

doi: 10.3788/gzxb20144302.0223001

亚像素采样对 LED 显示质量的提升

周筱媛^{1,2}, 张建奇¹, 赵小明¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 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:清晰显示高分辨率画面是 LED 显示屏图像质量提升领域中亟待解决的关键问题之一. 针对 LED 显示屏分辨率低、成本高、像素排布灵活的特点, 研究了亚像素采样技术在 LED 显示屏中的应用. 从信号处理的角度, 在 RGB 颜色空间中对 LED 显示屏建立了全像素采样和亚像素采样数学模型, 在亮度与色度相分离的空间中对两种采样方式进行了频谱分析, 证明了应用亚像素采样技术可以将显示系统的亮度混叠转移到了人眼较不敏感的颜色通道上, 有效扩展了 LED 显示系统在各方向上的 Nyquist 频率限制. 物理屏体上的仿真实验表明亚像素采样对 LED 显示屏的图像显示质量具有改善作用.

关键词:发光二极管; 显示屏; 像素采样; 亚像素采样; 频域分析; 采样混叠; 亚像素排布

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0223001-6

Subpixel Sampling to the Quality of LED Displays

ZHOU Xiao-yuan^{1,2}, ZHANG Jian-qi¹, ZHAO Xiao-ming¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, 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: Clear display of high-resolution pictures on LED displays is one of key problems to be solved in displaying quality improvement areas. Aiming at the features of LED displays, such as low-resolutions, high production costs and flexible in pixels arrangements, applications of sub-pixel sampling technique were analyzed. Firstly, the mathematical models of LED displays were set up from the information processing perspective. Then under the luminance and chrominance separated space such as YUV color space, by frequency analysis, it was demonstrated that aliasing in display images can be transferred from the luminance to the chrominance which was insensitive to human eyes. The Nyquist limits of them in all directions were effectively expanded. The simulation results on the real LED display further show the improvement of displaying quality by sub-pixel sampling.

Key words: Light Emitting Diodes (LED); Display devices; Pixel sampling; Sub-pixel sampling; Frequency domain analysis; Aliasing; Sub-pixel arrangements

OCIS Codes: 230.3670; 330.6130; 330.7326; 220.2945

0 引言

自 20 世纪 60~70 年代出现平板显示技术以来, 平板显示设备 (Flat Panel Display, FPD), 也称阵列显示设备 (Color Matrix Display, CMD) 在近 10 年中迅猛发展并得到了普及^[1,2]. 其中全彩色 LED 显示屏, 作为

大规模阵列显示的主要产品, 具有发光体亮度高、成像面积大等优点. 相比于其它 CMD 产品, 分辨率低、生产成本高是制约其进一步应用和发展的主要问题. 目前, 各种资源的数字图像普遍具有很高的分辨率, 在 LED 显示屏上显示之前必须缩小其规模, 即首先用适当截止频率的低通滤波器对原始图像进行处理, 然后下采

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. k5051205011) 资助

第一作者: 周筱媛 (1974-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为光电信号处理与平板显示信号处理. Email: 1198641836@qq.com

导师: 张建奇 (1960-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电虚拟现实及红外与光电系统设计. Email: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2013-06-24; 录用日期: 2013-08-09

<http://www.photon.ac.cn>

样到所需大小. 根据信号处理理论, 这一过程必然导致显示图像中丢失很多原始图像的细节. 因此如何更加清晰显示高分辨率画面是 LED 显示屏图像质量提升领域面临的关键问题之一.

与阴极射线管 (Cathode Ray Tube, CRT) 显示器依靠电子束轰击荧光屏发光的那种可调分辨率特点不同的是所有平板显示器只有固定的分辨率. 这是因为它们的面板均由固定的横向纵向线路连接的光源组成. 三基色 LED 管彼此紧密排列, 构成 LED 显示屏上物理像素, 通过加性色彩混合可以产生任何想要的颜色. 三基色点光源通常也称为亚像素 (Sub-pixel), 这些像素或亚像素按一定规律重复, 形成了 LED 的像素或亚像素排布结构.

