值。

对寻址后的欠采样图像 I_a ，设 H 为 w 作用于像点 (x, y) 计算该区域混色后各颜色分量的算子，混色后反映到人眼中的效果计为 I_a^α 。

$$\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y) = H[I_a^{j,\alpha}(x, y)] \tag{3}$$

其中上标 j 代表尺度， α 代表掩膜 w 内不同元素对准像点 (x, y) 时所覆盖的区域。例如当 w 左下角元素对准 (x, y) 时， α 为图 7 中右上角细虚线框所覆盖的区域。

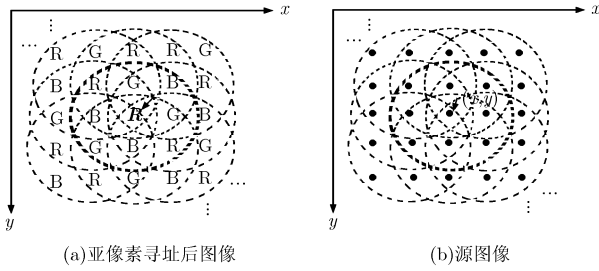


图7 在尺度 $j=1$ 下, 关于像点 (x, y) 颜色错误的区域判定

$I_a^{j,\alpha}(x, y)$ 中各颜色分量累积后的值如式(4)所示, 掩膜 w 的不同元素对准像点时, s, t 根据所覆盖的区域取值也不同。

$$\tilde{\gamma}_a^{j,\alpha}(x, y) = \sum_s \sum_t w(s, t) \gamma_a^{j,\alpha}(x + s, y + t) \quad (4)$$

其中 $\{s, t \in \alpha \mid -j \cdot 2 \leq s, t \leq j \cdot 2 \text{ 且 } |t| \neq j \cdot 2, \text{ 当 } j \neq 1, |s| = j \cdot 2\}$, $\gamma = r, g, b$ 。

出于简单性, 若不计像点间距对混色的影响, 令 $w(s, t)=1$ 。

对包含像点 (x, y) 局域范围内的颜色信息进行亮度标准化:

$$\tilde{\gamma}_a^{j,\alpha} = \bar{\gamma}_a^{j,\alpha} / (\bar{\gamma}_a^{j,\alpha} + \bar{\gamma}_a^{j,\alpha} + \bar{\gamma}_a^{j,\alpha}), \quad \gamma = r, g, b \quad (5)$$

于是 $\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y)$ 为

$$\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y) = [\tilde{r}_a^{j,\alpha}(x, y), \tilde{g}_a^{j,\alpha}(x, y), \tilde{b}_a^{j,\alpha}(x, y)]^T \quad (6)$$

H 同样作用于源图像相应区域得到 $\tilde{I}_s^{j,\alpha}(x, y) = H(I_s^{j,\alpha}(x, y))$, 如图7(b)所示。

3.2.2 颜色差计算 若将 RGB 空间看作欧氏空间, 则 $\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y)$ 与 $\tilde{I}_s^{j,\alpha}(x, y)$ 间的颜色差可按式(7)计算^[13]。

$$\Delta(\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y), \tilde{I}_s^{j,\alpha}(x, y)) = \sqrt{(\tilde{r}_a^{j,\alpha} - \tilde{r}_s^{j,\alpha})^2 + (\tilde{g}_a^{j,\alpha} - \tilde{g}_s^{j,\alpha})^2 + (\tilde{b}_a^{j,\alpha} - \tilde{b}_s^{j,\alpha})^2} \quad (7)$$

记 $CE^\alpha(x, y) = \Delta(\tilde{I}_a^{j,\alpha}(x, y), \tilde{I}_s^{j,\alpha}(x, y))$ 。

当 I_a 包含 (x, y) 的任一区域颜色与源图像 I_s 中相应区域的感知颜色一致时, 认为该点无颜色错误。因此点 (x, y) 在显示图像中背离原始图像颜色程度的

度量值为包含 (x, y) 任一区域颜色差的最小值。

$$E(x, y) = \min_\alpha (CE^\alpha(x, y)) \quad (8)$$

易知 $E(x, y) \in [0, 1]$ 。

根据需要在尺度 $j=2$ 下重复上述过程, 计算出显示图像各像点与原始图像相应点颜色的相异程度。

从图像整体出发, 可将所有像点在各尺度下颜色误差的统计量——均值、峰值和标准差作为显示图像颜色误差的整体评价指标。

4 实验结果分析

实验中, 选取 3 幅包含不同特征信息的图像。图8(a)为 128×128 的波带片图像包含各个方向的各种频率信息; 图8(b)为 86×64 的风景图像显示了一幅香港夜景, 其中主要包含大量的单一方向(垂直)边缘; 图8(c)为 128×64 的黑底白字图像, 其局部区域包含特定方向(反对角线、垂直)的边缘。

