

引用格式: JI Yuan, CHEN Honggang, CHEN Baoliang, et al. Research on Digital Drive Imaging Quality of Silicon-based OLED Micro Display Based on Super Pixel[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(9):0911002

季渊, 陈鸿港, 陈宝良, 等. 基于超像素的硅基 OLED 微显示器数字驱动成像质量研究[J]. 光子学报, 2023, 52(9):0911002

基于超像素的硅基 OLED 微显示器数字驱动 成像质量研究

季渊^{1,2}, 陈鸿港¹, 陈宝良¹, 张引², 许怡晴¹

(1 上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200072)

(2 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 针对微显示器分辨率、刷新率低, 显示运动画面时产生动态假轮廓等成像问题, 通过分析超像素技术的特性及驱动原理, 结合数字驱动方式, 提出数字驱动型超像素扫描策略。利用人眼的积分特性和视觉暂留特性, 通过帧与帧之间在时间上切换, 空间上偏移的方式, 降低数据传输带宽, 改善动态假轮廓现象, 提升显示器成像效果。结合超像素技术设计一款数字驱动型超像素微显示控制器, 并在分辨率为 2048×2048 的全彩硅基 OLED 微显示器上验证其可行性。仿真分析结果表明, 基于超像素的数字驱动扫描策略在分辨率主观感知不变的条件下, 数据传输带宽减少 50%。利用最小可察觉失真积分法进行评估, 超像素扫描策略动态假轮廓等于 0 和不超过 8 灰度的概率分别约为 93.3% 和 99.3%, 成像质量有较大提升。

关键词: 超像素; 硅基 OLED 微显示器; 数字驱动; 动态假轮廓; 微显示控制器

中图分类号: TN27

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235209.0911002

0 引言

随着新型显示技术的发展和元宇宙概念的持续升温, 近眼显示设备受到了越来越多的关注。以微显示器为基础的近眼显示设备, 开始大量应用于虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 和增强现实 (Augmented Reality, AR) 领域^[1-2]。其中硅基有机发光二极管 (Organic Light-emitting Diode, OLED) 微显示器具有面积小、亮度高、响应速度快、色域广、分辨率高等优点^[3], 被广泛应用到头戴式近眼显示设备。传统的硅基微显示器多采用模拟驱动方式^[4], 通过控制电压大小调节像素灰度, 但受到 DAC 转化速度和精度的限制, 难以满足高分辨率高刷新率的需求。数字驱动^[5]方式采用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 法, 利用人眼的积分特性, 通过改变像素亮暗时间, 使人眼感知到不同的灰度级。数字驱动凭借切换速度快、稳定性高、噪声低等优点, 得到广泛关注。

由于数字驱动型微显示器多采用寻址显示分离子场 (Address and Display Separated, ADS) 法^[6], 发光子场在一帧时间内分布不连续, 显示运动画面时, 人眼能观察到明显的亮条纹, 研究者们把这一现象称为动态假轮廓 (Dynamic False Contour, DFC)。为了改善这一问题, 周筱媛等提出集中式门控脉宽调制 (Centralized Gated PWM, CGPWM) 法^[7], 通过将 PWM 周期中的小数子场固定于周期的中间的方法降低 DFC 现象, 由于扫描方式没有改变, DFC 的优化效果有一定局限; HUANG J F 等提出的自适应非对称抖动区域法^[8], 在 DFC 严重的区域对显示灰度值进行非对称抖动, 从而模糊化 DFC 现象, 但需要消耗大量的电路资源进行实时处理; SVILAINIS L 提出一种运动补偿法^[9], 通过估算每帧图像各个像素的运动矢量, 插值出符合人眼积分的灰度, 由于受到运动估算的准确度和计算量的影响, 此方案难以得到实际应用。同时高

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61674100, 61774101)

第一作者: 季渊, jiyuan@shu.edu.cn

通讯作者: 陈鸿港, 15262096276@163.com

收稿日期: 2023-02-28; 录用日期: 2023-05-06

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

分辨率和高刷新率导致海量的数据输出,不仅需要消耗大量的电路资源,且对电路性能的要求极高。目前针对数字驱动的扫描方式有子场法^[10]和原子扫描^[11]等,但对高分辨率、高刷新率显示仍有很大负担。

本文将超像素技术与数字驱动相结合,对微显示器成像质量进行研究,并结合超像素技术设计一款微显示控制器,用以驱动分辨率为 2048×2048 的全彩数字驱动型硅基 OLED 微显示器,证明所提扫描方式的可行性。

1 超像素的数字驱动成像

分辨率和刷新率是衡量微显示器成像质量的直观参数,而随着分辨率和刷新率的提升,数据传输带宽急剧增加,给像素驱动电路造成极大负担。除此之外,显示运动画面时的DFC现象严重影响人眼的观看体验。本文将超像素技术与数字驱动结合,建立超像素模型,对超像素扫描策略进行成像质量研究,同时通过分析DFC产生机理,对超像素扫描方式下的动态显示进行DFC评估。

1.1 超像素技术

超像素的建立是依靠两帧较低分辨率的图像显示过程中快速切换,当切换频率远超人眼能感知的临界闪烁频率时,由于两帧图像显示存在空间错位,人眼会把两帧较低分辨率的图像识别为一帧较高分辨率的图像。

应用于硅基 OLED 微显示器的超像素结构如图 1(a),超像素由四个子像素组成。两个超像素之间存在一个子像素的重叠(图 1(b)),显示过程中分时被两个超像素所控制。图中黑色实线为 Frame0,红色实线为 Frame1,蓝色部分为被两个超像素共同驱动的子像素。图 1(c)是一个由超像素组成的分辨率为 3×3 的超像素显示结构图,把 6×6 分辨率的子像素划分为 3×3 分辨率的超像素,Frame0、Frame1所需数据量仅为原来的 25%。当采用超像素扫描策略显示时,受 Frame0 和 Frame1 共同驱动的影响,人眼感知超像素中子像素的显示信息各不相同,使得主观感知分辨率与子像素分辨率相同,而相对于传统扫描方式传输所需 6×6 分辨率的像素数据,超像素扫描策略可以降低 50% 的数据量。

