

基于非对称椭圆中心凹 JND 模型的硅基微显示器

朱毅翀¹, 季渊^{1,2*}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 为解决高分辨率、高刷新率微显示器存在的传输数据量过大的问题, 针对人眼视觉特性以及数字驱动硅基有机发光二极管(OLED)微显示器的扫描方式, 提出基于非对称椭圆中心凹最小可觉差(JND)模型的位平面图像压缩算法, 并针对该算法设计了相应的硅基微显示控制器, 在现场可编程门阵列(FPGA)平台上验证算法的可行性。实验结果表明, 与当前其他 JND 模型相比, 该模型更加符合人眼视觉特性, 基于该模型的位平面图像压缩算法能够在不影响人眼主观感受的前提下, 对图像进行较大程度的压缩, 图像平均压缩率可以达到 39.573%, 能够有效降低微显示器中的传输数据带宽。

关键词 光学器件; 视觉光学; 微显示器; 人眼视觉特性; 非对称中心凹最小可觉差; 数据传输

中图分类号 TN27 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230535

1 引言

随着元宇宙愈发火热, 联结元宇宙中虚拟世界和现实世界的虚拟现实(VR)设备和增强现实(AR)设备发展迅速^[1-2], 推动微显示技术向 VR 和 AR 等领域渗透。硅基有机发光二极管(OLED)微显示器与液晶显示器(LCD)相比, 具有分辨率高、集成度高、功耗低、体积小、重量轻、寿命长等优势^[3-4], 可以减少 VR 设备因画面响应速度慢和分辨率不足导致“纱窗效应”产生的眩晕感^[5-6], 得到了国内外各大公司、研究机构和高校的广泛研究。eMagin 在 2021 年 11 月推出了一款 WUXGA(分辨率 1920 pixel×1200 pixel)全彩 OLED 微型显示器。上海大学对硅基 OLED 微显示器领域进行了深入的研究, 已开发出 2048 pixel×2048 pixel 等多种分辨率的数字驱动型硅基 OLED 微显示器^[5]。相较于模拟驱动方式, 数字驱动的微显示器具有背板工艺价格低、开关功耗低、刷新率高、对比度高等优点。

最小可觉差(JND)的概念源自生理学和心理学的研究, 在视觉光学领域用来表示人眼视觉系统(HVS)所能感受到的最小刺激变化量, 在图像中可以表现为视觉冗余, 对其处理后进行压缩可以在不影响图像主观感受的前提下减少图像数据量, 因此可以将 JND 运用于图像压缩^[7]。迄今为止, 已有众多学者对 JND 模型进行了研究。Chou 等^[8]首次提出了像素域 JND 模型, 该模型对亮度掩蔽和对比度掩蔽两部分进行了研

究。Fan 等^[9]提出了一种显著性加权立体 JND 模型, 但未考虑人眼的中心凹特性。Chen 等^[10]提出了加入中心凹掩蔽特性的 JND 模型, JND 的大小根据偏心角的度数进行加权。季渊等^[11]在前期工作模型的基础上提出了一种基于中心凹的 FD-JND 模型, 使用数学模型进一步描述了 JND 的大小与偏心角以及立体图像深度的关系。Wang 等^[12]在中心凹 JND 模型上增加了视觉注意机制, 使模型更加符合人眼视觉特性。上述研究不断提高 JND 模型与人眼视觉特性的匹配程度, 然而未考虑人眼视敏度在中心凹范围内的分布情况。

研究表明, 人眼中心凹呈非对称椭圆分布, 利用此特征可以进一步优化近眼显示系统中图像数据的冗余问题。本文提出非对称椭圆中心凹 JND(AE-FJND)模型, 用来计算图像中的视觉冗余。针对数字驱动硅基 OLED 的扫描方式, 本文提出对模型位平面图像的压缩算法进行优化, 在不影响人眼主观感受的条件下, 提高了视频数据的压缩效率。针对该算法设计相应的微显示控制器, 在现场可编程门阵列(FPGA)平台上完成硅基 OLED 微显示器的数字驱动, 验证了该算法在硬件上的可行性。

2 位平面图像压缩

2.1 位平面图像特征及编码方式

根据数字驱动硅基 OLED 微显示器的位平面扫描算法, 可将一幅 256 级灰度的图像按照比特位拆分成分特

收稿日期: 2023-02-16; 修回日期: 2023-02-23; 录用日期: 2023-03-10; 网络首发日期: 2023-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61774101)

通信作者: *jiyuan@shu.edu.cn

定数目的位平面图像^[5,13]。考虑到传输效率,采用 19 位平面扫描算法驱动硅基 OLED 微显示器。以 256 级灰度的 Lena 图为例,图 1 为 Lena 图 19 位平面图像特征。由图 1 可知,图像的高 15 位平面总是以低频分量为主,展现原始灰度图的大致图形及轮廓,低 4 位平面则包含