4.1 各尺度下颜色误差计算结果的对比

表1列出了前述3幅图像分别在对角线型(或反对角线型)、条型SPA下尺度 $j=1, 2$ 时的颜色差均值、峰值和标准差。明显看到, 颜色误差的各种统计值随着尺度的加大而减小, 符合观察距离与空间混色效果的关系。

依据多尺度区域混色颜色误差计算方法, 各像点的颜色误差值介于0到1之间, 将其映射到0-255的灰度空间上, 可将亚像素寻址后的颜色误差可视化。图9(a), 图10(a), 图11(a)分别为这3幅图像在对角线型(或反对角线型)、条型SPA下的欠采样图像 I_a 。图9(b), 9(c)分别为波带片图像在尺度 $j=1, 2$ 时的颜色错误图像。颜色越深说明颜色误差越大。由于篇幅限制, 图10, 图11仅给出风景和文字图像在尺度 $j=1$ 时的颜色错误图像。

4.2 多尺度区域混色的颜色误差对 SPA 的评价作用

颜色错误图像与统计数据表明, 对角线型 SPA

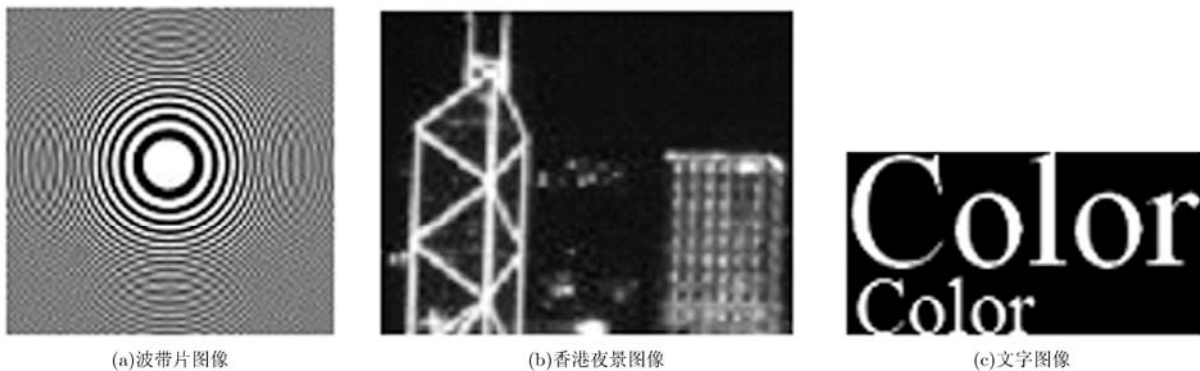


图8 包含不同特征信息的原始图像

表 1 各种原始图像在对角线型、条型 SPA 下欠采样图像 I_a 的颜色误差统计

原始图像	SPA	颜色差均值		颜色差峰值		颜色差标准差	
		尺度 $j=1$	尺度 $j=2$	尺度 $j=1$	尺度 $j=2$	尺度 $j=1$	尺度 $j=2$
波带片	对角线型	0.0610	0.0127	0.3148	0.2588	0.0617	0.0298
	条型	0.0526	0.0121	0.4796	0.3578	0.0758	0.0357
风景	对角线型	0.0140	0.0030	0.1722	0.0419	0.0208	0.0052
	条型	0.0399	0.0159	0.3570	0.1938	0.0552	0.0276
文字	反对角线型	0.0040	0.0010	0.2271	0.0559	0.0159	0.0040
	条型	0.0113	0.0035	0.5062	0.1940	0.0459	0.0144