由于亚像素具有更小的发光面积和更高的排布密度, 因此基于亚像素的图像显示能够获得更好的视觉效果. 目前, 有关亚像素的显示技术已有大量的研究成果. 文献[3-4]描述了亚像素渲染技术在 Windows 7 平台上用于 ClearType 文本显示的过程与结果; 文献[5-6]的研究形成了 ClearType 应用的理论基础; 文献[5-10]从不同的角度设计适用于 LCD 显示器亚像素条形排布的抗颜色混叠滤波器, 以期消除或减弱亚像素采样的颜色边问题; 文献[11]研究了基于亚像素的图像缩放; 文献[12-14]分别从不同方面对亚像素渲染技术在阵列显示设备上的应用进行了研究. 然而, 这些研究与应用几乎都是针对 LCD 显示器一维 RGB 条形排布的. 因此, 结合 LED 显示屏像素构成灵活、多样的特点, 本文提出将亚像素采样技术应用到 LED 显示屏的各种二维排布中, 建立其图像显示的数学模型, 并从理论分析和真实屏体上的实验证明亚像素采样能够有效改善 LED 显示屏图像显示的质量.

1 LED 显示的数学模型及频谱分析

出于简单性, 不考虑颜色, 建立单色显示的数学模型, 然后广展到彩色 LED 显示屏中.

1.1 单色显示的数学模型

形式上, 原始图像 $I_c(x, y)$ 在显示重构之前, 根据显示屏像素规模及排布结构, 经过 2D 空间采样, 产生采样图像 $I_s(x, y)$, 它是连续图像与采样函数的乘积, 即

$$I_s(x, y) = I_c(x, y) \cdot \sum_{n_x, n_y} \delta(x - n_x p_x, y - n_y p_y) \quad (1)$$

$n_x, n_y \in \mathbf{Z}^2$ 且 $x = n_x p_x, y = n_y p_y$

式中 p_x, p_y 分别为水平、垂直像素间距.

重构时显示设备根据采样值确定屏上每个像素的发光强度. 这一过程可用 $I_s(x, y)$ 与点扩散函数 $A(x, y)$ 的卷积来描述. 在空间域, 式(2)建立了仅考虑采样与重构的显示处理模型.

$$I_d(x, y) = I_s(x, y) \cdot A(x, y) = (I_c(x, y) \cdot$$

$$\sum_{n_x, n_y} \delta(x - n_x p_x, y - n_y p_y)) \cdot A(x, y) \quad (2)$$

由于一定的观看距离, 可以将点扩散函数近似为一个 2D 盒函数. 理想情况下, 盒函数的宽和高分别为像素间距 p_x, p_y (如图 1 中的黑色细实线网格所示). 但

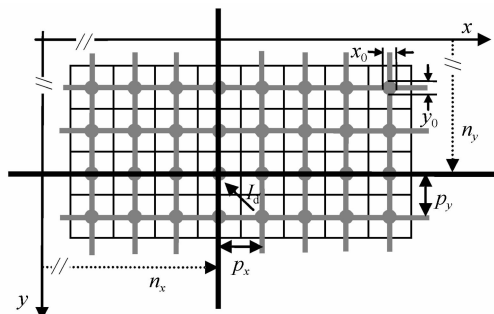


图 1 单色 LED 显示处理模型

Fig. 1 The processing model of unicolor LED display 实际工程应用中, 受制造工艺及连接线路的影响, 像素间总会存在一定的间隙. 若 x_0, y_0 表示像素的宽度和高度, 则点扩散函数 $A(x, y)$ 为

$$A(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| < x_0/2 \wedge |y| < y_0/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

对 $I_d(x, y)$ 应用 Fourier 变换, 得到频率域 LED 图像显示的数学模型为

$$I_d(f_x, f_y) = F(I_d(x, y)) = \frac{x_0 y_0}{p_x p_y} \sum_{k, l \in \mathbf{Z}} f_c \left(f_x - \frac{k}{p_x}, f_y - \frac{l}{p_y} \right) A(f_x, f_y) \quad (4)$$

式中

$$A(f_x, f_y) = \frac{\sin(\pi f_x x_0) \sin(\pi f_y y_0)}{\pi f_x x_0 \pi f_y y_0}$$

f_x, f_y 分别为水平、垂直方向的空间频率.