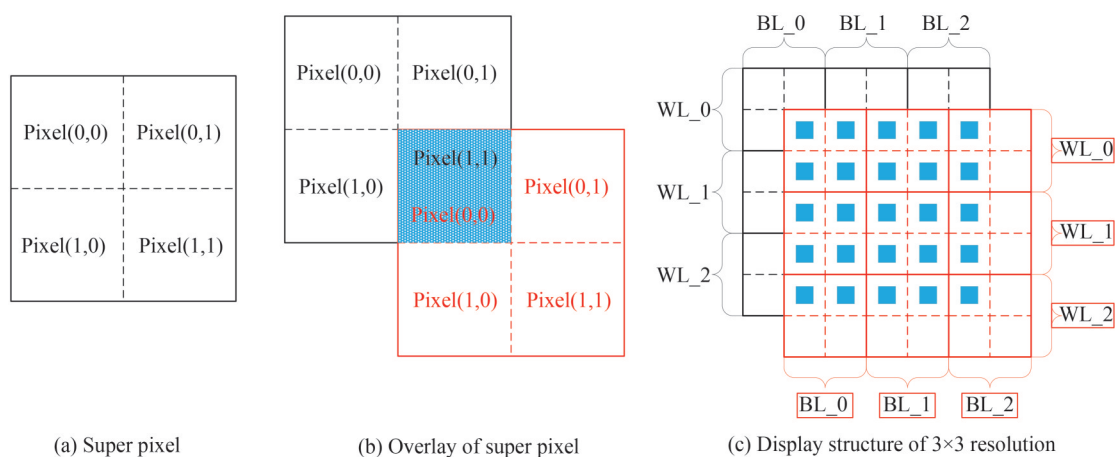


图 1 超像素的形成

Fig.1 Formation of super pixel

相对于模拟驱动像素电路使用电容存储电荷,驱动流经 OLED 的电流大小显示不同灰度级的方式,数字驱动采用 SRAM 存储 0、1 逻辑电平值,用以控制 OLED 驱动管的开关时间。图 2(a)为根据超像素特性所设计的单个超像素的像素驱动电路,M1~M6 组成一个 SRAM 作为信号存储单元,并同时控制四个 OLED 的亮灭,图 2(b)为其对应的版图。

图 2(c)为分辨率为 2×2 的数字驱动型超像素电路结构,S0 表示 Frame0 的 SRAM,S1 表示 Frame1 的 SRAM,其中深蓝色部分表示被 S0 和 S1 共同驱动的子像素。

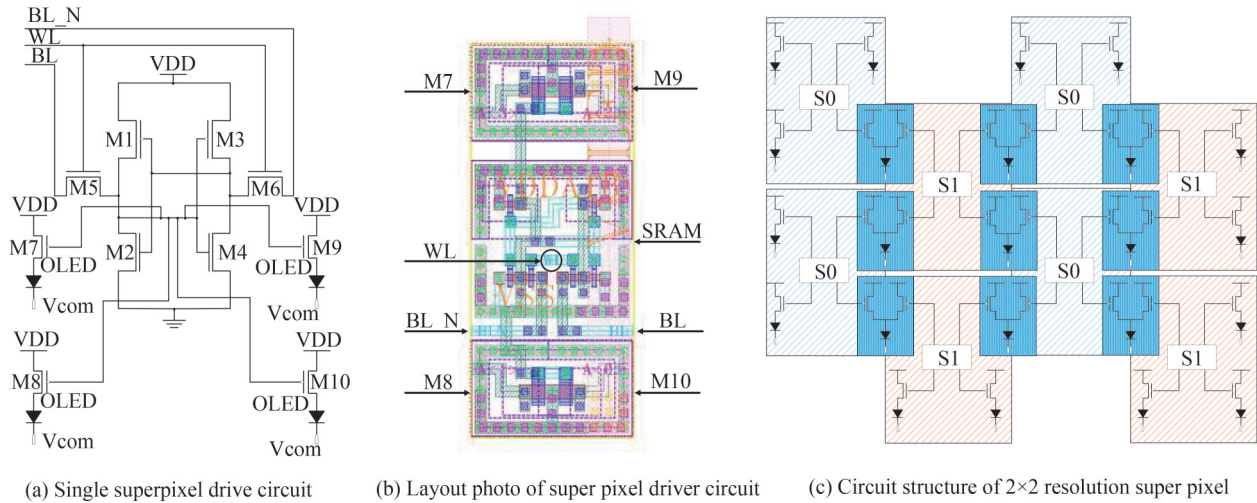


图2 超像素驱动电路
Fig.2 Drive circuit of super pixel

1.2 基于人眼积分特性的超像素建模

超像素显示需要基于子像素的结构,将输入的图像分割成两子帧图像。当两子帧图像在微显示器上交替显示时,由于Frame0和Frame1在行列像素驱动电路上均存在一个子像素的空间偏移,人眼感知的图像不再是单一子帧的图像信息,而是经过两子帧融合后的图像。

对输入图像做超像素处理,流程如图3。首先把输入图像数据按超像素结构进行划分,然后从每个超像素中提取两个特征子像素值P0、P1表征此超像素,其中P0组成的图像称为偶帧,P1组成的图像称为奇帧。由于超像素电路结构中Frame0和Frame1在主对角线方向存在一个子像素的偏移,考虑到P0、P1在超像素中的相对位置关系,在选取过程中也基于这种电路结构,即P0为偶行偶列像素数据,P1为奇行奇列像素数据。由图3可知超像素的建立与原图像分辨率无关,因此超像素扫描策略可以适用于任何分辨率的图像显示。