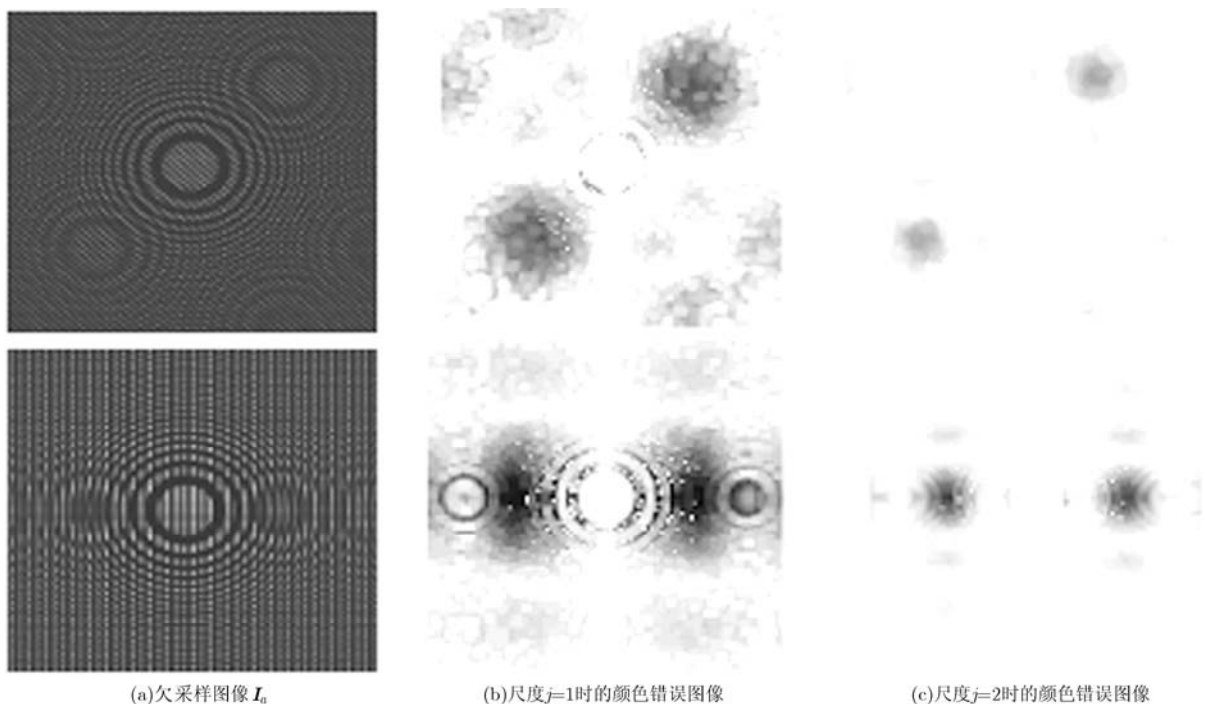


图 9 波带片图像在对角线型、条型 SPA 下欠采样图像 I_a 及尺度 $j=1,2$ 时的颜色错误图像

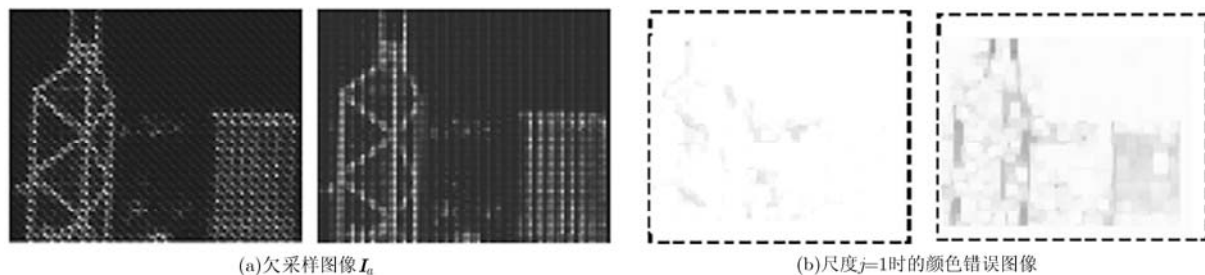


图 10 风景图像在对角线型、条型 SPA 下的欠采样图像 I_a 及尺度 $j=1$ 时的颜色错误图像



图 11 文字图像在反对角线型、条型 SPA 下的欠采样图像 I_a 及尺度 $j=1$ 时的颜色错误图像

具有更好的显示效果,是一种更适合应用亚像素寻址的排布结构。这与文献[2-4]的结论及实际应用一致,表明基于多尺度区域混色思想的颜色误差计算方法可作为 SPA 的评价指标之一。

4.3 自适应颜色误差消除法效果分析

以多尺度区域混色的颜色误差值为基础,对图像中发生颜色错误的局部区域应用滤波运算,能够实现减弱或消除颜色错误的同时较好保持图像整体清晰度的目的,是一种自适应颜色误差消除方法。