大量的高频分量,表现为图像的细节与噪声;灰度图像由 19 个位平面图像叠加而成,每个位平面图均为二值图像。针对位平面图像二值化的特点,考虑采用跳白黑块(WBBS)编码。相较于其他压缩方式,WBBS 还有压缩率更低且更易于硬件实现的优势^[14]。

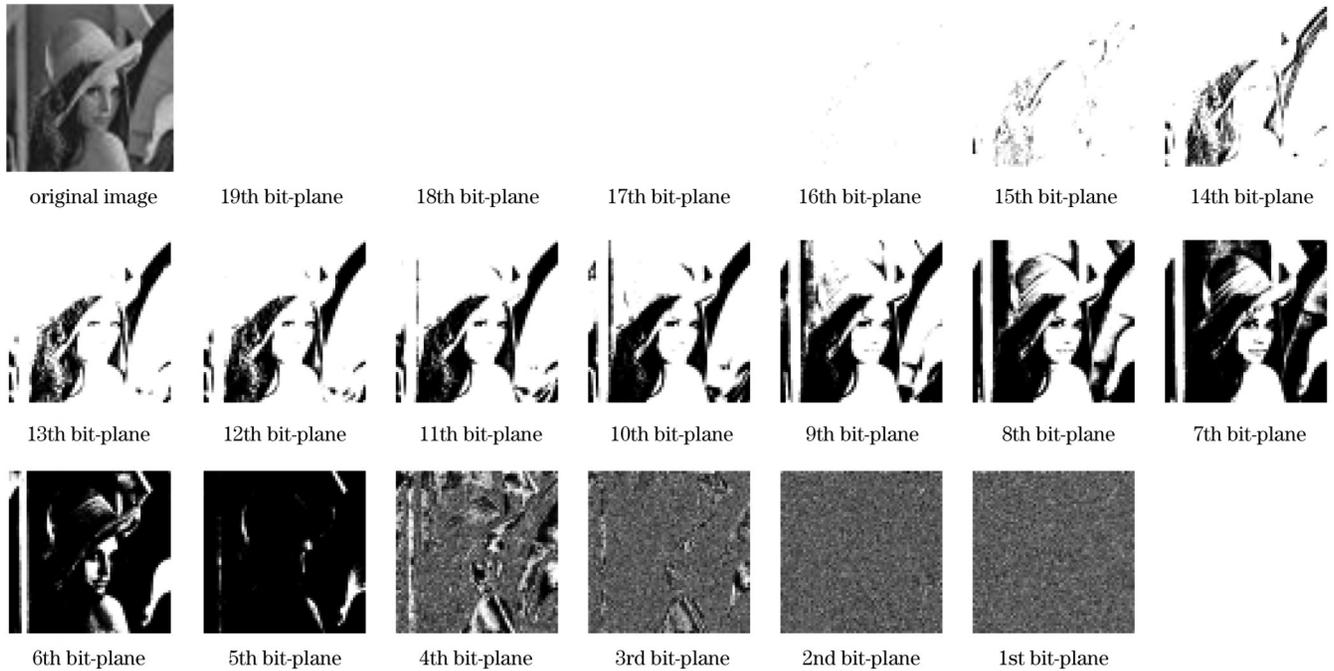


图 1 Lena 图 19 位平面图像特征

Fig. 1 19-bit-plane image features of Lena

2.2 位平面图像压缩结果分析

为验证所提方案的可行性,以 Lena 图为例,对 19 个位平面进行 WBBS 编码压缩,以压缩率(CR, R_c)作为压缩效果指标。定义压缩率为通过编码器后的图像数据量与原图数据量大小的比值:

$$R_c = \frac{D_{\text{comp}}}{D_{\text{ori}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: D_{comp} 和 D_{ori} 分别表示通过编码器后的图像数据量和原图数据量。

压缩结果如图 2 所示。对于高 15 位平面,由于其位平面表现的是图像的大致图形及轮廓,白黑块长度较长且交替频率较低,用 WBBS 对其进行编码能获得较低的压缩率。而低 4 位平面反映的是图像的细节与噪声,白黑块长度短且交替剧烈,用 WBBS 编码反而会增加其数据量,因此需要对该压缩方案进行优化。针对此问题,后文将探讨如何利用 JND 模型对低 4 位平面进行压缩。

3 视觉观测实验

JND 会受到多种人眼视觉特性的影响,包括亮度掩蔽、对比度掩蔽、中心凹掩蔽等特性。中心凹掩蔽特性表明在人眼舒适区范围内,视敏度随着距离中心凹区域范围的扩大而减小^[15]。近年来有科学研究表明,