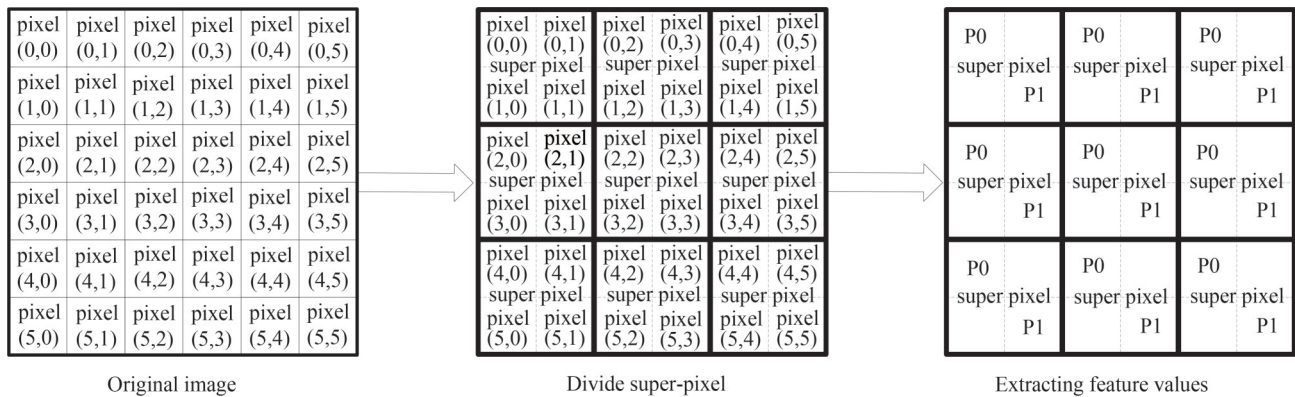


图3 图像的超像素处理流程
Fig3 Super pixel processing flow of image

从四个像素中抽取两个特征像素时,像素数据的丢失导致图像轮廓信息模糊。为提高抽取奇帧、偶帧的图像质量,需要对输入图像进行预处理,从而使图像边缘区域以及灰度发生重大跳变区域的像素数据在做特征像素抽取时能被很好地保留下来。

图4为超像素模型,首先对原始图像进行预处理,像素数据经过平滑核卷积处理后抽取奇行奇列、偶行偶列分别组成两帧分辨率为原来四分之一的子图像,然后按照超像素的像素结构进行行列扩展,将一个像素数据扩展成四个子像素来代表一个超像素。最后根据人眼积分特性,对于奇帧、偶帧分时控制的像素灰度,人眼所观测到的灰度值是两子帧时间上的积分,可表示为

$$G_{ray} = k \times G_{ray}(i) + (1 - k) \times G_{ray}(j) \quad (1)$$

式中, k 表示在一个显示周期内子帧显示所占用的时间比例, $G_{\text{ray}}(i)$ 表示偶帧像素的灰度值, $G_{\text{ray}}(j)$ 表示奇帧的像素灰度值, G_{ray} 表示人眼实际观测到的像素灰度。根据实验测得, k 等于 0.5, 即两子帧显示时间相同时, 人眼识别的图像更接近原始图像。

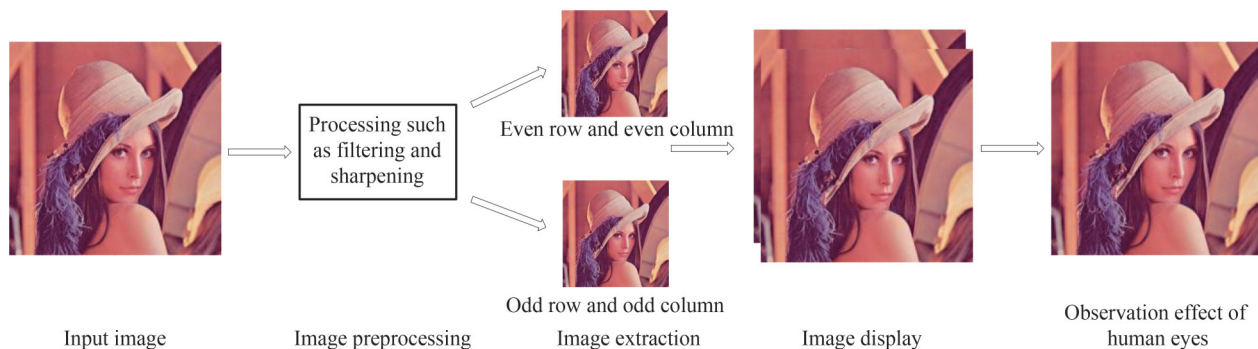


图4 超像素模型
Fig.4 Model of super pixel

1.3 超像素动态假轮廓

数字驱动型微显示器利用人眼的积分特性, 通过 PWM 控制屏幕的亮灭时间使人眼感受到不同的灰度级。当显示运动画面时, 人眼在帧与帧切换时持续积分, 感受到的不再是画面的实际亮度。以 8 bit 灰度级为例, 每 bit 权值对应为 128:64:32:16:8:4:2:1。图 5 为数字驱动型微显示器 DFC 形成原理, 当显示静态图像时, 人眼感受到的像素灰度级与显示灰度级一致; 当显示动态图像时, 人眼会对第二帧显示亮度持续积分, 若第一帧灰度为 127, 第二帧灰度为 128, 人眼实际感受到的最高亮度远高于 128 级灰度, 此时能够观测到明显的亮条纹。

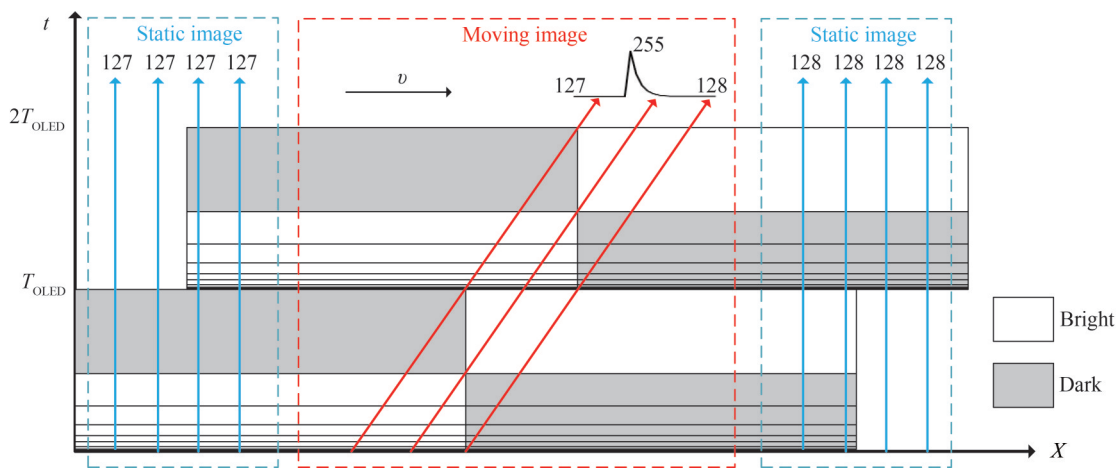


图5 DFC 形成原理
Fig.5 Formation principle of DFC

DFC 是 ADS 法扫描过程中子场权值代表的实际灰度在显示周期内分布不均匀引起的, 子场权值代表的灰度级越高, 产生的 DFC 现象越严重。超像素扫描方式下, 每子帧图像在显示器上显示的时间仅占灰度周期的二分之一, 子帧图像的子场权值为实际灰度值的二分之一。图 6 为基于超像素的人眼积分过程, 以 5bit 灰度级、四子帧显示为例, SF0~SF4 为每 bit 对应的子场, 图中黑色箭头为积分的结束点。人眼感知到的第一个灰度级为从子帧 0 SF0 到子帧 1 SF4 的积分, 以此类推, 感知到的最后一个灰度级为从子帧 2 SF0 到子帧 3 SF4 的积分。