图 12 是该方法与其它方法的效果对比。图 12(a) 为对源图像进行 5-tap 滤波后^[3]的仿真结果。图 12 (b) 为根据 SPA 的排布缺陷方向进行方向滤波后^[5]的仿真结果。图 12 (c) 为自适应滤波后的仿真结果。对比看到,自适应滤波后的波带片图像在减弱颜色错误的同时包含更多的图像细节。由于风景图像几乎只包含垂直边缘信息,因此自适应滤波的方法与用另外两种方法效果接近。文字图像中大写字母 C 右下角的颜色问题 3 种方法都予以了消除,但只有自适应滤波方法保持了图像其它区域的清晰度,如字母 o 的上下边缘。

原始图像直接经亚像素寻址后的图像 I_a 具有最高亮度分辨率,因此将各图像转换到 YUV 空间后,在各分量上,以 I_a 为参考计算 I_a' 与各颜色错误消除

法重构后图像 I_a' 的均方误差 MSE,以 PSNR^[10] 作为图像显示质量的一种度量。

$$\left. \begin{aligned} \text{PSNR} &= 10 \times \lg(255^2 / \text{MSE}) \\ \text{MSE} &= \frac{1}{MN} (\|I_a - I_a'\|) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对比看到,自适应滤波法的 PSNR 值大于已有的其它颜色错误消除方法,更好地实现了亚像素寻址图像显示中消除颜色错误的同时尽可能保持图像清晰度的目的。

5 结论

对彩色阵列显示设备而言,基于空间混色的亚像素寻址技术在制造成本不变的情况下能够有效提高设备的显示分辨率。由于亚像素排布的布局缺陷,使得特定的图像细节部分会出现颜色错误。通过降低图像细节的频率虽可以解决颜色错误,但导致即使是混色正常的细节内容也变得模糊。有效定位与评测颜色错误的方法是自适应消除颜色错误的前提。根据人眼视觉特性,提出了以原始图像颜色为基准,模拟人眼混色的区域性颜色误差评测方法。实验和分析表明,该方法能够有效定位和评测矩形 SPA 颜色错误的位置及程度。