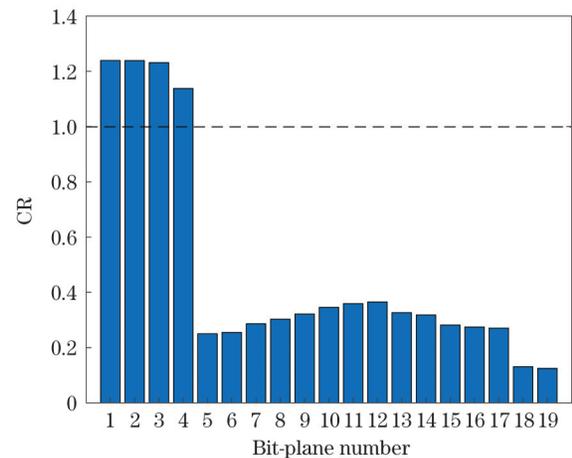


图 2 Lena 图 19 位平面压缩率分布图

Fig. 2 19-bit-plane CR distribution of Lena

视敏度的分布在中心凹范围内是非对称的,人眼视觉系统存在水平-垂直各向异性(HVA)和垂直方向不对称性(VMA)^[16]。基于此,考虑使用上下两个半椭圆模型来拟合人眼的非对称中心凹掩蔽特性。

3.1 实验建立

为探讨亮度掩蔽和对比度掩蔽效应与中心凹之间的关系,对亮度和对比度进行两种类型的心理学实验,在每种实验中,又对中心凹的范围大小进行改变,以研究 JND 阈值与中心凹范围的关系。上述两类实验使

用基于硅基 OLED 微显示器的 VR 眼镜完成, 该 VR 设备的性能参数如表 1 所示。

表 1 基于硅基 OLED 微显示器的 VR 眼镜性能参数

Table 1 Performance parameters of VR glasses based on OLED-on-silicon micro-display

Parameter	Value
Resolution (RGB) /pixel	2560×2560
Pixel per degree /pixel	22
Field angle /($^{\circ}$)	120

实验受试者共 21 人, 其中男性 14 人, 女性 7 人, 年龄均在 21~25 岁之间, 通过弗莱堡视力测试, 视力表现均正常。仅告知测试人员观测图像内容以及实验结束标志等基本信息, 以避免受试者因心理预期对实验造成影响。

如图 3 所示, 屏幕的中心坐标点是原点。视觉敏感度测试点在屏幕上分布不均匀, 靠近屏幕中心相对密集, 远离屏幕中心相对稀疏。在实验中, 对每一个测试点处 JND 阈值进行测试, 直到所有测试点处的 JND 阈值测试完为止。