假设原始图像的频谱在基带内固定不变, 超出系统 Nyquist 频率以外的区域为 0. 图 2 根据式(4)画出了显示图像在 $x_0/p_x = 1$ 时水平方向的频谱. 其中 $1/p_x$ 为显示设备水平方向的采样频率.

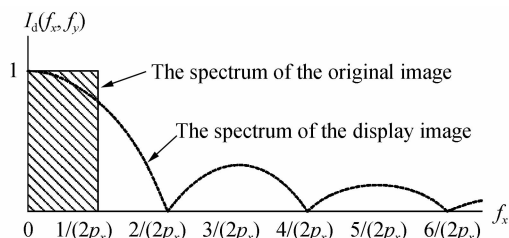


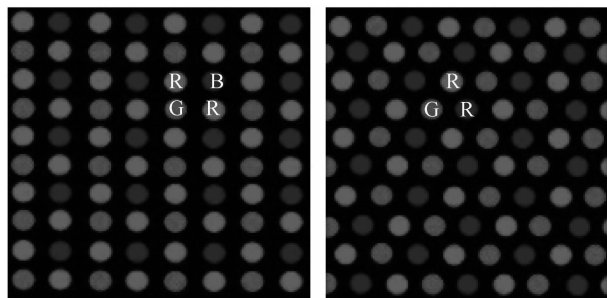
图 2 原始图像与显示图像在水平方向的频谱

Fig. 2 The horizontal frequency spectrum of the original image and the display image

可见显示图像会在采样频率以外的区域出现非 0 的高阶谐波, 致使其出现“阶梯状”的粗糙感. 同时, 基带内高频处信号的衰减影响了这部分图像的清晰度. 因此在 LED 显示屏上是很难实现信号的完美重构.

1.2 全彩色显示的数学模型及频谱分析

空间上不同颜色点靠的很近时,人眼对它们所张视角会小于最小分辨角,这时就无法分辨出它们各自的颜色,感觉到的只是它们的混合色.大多数FPD显示设备正是根据人眼的这种空间混色特性及三基色原理将R、G、B光源紧密交错的排列于显示面板上.LED显示屏常见的均匀分散式像素排布有:RGBR-mosaic排布、RGB-delta排布等.



(a) RGBR-mosaic (b) RGB-delta

图3 LED显示屏常见的均匀分散式像素排布

Fig. 3 Common distributed arrangements of pixels in LED displays

由于RGB-delta形像素排布的网格描述不与坐标轴平行,受篇幅的限制,以RGBR-mosaic形为例建立LED显示屏全彩色显示的数学模型.当然其它像素排布数学模型的构建也依照同样的过程进行.

首先将图像 I 表示为向量 $\mathbf{I}=[R,G,B]^T$,然后根据像素位置 (x,y) 对原始信号 \mathbf{I}_c 进行采样,得到采样图像 \mathbf{I}_s .

$$\mathbf{I}_s(x,y)=S(x,y)\cdot\mathbf{I}_c(x,y) \quad (5)$$

由于在显示重构前要将采样图像像素的各颜色分量根据显示器的像素构成分解到亚像素上,因此在全彩色显示数学模型中增加寻址环节,实现采样图像像素到显示器物理像素的映射.图4显示了RGBR-mosaic形排布上图像像素到物理像素的寻址映射,其中红色分量按比例分配到两个红色亚像素上.因此各基色亚像素相对于采样位置 (x,y) 来讲存在少量的位置偏移 $p_x/4,p_y/4$.式(6)表达了寻址时各基色的位置