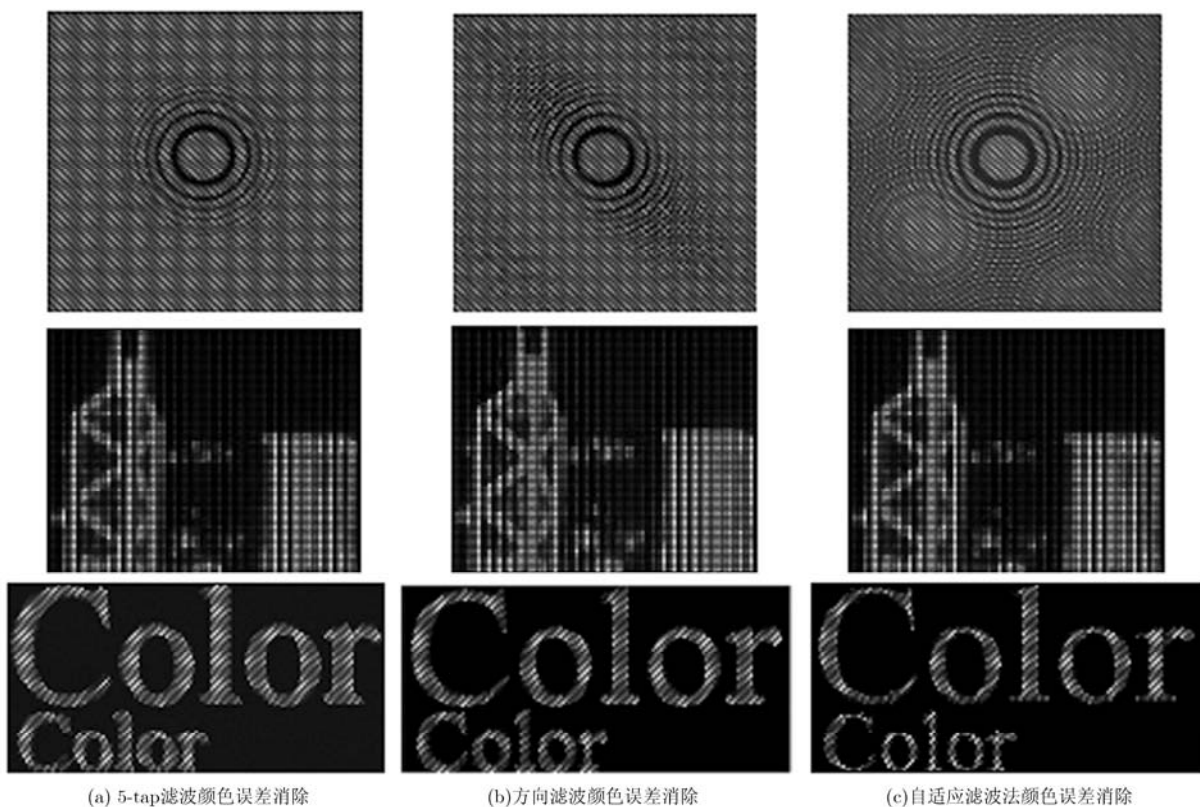


图 12 各种颜色误差消除方法的效果对比

表2 YUV空间下各种颜色误差消除法重构后图像PSNR对比

图像	PSNR(Y)			PSNR(U)			PSNR(V)		
	5-tap 滤波	方向滤波	自适应滤波	5-tap 滤波	方向滤波	自适应滤波	5-tap 滤波	方向滤波	自适应滤波
波带片	14.67	22.07	33.14	16.42	25.09	34.96	13.03	21.68	31.59
风景	19.83	17.59	32.57	21.43	19.22	33.92	17.88	15.62	30.21
文字	24.22	27.56	43.69	25.49	28.50	47.34	22.66	26.25	43.46

彩色阵列显示设备的亚像素排布灵活而多样，若能将从结构基元出发将确定混色区域的思想推广至各种SPA，则会使亚像素寻址技术的应用更加广泛。

参考文献

- [1] Fang Lu, Tang Ketan, Au O C, *et al.*. Anti-aliasing filter for subpixel down-sampling based on frequency analysis[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2011, Prague, Czech Republic, May, 22-27, 2011: 1117-1120.
- [2] Klompenhouwer M A and De Haan G. Subpixel image scaling for color matrix displays[J]. *Journal of the Society for Information*, 2003, 11(1): 99-108.
- [3] Platt J C. Optimal filtering for patterned displays[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, 7(2): 179-181.
- [4] Betrisey C, Blinn J F, Dresevic Bodin, *et al.*. Displaced filtering for patterned displays[C]. Society for Information Display, National Symposium on Information Display, California, USA, 2000, 31: 296-299.
- [5] Gibson S. Sub-pixel font rendering technology[OL]. <http://www.grc.com/cleartype.htm>, 2010, 5.
- [6] Fang Lu and Au O C. Subpixel-based image down-sampling with min-max directional error for stripe display[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(2): 240-251.
- [7] Kutas G, Choh Heui-keun, Kwak Young-shin, *et al.*. Subpixel arrangements and color image rendering methods for multiprimary displays[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, 15(2): 0230021-9.
- [8] Tayeb Medjeldi, Alain Horé, and Djemel Ziou. Enhancement of the quality of images through complex mosaic configurations[C]. International Conference on Image Analysis and Recognition, Halifax, Canada, 2009, 5627: 43-53.
- [9] Brown Elliott C H, Han Seokjin, Im M H, *et al.*. Co-Optimization of Color AMLCD subpixel architecture and rendering algorithms[J]. *Society for Information Display*, 2002, 13(3): 172-175.
- [10] 裴继红, 叶佩玲, 谢维信. 基于四元同质微分的彩色光流估计[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(11): 2614-2619.
Pei Ji-hong, Ye Pei-ling, and Xie Wei-xin. Color optical flow estimation based on quaternion homogeneity differential[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2614-2619.
- [11] 刘正光, 申旭刚, 程彦, 等. 卫星云图结构基元的提取[J]. *天津大学学报*, 2002, 35(5): 551-554.
Liu Zheng-guang, Shen Xu-gang, Cheng Yan, *et al.*. Extraction of structural primitives in satellite image recognition[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, 35(5): 551-554.
- [12] 王淑华. 几何结构因子与“点阵+基元=晶体结构”的关系[J]. *青岛大学学报*, 2000, 13(3): 15-18.
Wang Shu-hua. Relation of geometrical structure factor to “lattice+basis=crystal structure”[J]. *Journal Qingdao University*, 2000, 13(3): 15-18.
- [13] Andreas Koschan, Mongi Abidi 著, 章毓晋译. 彩色数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 69-70.

赵小明: 男, 1974年生, 博士生, 副教授, 从事图像处理、平板显示信号处理与应用方面的研究.

邵晓鹏: 男, 1973年生, 博士, 教授, 从事光电图像处理与模式识别方面的研究.

张建奇: 男, 1960年生, 教授, 博士生导师, 从事光电虚拟现实及红外与光电系统设计方面的研究.