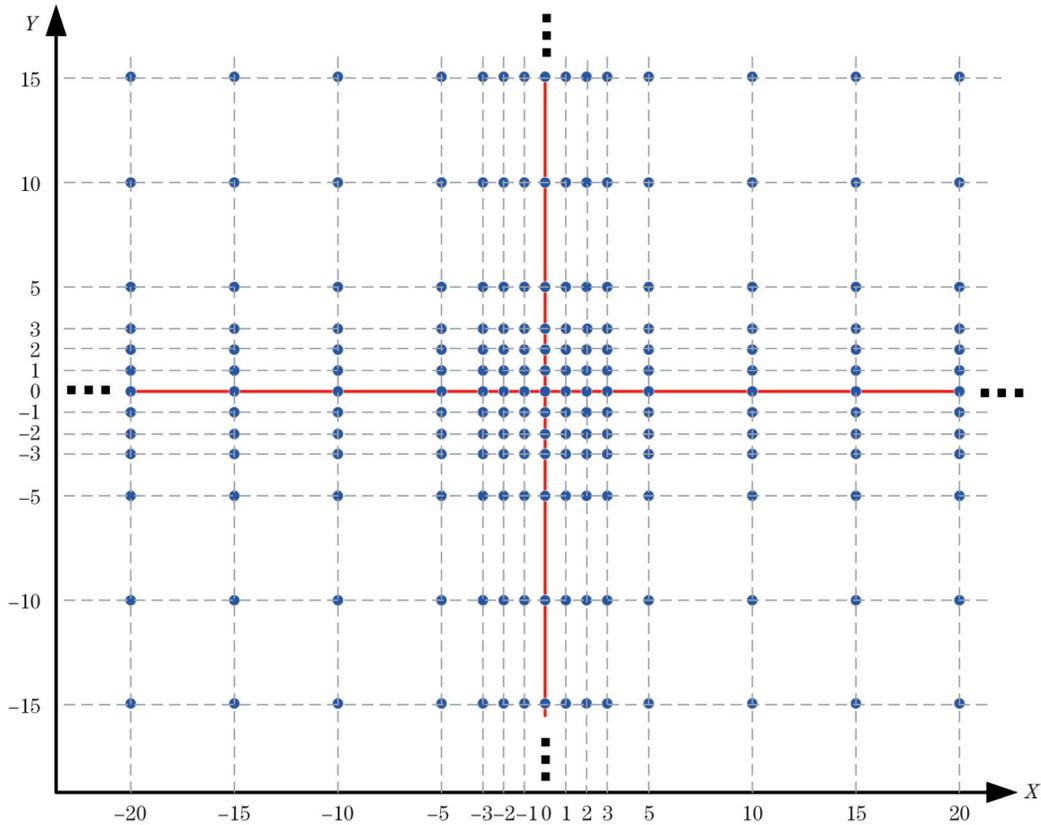


图 3 视场测试点分布

Fig. 3 Distribution of field of view test points

3.2 中心凹-亮度掩蔽实验

在中心凹-亮度掩蔽实验中, 测试图像在 VR 中分左右图像进行显示, 左眼测试图像如图 4 所示, 右眼图像与左图一致。在图像中心处设置一个高亮点, 以方便受试者进行凝视观测。定义 l 为测试图像的背景亮度值, 在 JND 阈值测试点处, 亮度值为 $l+k$, k 为测试点噪声幅度, 即为该点处的 JND 值, 测试点处的亮度值 $l+k$ 大于等于 0 且小于等于 255。本实验对左右眼两幅图像注入相等幅度的噪声以探究中心凹范围内亮度的掩蔽特性, 噪声区域范围为 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 。在测试中, 从预定的测试点中随机抽取一个测试点, 然后从其余的测试点中随机抽取一个点, 直到所有测试点处的 JND 阈值测试结束为止。实验中设置 10 组亮度实验组, 15 组偏心角实验组, 具体数值如表 2



图 4 用于亮度掩蔽的测试图像

Fig. 4 Image for exploring luminance masking effect

所示。

采用升限方法^[17],消除视网膜适应性的影响,以准确测量 JND 阈值。采用阶梯法^[18],将噪声设为 0,此时噪声点不可见,要求受试者每次调整 1 个灰度值的噪声,直到观察到噪声点出现为止,再把相应的阈值记录下来。设置背景亮度为 k_1 ,为避免主观影响,每次样图

测试的时间约为 1 s。之后略微增加噪声点幅度至 $k_1 + \Delta k$,开始进行相反观测步骤,每次观察时减少 1 个灰度值,直到噪声点恰好不可见,记录此时的噪声点幅度为 k_2 。取 k_1 和 k_2 的平均值,记为 k_{avg} 。在多轮相同的步骤后可以得到最终的平均结果 k_0 , k_0 即为该掩蔽效应下的 JND 阈值。

表 2 亮度掩蔽和对比度掩蔽实验的刺激属性

Table 2 Stimulus attributes for luminance masking and contrast masking experiments

Attribute	Luminance masking	Contrast masking
Background luminance	0, 10, 20, 60, 100, 140, 180, 200, 220, 230	100, 140, 180, 220
Contrast luminance	0	0, 20, 40, 60, 80
Eccentricity / (°)	1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60	1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35

3.3 中心凹-对比度掩蔽实验

在亮度掩蔽实验的基础上,对比度掩蔽实验进一步增加了方形对比区域。如图 5 所示,定义 c 为对比亮度值,即对比区域与背景亮度之间的差值,对比区域亮度值为 $l \pm c$,当对比亮度值为 0 时,即为亮度掩蔽实验。将测试噪声区域设置在对比区域和背景区域边界处。实验中设置 4 组亮度实验组,5 组对比实验组,10 组偏心角实验组,具体数值如表 2 所示。

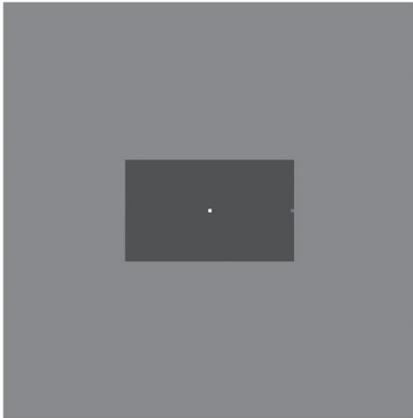


图 5 用于对比度掩蔽的测试图像

Fig. 5 Image for exploring contrast masking effect

4 AE-FJND 模型建立及分析

4.1 非对称中心凹模型

根据上节实验的测试结果,对相同 JND 值处的点用椭圆方程进行拟合,得到了如图 6 所示的非对称椭圆模型。因为上下两个半椭圆均为随视场范围增大而增大的同心椭圆, X 轴方向每一偏心位置处的椭圆均是唯一且确定的,所以在下文中,采用 X 轴方向的偏心角值 e 表示中心凹视场范围的偏心角,以确定唯一的上半椭圆或者下半椭圆。