由图 6 可知, 针对超像素的 DFC 评估, 需要对两子帧图像进行积分。结合动态积分法^[12]可得

$$T_{\text{max}} = |d_{\text{max}} - \max(a, b)|, T_{\text{min}} = |d_{\text{min}} - \min(a, b)| \quad (a \neq b) \quad (2)$$

$$T_{\text{max}} = 0, T_{\text{min}} = 0 \quad (a = b) \quad (3)$$

可进一步扩展为

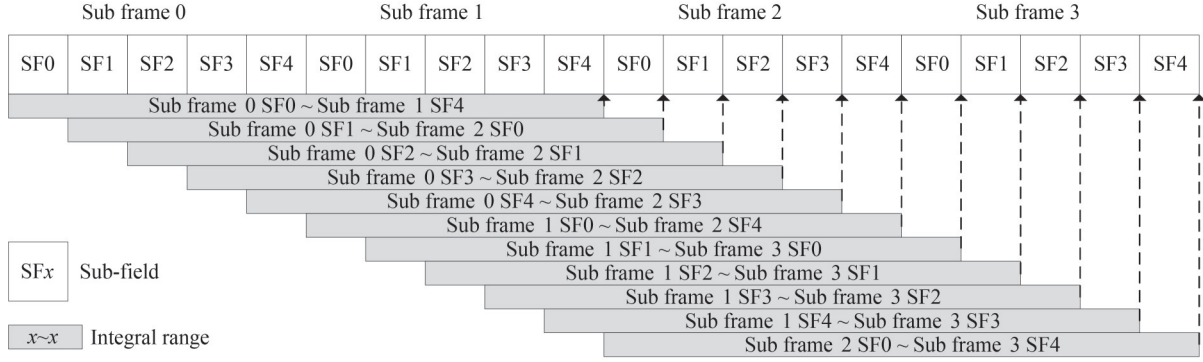


图6 人眼对子帧子场的积分过程

Fig.6 The integration process of human eye to subframe subfield

$$T_{\max} = \left| d_{\max} - \max\left(\frac{i+j}{2}, \frac{k+z}{2}\right) \right|, T_{\min} = \left| d_{\min} - \min\left(\frac{i+j}{2}, \frac{k+z}{2}\right) \right| \left(\frac{i+j}{2} \neq \frac{k+z}{2} \right) \quad (4)$$

$$T_{\max} = 0, T_{\min} = 0 \left(\frac{i+j}{2} = \frac{k+z}{2} \right) \quad (5)$$

式中, d_{\max} 、 d_{\min} 分别为图6所示的积分结果的最大值和最小值, i 、 j 、 k 、 z 为第0子帧到第3子帧的灰度值, $\frac{i+j}{2}$ 表示第一帧的实际灰度级, $\frac{k+z}{2}$ 表示第二帧的实际灰度级。由于DFC出现在灰度变化平滑的区域, 以256级灰度为例, 若两灰度级差距大于20灰度级, 人眼很难观察到DFC现象, 式(4)、(5)中 i 、 j 、 k 、 z 任意两灰度的灰度差小于20灰度级。

考虑到人眼存在视觉阈值, 即图像数据在一定范围内变化时人眼很难察觉, 研究者把这个阈值称为恰可察觉失真(Just Noticeable Distortion, JND)^[13]。在动态积分法的基础上, 文献[14]结合JND提出一种JND积分法来评估DFC问题, 其表达式为

$$\text{DFC}_{\text{eva}} = \begin{cases} \frac{4\max(T_{\max}, T_{\min})}{i+j+k+z} & (\max(T_{\max}, T_{\min}) > \text{JND}_{\text{th}}) \\ 0 & (\max(T_{\max}, T_{\min}) \leq \text{JND}_{\text{th}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, JND_{th} 表示 $\frac{i+j}{2}$ 和 $\frac{k+z}{2}$ 两灰度间人眼不可察觉失真的阈值。

$$\text{JND}_{T_{\max}} = \begin{cases} T_{\max} & (T_{\max} > \text{JND}_{\text{th}}) \\ 0 & (T_{\max} \leq \text{JND}_{\text{th}}) \end{cases}, \text{JND}_{T_{\min}} = \begin{cases} T_{\min} & (T_{\min} > \text{JND}_{\text{th}}) \\ 0 & (T_{\min} \leq \text{JND}_{\text{th}}) \end{cases} \quad (7)$$

本文结合JND积分法对超像素的DFC进行评估, 如式(7)所示, 首先根据积分法计算出两灰度之间的 T_{\max} 和 T_{\min} , 再经过JND模型计算出两灰度之间的 JND_{th} , 然后判断 T_{\max} 和 T_{\min} 是否超过 JND_{th} 。若超过, 说明两灰度间产生的DFC能够被人眼观测到, 否则说明产生的DFC干扰不影响实际观测体验。

2 微显示控制器

针对超像素扫描策略, 设计一款基于超像素的微显示器扫描控制器, 来验证方案的可行性。其结构框架如图7。

其主要包括超像素处理模块、数据缓存模块、数据处理模块、扫描控制模块以及IIC寄存器。图8为超像素处理模块框图, 首先把输入的像素数据进行RGB分离并存储到对应通道的行缓冲器; 然后选择 4×4 的平滑核三个通道的数据做卷积处理, 并把处理完的数据合并成24 bit像素数据; 最后把提取的奇帧、偶帧数据存入相应的行缓冲器中。数据缓存模块用于控制DDR3缓存奇帧、偶帧数据。本文采用数字驱动型硅基OLED微显示器作为实验对象, 需要使用PWM激励进行调制, 数据处理模块把灰度数据转变成驱动微显示器的PWM数据, 根据数据传输位宽进行位平面拼接, 并按照微显示器内部驱动电路逻辑输出相应的像素数据, 最终与扫描控制模块生成的时序控制信号通过LVDS接口同步传输到硅基OLED微显示器。