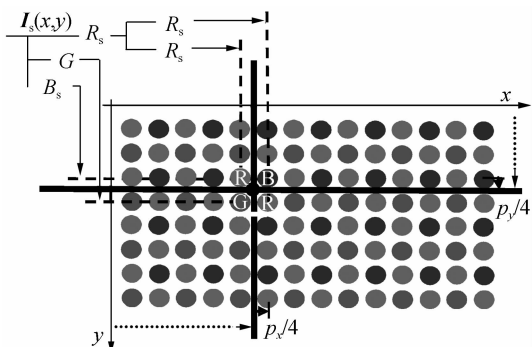


图4 采样图像像素到显示器物理像素的映射

Fig. 4 The digram of pixels in the sampled image mapping to physical pixels of the display

偏移向量.

$$\Delta(x,y)=\begin{bmatrix} \Delta(x,y)_{R'} \\ \Delta(x,y)_{R''} \\ \Delta(x,y)_G \\ \Delta(x,y)_B \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \left(-\frac{1}{4}px,-\frac{1}{4}py\right) \\ \left(\frac{1}{4}px,\frac{1}{4}py\right) \\ \left(-\frac{1}{4}px,\frac{1}{4}py\right) \\ \left(\frac{1}{4}px,-\frac{1}{4}py\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

于是寻址后图像 $\mathbf{I}_a(x,y)$ 可看成是采样图像与带位置偏移的 δ 函数的卷积,即

$$\mathbf{I}_a(x,y)=\begin{bmatrix} R_a^1((x,y)-\Delta(x,y)_{R'}) \\ R_a^2((x,y)-\Delta(x,y)_{R''}) \\ G((x,y)-\Delta(x,y)_{R'}) \\ B((x,y)-\Delta(x,y)_{R'}) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \delta((x,y)-\Delta(x,y)_{R'}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta((x,y)-\Delta(x,y)_{R''}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta((x,y)-\Delta(x,y)_G) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta((x,y)-\Delta(x,y)_B) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_s^1(x,y) \\ R_s^2(x,y) \\ G_s(x,y) \\ B_s(x,y) \end{bmatrix} \quad (7)$$

若 $D(x,y)$ 表示式(7)中的颜色偏移矩阵,那么寻址后信号 \mathbf{I}_a 可进一步写为

$$\mathbf{I}_a(x,y)=D(x,y)\cdot\mathbf{I}_s(x,y)=D(x,y)\cdot[S(x,y)\cdot\mathbf{I}_c(x,y)] \quad (8)$$

根据寻址信号进行重构,此时点扩散函数 $A'(x,y)$ 可近似成宽、高分别为 $\frac{1}{2}x_0,\frac{1}{2}y_0$ 的2D盒函数,那么显示图像 $\mathbf{I}_d(x,y)$ 为

$$\mathbf{I}_d(x,y)=A'(x,y)\cdot\mathbf{I}_a(x,y)=A'(x,y)\cdot(D(x,y)\cdot(S(x,y)\cdot\mathbf{I}_c(x,y))) \quad (9)$$

计算式(9)的Fourier变换得到相应的频域模型式(10).

$$\mathbf{I}_d^i=A'f\cdot(D^i\cdot(S^i\cdot\mathbf{I}_c^i)) \quad (10)$$

根据Fourier变换的时移特性,颜色偏移矩阵 $D(x,y)$ 的Fourier变换为

$$D^i(f_x,f_y)=\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}\pi i(f_x p_x + f_y p_y) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\pi i(f_x p_x + f_y p_y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\pi i(f_x p_x - f_y p_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\pi i(f_x p_x + f_y p_y) \end{bmatrix} \quad (11)$$

相应的点扩散函数 $A'(x,y)$ 的Fourier变换为

$$A^i(f_x,f_y)=\frac{\sin\left(\frac{1}{2}\pi f_x x_0\right)}{\frac{1}{2}\pi f_x x_0}\cdot\frac{\sin\left(\frac{1}{2}\pi f_y y_0\right)}{\frac{1}{2}\pi f_y y_0}$$