4.2 中心凹-亮度掩蔽模型

实验结果如图 7 所示。以背景亮度为 140 时为例,图 7(a)表示了 JND 与偏心角之间的关系。可以看出,

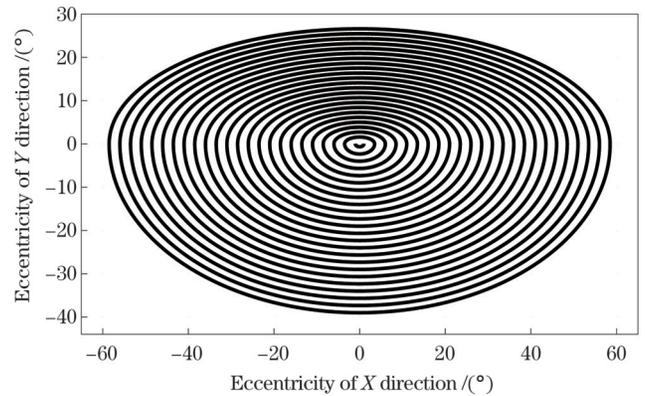


图 6 非对称中心凹拟合椭圆

Fig. 6 Asymmetric foveated concave fitting ellipse

JND 在偏心角 10° 以内保持不变,在 $10^\circ \sim 30^\circ$ 之间增加缓慢, 30° 之后开始急剧增大。图 7(b)显示了偏心角为 10° 时, JND 与背景亮度的关系,当背景亮度较低和背景亮度较高处的 JND 值较大,中间亮度范围处 JND 值较小。图 7(c)显示了当亮度为 140 时,中心凹对 JND 空间分布影响的情况,可以看到相同 JND 的曲线形状近似椭圆,且上半部分的长短半轴之比大于下半部分。该实验结果与人眼视觉系统的 HVA 和 VMA 效应^[16]对应。

根据实验数据建立中心凹-亮度掩蔽模型,模型的均方根误差为 1.083, JND 与亮度 l 、偏心角 e 的关系可拟合为

$$l_1 = a_1 l^4 + a_2 l^3 + a_3 l^2 + a_4 l + a_5, \quad (2)$$

$$e_1 = b_1 e^4 + b_2 e^3 + b_3 e^2 + b_4 e + b_5, \quad (3)$$

式中: $a_1 = 2.057 \times 10^{-8}$, $a_2 = -1.054 \times 10^{-5}$, $a_3 = 0.00191$, $a_4 = -0.13010$, $a_5 = 3.706$, $b_1 = -7.01 \times 10^{-6}$, $b_2 = 0.00086$, $b_3 = -0.03064$, $b_4 = 0.43110$, $b_5 = 3.125$ 。

可得

$$J_{AE-FJND, l}(l, e_x) = l_1 \left[\frac{e_1}{e_1(0)} + \mu_1 \right] + \mu_2, \quad (4)$$

式中: μ_1 和 μ_2 为校正参数,取值分别为 -0.8337 和 1.731 ; $e_1(0)$ 表示视场中心处的 e_1 值。

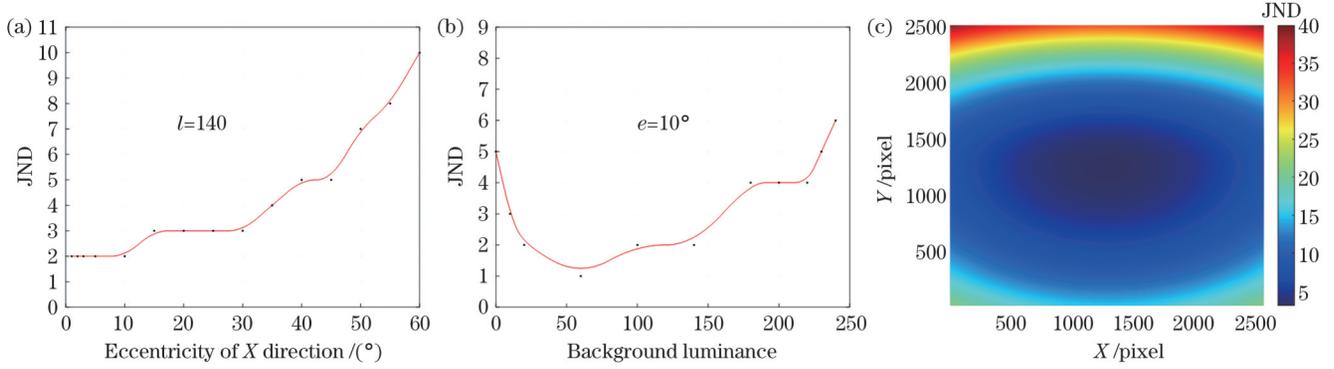


图 7 亮度掩蔽实验结果。(a)JND与偏心角的关系;(b)JND与亮度的关系;(c)JND在中心凹范围内值分布
Fig. 7 Subjective experimental results for luminance masking experiment. (a) Relationship between JND and eccentricity;
(b) relationship between JND and luminance; (c) JND value distribution in foveated range