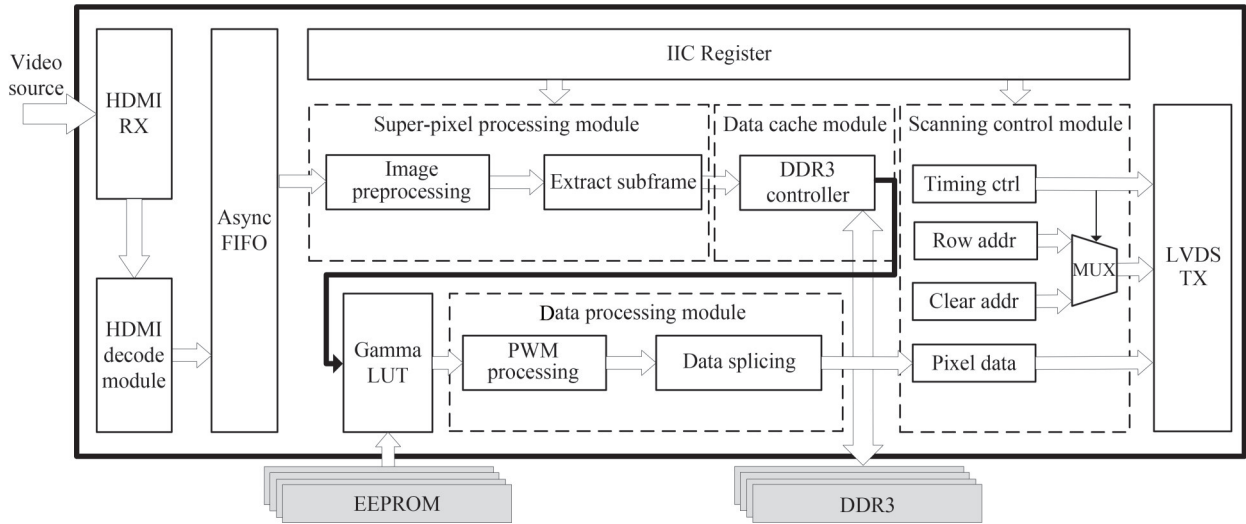


图7 控制器系统框图

Fig.7 Block diagram of controller system

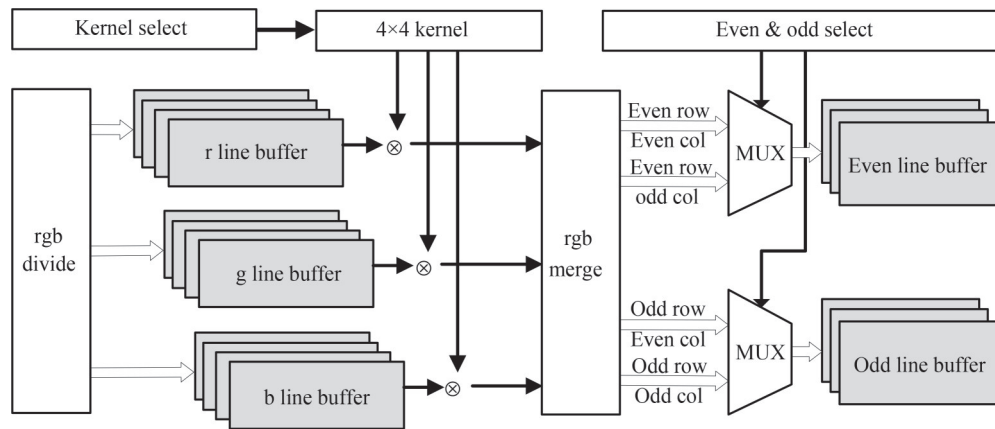
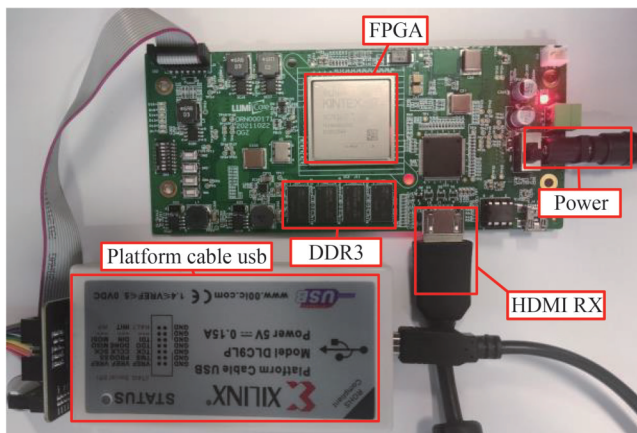


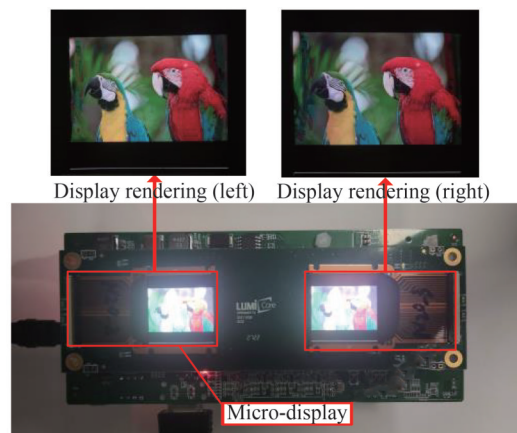
图8 超像素处理模块框图

Fig.8 Block diagram of super pixel processing module

图9为使用昉光微电子有限公司设计生产的FPGA驱动板作为硬件验证平台,内置Xilinx Kintex-7 FPGA和DDR3。硬件系统主要包括输入视频源、微显示控制器和硅基OLED微显示器三部分。视频源由计算机



(a) Front of hardware verification platform



(b) Back of hardware verification platform and display renderings

图9 硬件测试平台

Fig.9 Test platform of hardware

生成,通过HDMI接口输入到FPGA,经过FPGA内部的微显示控制器处理后,传输到分辨率为 2048×2048 的全彩硅基OLED微显示器,驱动屏幕显示视频图像。