在彩色显示设备中,显示模型中需要增加与颜色偏移矩阵的运算.颜色偏移矩阵的构成依赖于像素的排布结构,如与图3(b)所示的RGB-delta形排布对应

的颜色偏移向量与颜色偏移矩阵分别见式(12)、(13)。可见,除采样率外,三基色亚像素及其排布结构对彩色图像显示的质量也有着重要的影响。

$$\Delta(x, y) = \begin{bmatrix} \Delta(x, y)_R \\ \Delta(x, y)_G \\ \Delta(x, y)_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, -p_y/4 \\ -p_x/4, p_y/4 \\ px/4, py/4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D(x, y) = \begin{bmatrix} \delta((x, y) - \Delta(x, y)_R) & 0 & 0 \\ 0 & \delta((x, y) - \Delta(x, y)_G) & 0 \\ 0 & 0 & \delta((x, y) - \Delta(x, y)_B) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 亚像素采样的数学模型与频谱分析

提高采样率是改善采样系统质量的关键。若以亚像素作为采样、重构的基本单位,在制造成本不变的情况下相当于缩小了点阵间距、增加了点阵密度^[7],理论上提高了显示系统的采样率。下面,首先建立亚像素采样的数学模型,然后在 YUV 空间下对全像素采样及亚像素采样进行对比分析,说明将亚像素采样应用到 LED 显示系统的可行性。

2.1 亚像素采样的数学模型

由于亚像素采样以亚像素的位置提取相应的图像信息,相当于将式(8)的位置偏移矩阵先作用于采样函数上,然后对原始图像进行采样。因此从连续图像 $I_c(x, y)$ 开始修改式(5)的采样过程,得到亚像素采样后的信号 $I_{ss}(x, y)$ 为

$$I_{ss}(x, y) = I_c(x, y) [D(x, y) \cdot S(x, y)] = \begin{bmatrix} R_c(x, y) S(x - \frac{1}{4} p_x, y - \frac{1}{4} p_y) \\ R_c(x, y) S(x + \frac{1}{4} p_x, y + \frac{1}{4} p_y) \\ G_c(x, y) S(x - \frac{1}{4} p_x, y + \frac{1}{4} p_y) \\ B_c(x, y) S(x + \frac{1}{4} p_x, y - \frac{1}{4} p_y) \end{bmatrix} \quad (14)$$

经点扩散函数形成显示图像 I_{ds} , 即

$$I_{ds}(x, y) = A'(x, y) * I_{ss}(x, y) = A'(x, y) \cdot ((D(x, y) * S(x, y)) I_c(x, y)) \quad (15)$$

Fourier 变换后显示图像 I_{ds}^f 为

$$I_{ds}^f = A'^f \cdot ((D^f S^f) \cdot I_c^f) \quad (16)$$

2.2 亚像素采样与全像素采样的对比

由于人眼视觉系统对亮度细节的敏感程度远大于对色度细节的敏感程度^[16],若分别从亮度和色度的角度进行分析将有助于明确亚像素采样技术对 LED 显示屏图像显示质量的贡献。因此先将显示图像从 RGB 空间转换到 YUV 空间中。

2.2.1 YUV 空间下全像素采样的频谱

在 RGBR-mosaic 形排布下,一个像素包含 4 个颜色分量,因此将 RGB 到 YUV 空间的转换矩阵^[15]稍作修改得到 M ,于是 YUV 空间下的显示图像 I_{dy} 见(17)

式。其中 M 的值与 LED 的基色坐标相关。但不同的基色坐标对理论分析影响不大,文中按标准的转换矩阵取值,同时将作用于红色分量上的系数拆分成两部分^[17]。

$$I_{dy} = \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = M I_d = M \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.15 & 0.59 & 0.11 \\ -0.085 & -0.085 & -0.33 & 0.50 \\ 0.25 & 0.25 & -0.42 & -0.08 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (17)$$