在中心凹范围的影响下,背景亮度值 l 处的 JND 阈值为 $J_{AE-FJND,l}$ 。由于亮度与灰度值呈正相关,可用当前邻域内像素的加权灰度值来替代背景亮度值 l ,通常取 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 大小的加权模板^[11]。

4.3 中心凹-对比度掩蔽模型

图 8 为中心凹-对比度掩蔽特性下的实验结果。图 8(a) 显示了在偏心角为 20° 、背景亮度为 140 时, JND 与对比度之间的关系,曲线表明, JND 值随对比度值的增大而增大。图 8(b) 是对比度掩蔽中 JND 与

背景亮度和对比度的变化图,在对比度在 $0 \sim 80$ 范围内,背景亮度在 $100 \sim 220$ 范围内, JND 阈值总体上随背景亮度和对比度的增加而增加。其中,在亮度为 $140 \sim 180$ 的范围内, JND 阈值增加幅度较大。当对比度 c 为 20,背景亮度 l 为 140 时, JND 在视场范围内值的分布如图 8(c) 所示,可以看出, JND 相同大小处的曲线形状为椭圆,且上半椭圆的长短半轴之比要大于下半椭圆。该实验结果与人眼视觉系统的 HVA 和 VMA 效应^[16]对应。

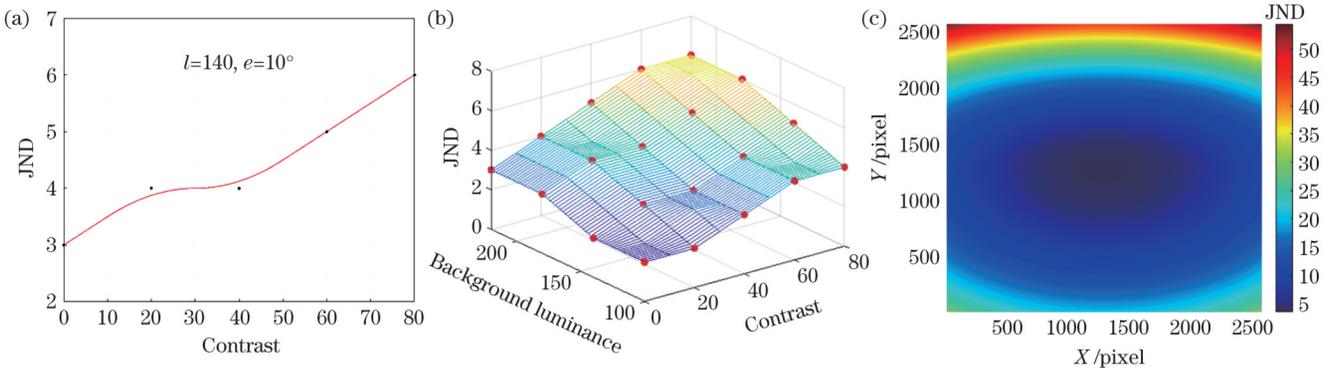


图 8 对比度掩蔽实验结果。(a)JND与对比度的关系;(b)JND与对比度和亮度的关系;(c)JND在中心凹范围内值分布
Fig. 8 Subjective experimental results for contrast masking experiment. (a) Relationship between JND and contrast; (b) relationship among JND, contrast and luminance; (c) JND value distribution in foveated range

通过测试所得实验数据,建立相应的对比度掩蔽模型, JND 阈值与背景亮度 l 、对比度 c 、偏心角 e 的函数如下所示:

$$M = \begin{cases} (u_1 \times l + u_2) \times \sqrt{c} + u_3, & (0 \leq e < 15) \\ (v_1 \times l + v_2) \times \sqrt{c} + v_3, & (15 \leq e < 40), \\ (w_1 \times l + w_2) \times \sqrt{c} + w_3, & (e > 40) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_1=0.00251, u_2=-0.02166, u_3=-0.19980, v_1=0.002749, v_2=2.27 \times 10^{-5}, v_3=0.38070, w_1=0.00036, w_2=0.76070, w_3=-1.92$; 对比度 c 采用 5×5 的 Sobel 算子计算得到的边沿梯度表示。

可得

$$J_{AE-FJND,c}(l, c, e) = J_{AF-JND,l} + M_o \quad (6)$$

最终的 AE-FJND 模型为

$$J_{AE-FJND} = \begin{cases} J_{AE-FJND,l}, & c = 0 \\ J_{AE-FJND,c}, & c \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