3 实验结果分析

3.1 图像质量分析

针对所提扫描策略,对经过超像素模型处理后的图像进行图像质量分析,图10(b)和(c)为显示所需的偶帧、奇帧图像,图10(d)为模拟人眼积分效果生成的超像素图像。从图10中的细节对比可以看出,当一帧图像按照超像素的方式抽取两子帧分辨率为原图四分之一的图像,通过超像素扫描方式进行显示时,可以保留更多的图像细节,显示效果接近原始图像。

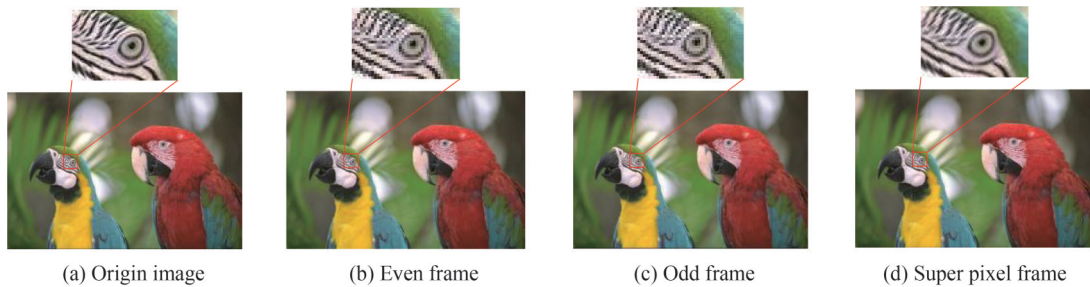


图10 超像素模型仿真图像

Fig.10 Simulation image of super pixel model

为量化超像素图像与原图的差异,利用峰值信噪比PSNR和结构相似度SSIM对超像素模型生成的图像进行量化分析。PSNR越大说明图像噪声越小,一般认为PSNR大于30 dB时表示图像质量良好。SSIM通过亮度、对比度和结构对两张图片进行比较,取值范围为0到1之间,值越大表示与原图相似度越高。

表1为利用超像素模型对Kodak标准影像库^[15]部分图像数据集仿真对应的PSNR和SSIM,其中超像素图像的平均PSNR约为34.086 dB,平均SSIM约为0.942。通过比较可以看出,超像素扫描策略人眼实际感知的图像质量与原图无明显差异,此扫描策略为进一步提高微显示器分辨率和刷新率提供了一种有效解决方案。

表1 超像素模型处理的图像的PSNR以及SSIM比较

Table 1 The PSNR and SSIM comparison of image processed by super pixel model

Image	Even frame		Odd frame		Super pixel frame	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
1	31.980	0.925	32.490	0.924	36.589	0.961
2	31.615	0.898	31.945	0.897	36.204	0.949
3	27.172	0.829	27.536	0.828	31.069	0.908
4	30.458	0.913	30.680	0.914	35.487	0.957
5	30.673	0.908	30.781	0.908	35.104	0.957
6	31.044	0.903	31.645	0.902	35.773	0.949
7	28.068	0.843	28.329	0.844	32.387	0.925
8	30.677	0.909	29.847	0.905	34.406	0.949
9	30.383	0.864	30.746	0.866	34.253	0.927
10	27.784	0.847	26.714	0.847	31.317	0.923
11	27.984	0.861	26.918	0.857	32.087	0.924
12	28.669	0.918	28.596	0.918	33.533	0.956
13	27.916	0.876	27.709	0.876	31.867	0.936
14	29.850	0.866	29.933	0.864	33.833	0.932
15	32.067	0.946	33.518	0.945	37.381	0.975
Average	29.756	0.887	29.826	0.886	34.086	0.942

3.2 不同扫描方式下DFC结果对比

图 11(a)~(c)分别为 19 子场、CGPWM、超像素扫描方式下的 DFC 仿真结果。从左到右依次为 DFC 仿真图、 $JND_{T_{max}}$ 在图像坐标系下的分布图及其统计直方图。其中 $JND_{T_{max}}$ 数值越小表明人眼积分效应所感知到的图像越接近实际图像,即 DFC 现象越不明显。由统计直方图可以看出,相比于 19 子场和 CGPWM 法,超像素扫描策略下 $JND_{T_{max}}$ 的数值及出现频次上均有明显降低,人眼观测到的最大亮度与图像实际亮度的误差主要集中在 3~8 灰度级。