将 M 作用于 I_d^f 后得到 YUV 空间下全像素采样显示图像的频谱 I_{dy}^f 。

$$I_{dy}^f = A^f \cdot (M \cdot D^f \cdot (S^f \cdot I_c^f)) \quad (18)$$

2.2.2 YUV 空间下亚像素采样的频谱

将 M 作用于 I_{ds}^f 后得到 YUV 空间下亚像素采样显示图像的频谱 I_{dsy}^f 。

$$I_{dsy}^f = A^f \cdot (M \cdot (D^f S^f) \cdot I_c^f) \quad (19)$$

由于 M 为常量矩阵,在式(17)、(18)中调整其位置,那么全像素采样与亚像素采样的频域模型进一步变为

$$I_{dy}^f = A^f \cdot (M D^f \cdot (S^f \cdot I_c^f)) \quad (20)$$

$$I_{dsy}^f = A'^f \cdot (((M D^f) S^f) \cdot I_c^f) \quad (21)$$

2.2.3 不同采样方法的分析对比

根据式(20)、(21),图 5 显示了水平方向上单色图像即 $I_{cy}^f = [Y_c, 0, 0]^T$ 在全像素采样、亚像素采样时显示图像的频谱图。

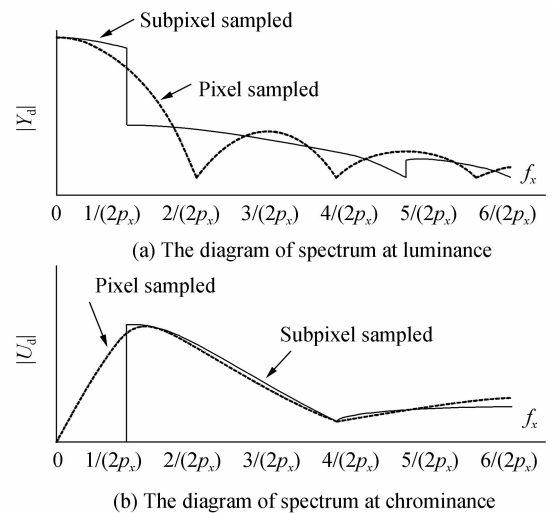


图 5 亚像素采样与全像素采样的亮度与色度频谱对比
Fig. 5 The comparison between displaying spectrums by pixel sampled and subpixel sampled

首先亮度分量上,亚像素采样对信号的重构明显优于像素采样时的显示效果。表现在对基带内原始信号抑制的少,混叠的程度也更弱。这得益于亚像素采样

下更小的孔径比及更高的采样密度.在色度分量上,全像素采样时每个亚像素相对于采样点的位置偏移致使显示图像会出现微弱的颜色误差.然而在一定的观看距离下,这种颜色误差对视觉的影响很小.相反,依据亚像素位置进行的采样不存在这种颜色误差.但是在超出 Nyquist 频率以外的区域由于亚像素的单基色属性使得显示图像中存在产生明显颜色错误的可能.幸运的是,人眼对亮度细节的敏感程度远大于对色度细节的敏感程度,因此用色度分量上的混叠换取亮度上的图像质量对视觉效果改善是明显的.

3 实验与结果分析

将亚像素采样技术应用到LED显示屏,并分别进行了软件仿真和在物理屏体上的实物测试.

图6为等像素密度条件下,波带片图像(128×128)分别在RBGR-mosaic排布、RGB-delta排布上的仿真结果.对比看到,相同排布上右侧图像较左侧图像(尤其在图像的高频区域)明显清晰.尽管亚像素采样的混叠表现在颜色通道上,但是由于人眼的视觉局限,使得这种显示错误没有影响对图像轮廓的感知.