模型的均方根误差 (RMSE) 值为 1.107, 表示具有较好的拟合结果。

4.4 JND 模型比较

对所提出的 AE-FJND 模型的准确性进行验证, 将该模型与文献 [11] 和文献 [12] 的中心凹 JND 模型进行比较。由 LIVE 数据集^[19] 提供测试图像, 对数据集中的图像加入相同幅度的噪声, 比较主观视觉质量方面三类 JND 模型的表现。将测试图像的凝视点固

定在中心处,采用 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的滑块对原图加入噪声。使用以下公式对噪声污染图像在像素 (i, j) 处的灰度值进行计算:

$$I^*(n, i, j) = I(n, i, j) + N_{\text{rand}} \times J_{\text{JND}}(n, i, j), \quad (8)$$

$$J_{\text{JND}}(n) = \begin{pmatrix} J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} \\ J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} \\ J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} \\ J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} \\ J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},c} & J_{\text{JND},l} & J_{\text{JND},l} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: I 表示原始图像; I^* 表示噪声污染后的图像; n 表示滑块序号; N_{rand} 为随机数,从 0、0.367、0.593、0.725、1 中随机选取; $J_{\text{JND}}(n)$ 表示第 n 个滑块处的 JND 值; $J_{\text{JND},l}$ 表示亮度掩蔽下该滑块处的 JND 值; $J_{\text{JND},c}$ 表示对比度掩蔽下该滑块处的 JND 值。

在基于硅基 OLED 微显示器的 VR 眼镜中以 120° 的视场角全屏显示测试图像。测试方法按照 ITU-R BT.500 中建议的双刺激连续质量尺度法进行。观测人员一共 21 人,首先将原图像和噪声污染的图像按顺序给受试者观测,以建立心理预期,每张图像显示时间为 8 s,两张图像之间休息 2 s,避免视觉疲劳影响,之后再将图像序列按照之前的显示时间播放一次。与此同时,测试者对测试图像开始打分,有以下 5 个评分等级:5(差异完全不可见),4(差异可见但噪声不明显),3(可察觉少量噪声),2(可以察觉较多噪声),1(可察觉噪声很多)。以峰值信噪比 (PSNR) 作为注入噪声量的衡量标准,三类 JND 模型的平均主观得分 (MOS) 如表 3 所示。

表 3 相同 PSNR 下 JND 模型的平均主观得分对比
Table 3 Comparison of MOSs of JND models under same PSNR

Image	PSNR /dB	MOS		
		Model in Ref. [12]	Model in Ref. [11]	Our model
Rapids	58.44	4.2	4.8	4.9
Bikes	59.00	4.3	4.9	4.9
Buildings	57.66	4.2	4.7	4.9
Carnivaldolls	53.46	4.0	4.6	4.8
Caps	59.66	4.3	4.9	5.0
Churchandcapitol	55.57	4.2	4.8	4.9
Coinsinfountain	57.03	4.2	4.8	4.9
Dancers	55.11	4.4	5.0	5.0
House	59.12	4.3	4.9	4.9
Lighthouse	56.12	4.2	4.8	5.0
Average	57.107	4.24	4.82	4.91

从表 3 可以看出,在对原图注入相同幅度噪声的情况下,建立的 AE-FJND 模型比文献 [11] 和文献 [12] 的模型平均主观得分高。该结论也可表明,在主观得分一致的情况下,该 AE-FJND 模型能够计算出更多的视觉冗余。

图 9(a) 表示经噪声污染后的图像,图 9(b)~图 9(d) 分别为不同 JND 模型的噪声分布情况。从图 9 可以看出本文提出的模型在中心凹区域噪声分布少,且图像上半部分注入的噪声量大于下半部分,与人眼 HVA 和 VMA 视觉特性相符。图 10 为不同 JND 模型污染后图像中心区域的放大图。从图 10 可以看出,该模型在中心区域噪声分布较少,中心区域放大图与文献 [12] 所提模型结果相比清晰度更高,与文献 [11] 所提模型结果的清晰度相近,与原始图像中心处差别较小,符合人眼视觉特性。

综合以上主观和客观实验,表明 AE-FJND 模型

与其他两类 JND 模型相比,更加符合人眼视觉特性。将该模型运用在图像压缩领域可以在不影响人眼主观感受的前提下,最大程度地计算出图像的视觉冗余,获得更低的压缩率。

5 基于 AE-FJND 模型的位平面图像压缩算法

为进一步减小低 4 位平面的压缩率,结合位平面图像特点和 AE-FJND 模型,提出了基于 AE-FJND 的位平面图像压缩算法。该算法首先对低 4 位平面数据进行处理。定义原始灰度等级为 $X(x, y)$ 的像素,在最小可觉差的阈值下改变 $X(x, y)$ 的一个或多个位平面的数据,补偿后像素的灰度等级 $X_c(x, y)$ 与原始灰度等级的差值的绝对值 ΔX 应满足小于等于最小可觉差阈值 J_{th} 。定义参考像素 X_{ref} 为需要尽可能与之保持一致的像素,像素位置为 $X(x, y)$ 的参考像素的选取方式为