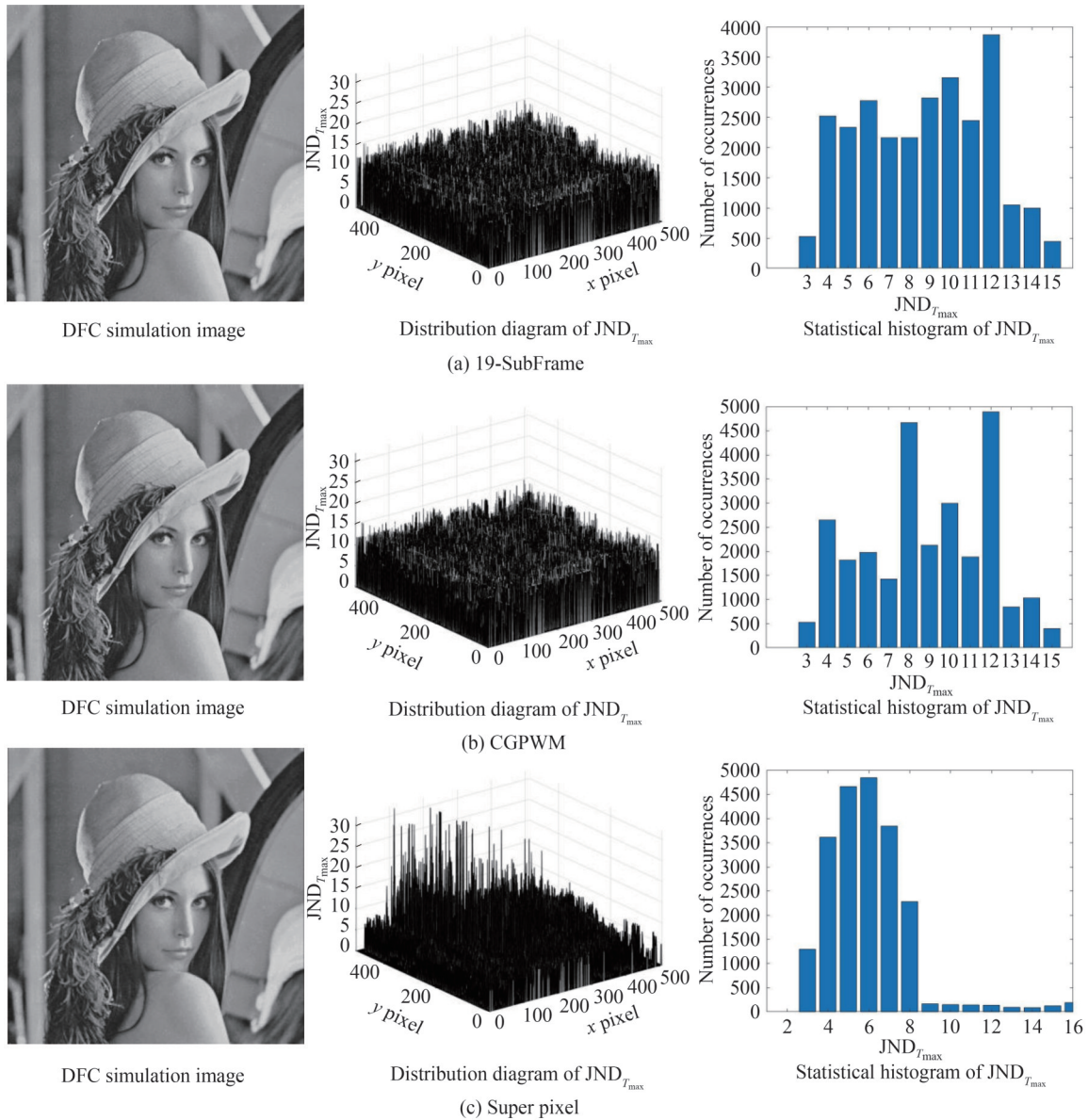


图 11 不同扫描方式下的 DFC
Fig.11 DFC under different scanning modes

表 2 为利用 JND 积分法计算不同扫描方式下 Kodak 标准影像库^[15] 图像的 $JND_{T_{max}}$, 通过对比可以看出超像素扫描策略下图像各像素不可察觉到 DFC 的概率约为 93.3%, 且 $JND_{T_{max}}$ 不超过 8 灰度的概率约为 99.3%, 与 19 子场、CGPWM 扫描方式相比, 超像素扫描策略能有效改善显示动态画面的 DFC 问题, 符合人眼感知效果。

表2 不同扫描方式JND积分结果(%)
Table 2 JND integration results of different scanning methods(%)

Number	19-SubFrame		CGPWM ^[7]		Super pixel	
	JND _{T_{max}} =0	JND _{T_{max}} ≤8	JND _{T_{max}} =0	JND _{T_{max}} ≤8	JND _{T_{max}} =0	JND _{T_{max}} ≤8
1	87.970	94.136	90.261	95.640	90.885	98.978
2	89.040	90.785	89.310	91.132	93.797	99.791
3	91.252	94.859	91.654	95.178	93.960	99.926
4	89.688	93.309	90.049	93.638	93.476	99.684
5	91.921	94.587	93.122	95.563	94.574	98.578
6	88.981	93.950	89.847	94.674	92.628	99.370
7	90.703	94.492	91.429	95.052	93.889	99.749
8	89.847	94.043	91.517	95.397	91.621	97.446
9	87.965	93.131	88.377	93.460	91.454	99.715
10	87.992	93.223	88.550	93.652	90.928	99.622
11	89.866	93.988	90.605	94.633	93.204	99.287
12	89.328	93.759	89.680	94.061	92.113	99.855
13	89.919	94.206	91.088	95.956	91.859	98.009
14	89.882	93.900	90.408	94.404	93.008	99.405
15	93.368	95.294	93.850	95.633	96.982	99.608
16	90.553	94.205	90.798	94.507	94.386	99.838
17	90.839	93.895	91.401	94.336	95.033	99.726
18	91.851	94.024	93.023	94.940	95.799	98.734
19	89.769	93.975	90.590	94.665	92.466	99.058
20	94.794	96.713	95.071	97.040	96.608	99.686
21	89.037	94.004	90.026	94.727	92.382	99.304
22	88.305	93.313	89.093	94.000	91.308	99.299
23	90.089	93.783	90.823	94.422	93.517	99.810
24	90.569	94.419	92.122	95.642	92.876	98.783
Average	90.147	94.000	90.946	94.681	93.281	99.302

4 结论

本文将超像素技术与数字驱动硅基OLED微显示器相结合,从图像质量和DFC等方面对超像素扫描策略下微显示器的成像质量进行分析。通过MATLAB建立超像素模型,结合并扩展JND积分法对超像素处理的图像进行DFC评估。仿真分析结果表明,超像素扫描策略在分辨率主观感知不变的条件下,数据传输带宽减少50%。数据量的降低,为进一步提高微显示器分辨率、刷新率提供一种有效方案。同时,JND_{T_{max}}等于0和不超过8的概率分别约为93.3%和99.3%,DFC现象得到有效改善,显示效果符合人眼观测感受。并根据超像素扫描策略设计一款扫描控制器,成功驱动分辨率为2 048×2 048的全彩数字驱动型硅基OLED微显示器,证明了所提扫描策略的可行性。

参考文献

- [1] ZHANG Zhian. Campus-oriented identification system research based on VRML[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 769-773.
张志安. 基于VR技术的虚拟校园系统的设计与实现[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 769-773.
- [2] GHOSH A, KHAYRULLIN I, WANG Q, et al. OLED Micro-displays for VR/AR applications[C]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(S1): 26-27.
- [3] 季渊. 超还原硅基有机发光微显示器研究[D]. 上海:上海大学, 2012.
- [4] SU Y, GENG D, CHEN Q, et al. Novel TFT-Based emission driver in high performance AMOLED display applications [J]. Organic Electronics, 2021, 93: 106160.
- [5] YANG Yuchen, JI Yuan, CHEN Wendong, et al. Dual-frame decentralized fusion scanning for digital drive on-silicon