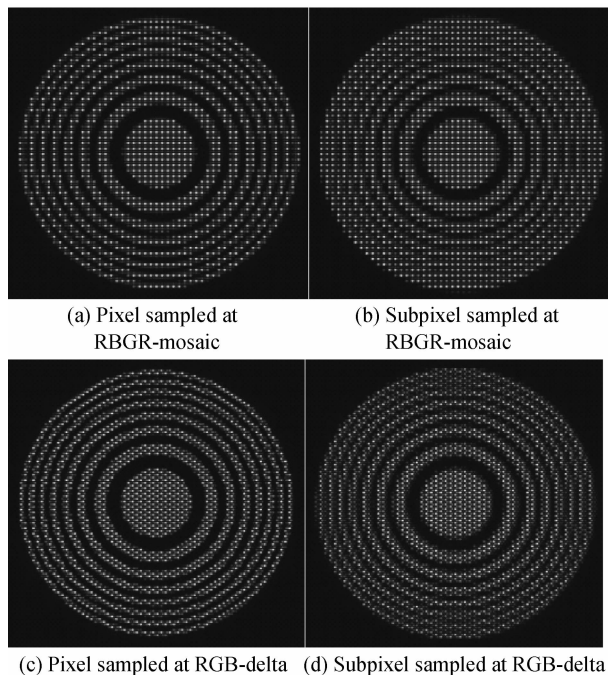
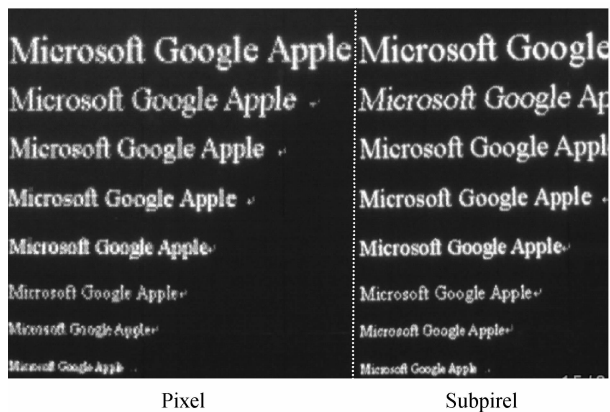


图6 波带片图像分别以像素采样、亚像素采样方式在不同像素排布上的显示对比

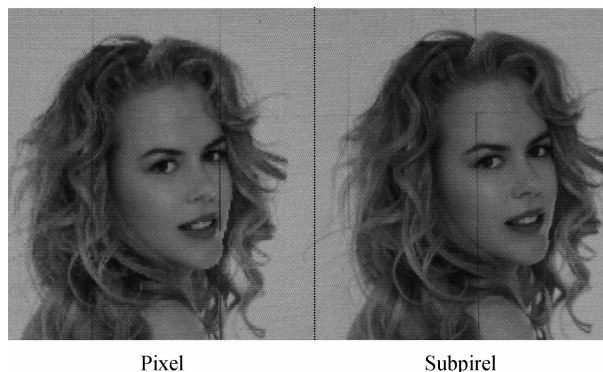
Fig. 6 The comparison of zoneplate image displayed at different arrangements by pixel sampled and subpixel sampled respectively

图7分别为文字、人脸图像在LED全彩屏上分别同时用全像素采样和亚像素采样显示的效果对比.该屏体使用Cree公司的C4SMK型LED管,物理分辨率为 320×192 ,表面采用RGB-delta形亚像素排布,点间距16 mm,亮度为 $6\ 100\text{ cd/m}^2$.图7(a)左侧文字为全

像素采样的显示结果,右侧文字为亚像素采样的显示结果,后者对图像清晰度的改善非常明显.但是在显示的部分区域出现了颜色错误,如大写字母“M”中的反斜线略显红色.图7(b)从屏体中心向两侧按全像素采样和亚像素采样显示同一幅图像.同样,后者的显示质量明显优于前者.另外从颜色错误对显示结果的影响看,亚像素采样更适合显示图像纹理少有规律的非文字图像.



(a) The text displayed result



(b) The face displayed result

图7 LED全彩屏上以全像素采样、亚像素采样进行显示的效果对比

Fig. 7 The comparison of various images displayed at LED display of RGB-delta arrangement by pixel sampled and subpixel sampled respectively

4 结论

在低分辨率设备上显示高分辨率画面是显示领域面临的主要问题之一.由于人眼的视觉特性、图像数据本身的相关性等因素,将亚像素采样技术应用于LED显示的各种二维排布中,可以明显提高显示图像的清晰度、降低设备的制造成本.亚像素采样技术是一种以颜色分量的缺失换取亮度分辨率提升的显示技术,与LED显示屏灵活多样的像素排布相结合能够获得比其他显示设备更好的显示效果.然而部分区域可能出现的颜色错误是有待进一步解决的负面问题.

参考文献

- [1] TERAGAWA M, YOSHIDA A, YOSHIYAMA K, *et al.* Review paper: multi-primary-color displays: The latest technologies and their benefits[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, **20**(1): 1-11.
- [2] JIN Shi-wei, YANG Xin-jun. A novel micro-LCD backlighting design technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 767-770.
金诗玮, 杨新军. 一种新颖微型液晶显示器背光设计技术[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 767-770.
- [3] GIBSON S. Subpixel font rendering[EB/OL]. [2013-06-24]. <http://www.grc.com/cleartype.htm>.
- [4] Microsoft Corporation. Font hinting[EB/OL]. [2013-06-24]. <http://www.microsoft.com/typography/TrueTypeHintingIntro.msp>
- [5] PLATT J C. Optimal filtering for patterned displays[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2000, **7**(7): 179-181.
- [6] PLATT J C, KEELY B, HILL B, *et al.* Displaced filtering for patterned displays[C]. Proc. Society for Information Display Symposium, 2000: 296-299.
- [7] LU Fang, OSCAR C, KETAN T, *et al.* Novel 2-D MMSE subpixel-based image down-sampling[J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, **22**(5): 740-753.
- [8] ZHAO Xiao-ming, SHAO Xiao-peng, ZHANG Jian-qi, *et al.* Objective assessment of the color errors in RGB undersampled images based on color blending of multi-scale region [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, **34**(9): 2071-2077.
赵小明, 邵小鹏, 张建奇, 等. 基于多尺度区域混色的 RGB 欠采样图像颜色错误评价[J]. 电子与信息学报, 2012, **34**(9): 2071-2077.
- [9] KANG S J. Color difference-based subpixel rendering for matrix displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, **9**(6): 319-323.
- [10] MESSING D S, DALY S. Improved display resolution of subsampled colour images using subpixel addressing [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2002; I-625-I-628.
- [11] KLOMPENHOUWER M A, DE HAAN G. Subpixel image scaling for color matrix displays[J]. *Journal of the Society for Information*, 2003, **11**(1): 99-108.
- [12] KANG S J. Luminance-difference-based adaptive subpixel rendering algorithm for matrix displays [C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics. Japan, 2012. 13-16.
- [13] MESSING D S, KEROFKY L, DALY S. Subpixel rendering on non-striped color matrix display [C]. International Conference on Image Processing. 2003, II: 949-952.
- [14] KUTAS G, CHOH H-K, KWAK Y, *et al.* Subpixel arrangements and color image rendering methods for multiprimary displays[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2006, **15**(2): 023002 1-9.
- [15] KOSCHAN A, ABIDI M. Digital color image processing [M]. ZHANG Yu-jin, transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2010, 55-56.
KOSCHAN A, ABIDI M. 彩色数字图像处理[M]. 章毓晋, 译. 北京:清华大学出版社. 2010;55-56.
- [16] CHEN Zhen-yue, WANG Xia, ZOU Xiao-feng, *et al.* A novel quality evaluation method for false color fused image based on human visual system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 451-455.
陈振跃, 王霞, 邹晓风, 等. 基于人眼视觉系统的假彩色融合图像质量的评价方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 451-455.
- [17] LIU Cui-ping, YU Jia, LI Xu-yan, *et al.* Colorimetric research on LED displaying color holograms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 218-221.
刘翠萍, 于佳, 黎旭艳, 等. LED用于彩色全息图照明的色度研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 218-221.