- microdisplays[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2020, 47(11): 190366.
- 杨宇臣, 季渊, 陈文栋, 等. 面向数字驱动式硅基微显示器的双帧分权融合扫描[J]. *光电工程*, 2020, 47(11): 190366.
- [6] WEI W, YUAN X L. A time-split method for dynamic false contour of motion images in color plasma display panel[C]. *IEEE Computer Society*, 2010: 145-148.
- [7] ZHOU Xiaoyuan, YUAN Shengchun, LI Hui, et al. A Novel of pulse width modulation for eliminating the dynamic false contour in LED display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0223002.
- 周筱媛, 袁胜春, 李慧, 等. 一种消除LED显示屏动态假轮廓的脉宽调制法[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0223002.
- [8] HUANG J F, ZHANG X N, WANG Y G. Adaptive unsymmetrical dither region to improve dynamic false contour in PDPs[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(4): 2027-2031.
- [9] SVILAINIS L. LED brightness control for video display application[J]. *Displays*, 2008, 29(1): 506-511.
- [10] 陈章进. 平板显示器扫描模型与理论研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [11] ZHANG Chunyan, CHEN Wendong, JI Yuan, et al. Design of atomic scan controller based on OLED microdisplay[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(4): 395-401.
- 张春燕, 陈文栋, 季渊, 等. 基于OLED微显示器的原子扫描控制器设计[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(4): 395-401.
- [12] SHI Tieling, LIANG Zhihu, WEI Wei, et al. Dynamic integral method for evaluating dynamic false contours of motion images in color plasma display panels[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, 23(3): 156-160.
- 石铁岭, 梁志虎, 魏巍, 等. 彩色PDP运动图像动态假轮廓的评测方法——动态积分法[J]. *真空科学与技术*, 2003, 23(3): 156-160.
- [13] YANG X K, LING W S, LU Z K, et al. Just noticeable distortion model and its applications in video coding[J]. *Signal Processing Image Communication*, 2005, 20(7): 662-680.
- [14] JI Yuan, ZHANG Kaiwen, CHEN Wendong, et al. Dynamic false contour quantification and improvement strategy of digital driven OLED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 0911002.
- 季渊, 张凯文, 陈文栋, 等. 数字驱动型OLED的动态假轮廓量化及改善策略[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 0911002.
- [15] KODAK. Kodak lossless true color image suite. ISO12640-2[EB/OL]. [2023-02-28]. <http://r0k.us/graphics/kodak>.

Research on Digital Drive Imaging Quality of Silicon-based OLED Micro Display Based on Super Pixel

JI Yuan^{1,2}, CHEN Honggang¹, CHEN Baoliang¹, ZHANG Yin², XU Yiqing¹

(1 *Microelectronics Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

(2 *School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

Abstract: With the development of new display technology and the continuous warming of the concept of metauniverse, micro-display has been widely used in near-eye display fields such as virtual reality and augmented reality. The silicon-based OLED micro-display has become the best choice for near-eye display devices due to its advantages of small area, high brightness, fast response, wide color gamut and high resolution. traditional silicon-based OLED micro-displays mostly adopt analog drive mode, but it is difficult to meet the requirements of high resolution and high refresh rate due to the limitation of the conversion speed and accuracy of digital-to-analog converter. The digital driving mode adopts pulse width modulation method, which makes the human eye perceive different gray levels by changing the light and dark time of pixels. With the advantages of fast switching speed, high stability and low noise, digital drive is more suitable for silicon-based OLED micro-displays with fast photoelectric response. However, with the further improvement of the requirements for the imaging quality of micro-display, the current scanning mode for digitally driven micro-display is difficult to meet the massive data transmission caused by the improvement of resolution and refresh rate. At the same time, digital drives mostly adopt the addressing display period separated sub-field method. The distribution of the luminous sub-field is not continuous within a frame time, and the dynamic false contour phenomenon occurs when the moving picture is displayed, which seriously affects the viewing quality of the human eye.

Aiming at the imaging problems such as low resolution, low refresh rate of micro-display and dynamic false contour when displaying moving pictures, this paper proposes a digital driving scanning strategy based on super-pixel technology and digital driving principle. This method uses the integral property and visual

persistence property of the human eye to quickly switch between two lower resolution images in the process of display. When the switching frequency is far beyond the critical flicker frequency that the human eye can perceive, the human eye will recognize two lower resolution images as one higher resolution image due to the spatial dislocation of the two images on the displays. A super-pixel model is built using MATLAB and the image quality of the super-pixel processed image is evaluated. Under the condition that the data transmission bandwidth is reduced by 50%, the average PSNR of the super-pixel image is about 34.086 dB, and the average SSIM is about 0.942. According to the integration method, the image quality of the super-pixel image perceived by the human eye is not significantly different from the original image. This scanning strategy provides an effective solution for improving the resolution and refresh rate of micro-display. In order to further prove the effectiveness of the super-pixel scanning strategy, this paper analyzes the mechanism of dynamic false contour and simulates the dynamic false contour of the image under the super-pixel scanning mode. Considering the existence of visual threshold in human eyes, the dynamic false contour of super-pixel is evaluated by combining and extending the just noticeable distortion integral method. Compared with traditional scanning methods, the super-pixel scanning method displays two sub-frame images in one gray period, and the display time of each sub-frame only accounts for half of the gray period. When the integration method is used to simulate the gray level of pixels perceived by the human eye, it is necessary to integrate the subfields of two sub-frame spans. The simulation results indicate that under the proposed scanning strategy, the probability of the error between the maximum perceived brightness of the human eye and the actual brightness of each pixel in the process of image movement is equal to 0 and not more than 8 gray levels is about 93.3% and 99.3%, respectively. Compared with 19 subfields and CGPWM scanning mode, the dynamic false contour phenomenon under the super-pixel scanning strategy has been significantly improved, and the display effect conforms to the human eye observation experience. According to the super-pixel scanning strategy, a digital driving type super-pixel micro-display controller was designed, and a system verification platform based on FPGA was built. The full-color digital driving type silicon-based OLED micro-display with resolution of 2048×2048 was successfully driven, which proved the feasibility of the proposed scanning strategy and laid the foundation for the application of the digital driving type silicon-based OLED micro-display based on super-pixel.

Key words: Super-pixel; Silicon-based OLED micro-display; Digital drive; Dynamic false contour; Micro display controller

OCIS Codes: 110.3000; 330.6100; 100.4145; 230.2090