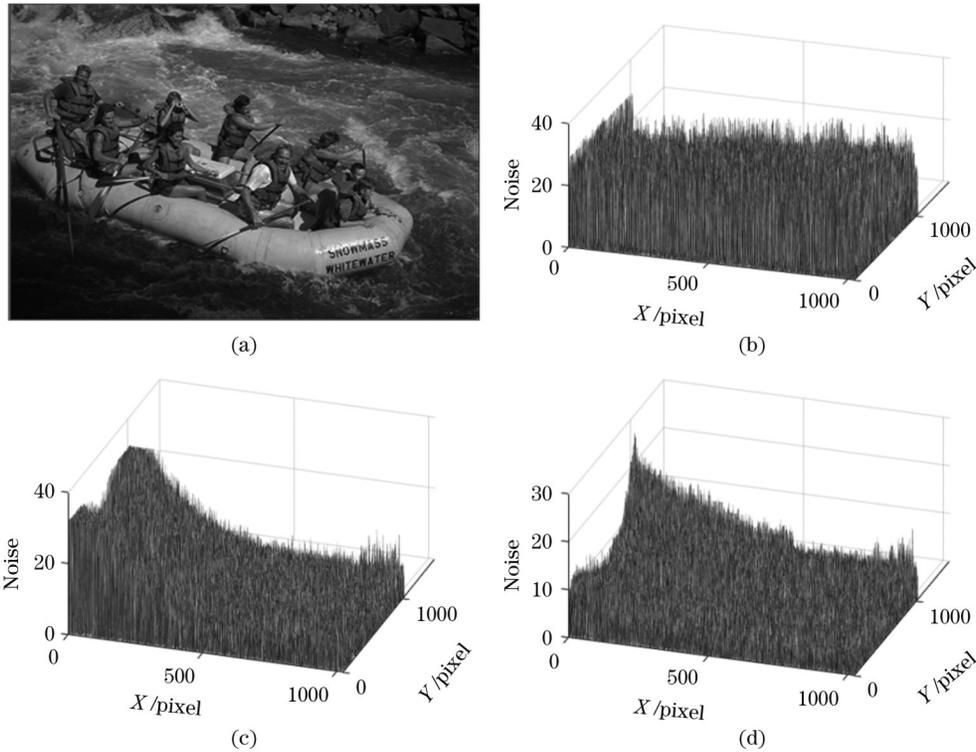


图 9 三类 JND 模型噪声注入分布。(a)原始图像;(b)文献[12]模型;(c)文献[11]模型;(d)本文模型

Fig. 9 Noise injection distribution of three kinds of JND models. (a) Original image; (b) model in Ref. [12]; (c) model in Ref. [11]; (d) our mode

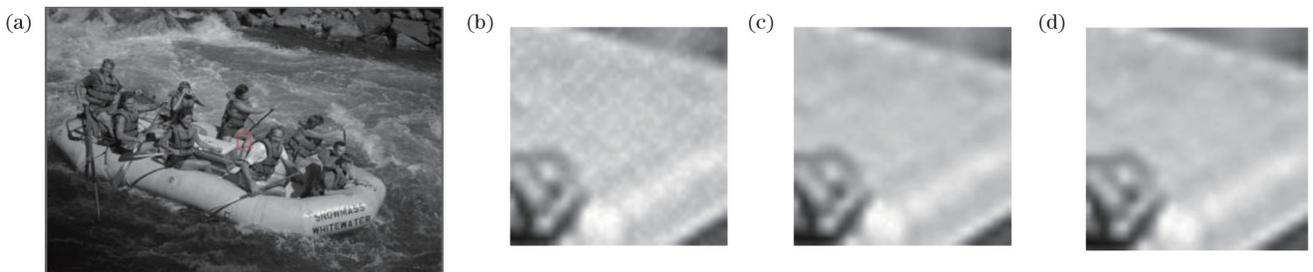


图 10 三类 JND 模型噪声污染后图像中心区域放大图。(a)噪声污染图像;(b)文献[12]模型;(c)文献[11]模型;(d)本文模型

Fig. 10 Enlarged view of central area after noise pollution for three JND models. (a) Image after noise pollution; (b) model in Ref. [12]; (c) model in Ref. [11]; (d) our model

$$X_{ref}(x, y) = \begin{cases} X(x, 0), y = 0 \\ X(x, e_{edge}), y \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

设第 1、2、3、4 位平面的像素数据分别为 BIT1、BIT2、BIT3、BIT4。该算法首先选定参考像素 X_{ref} ，然后读取当前像素值 X_{cr} ，设置 X_{cr} 的 BIT1 等于 X_{ref} 的 BIT1，若差异 ΔX 小于等于 JND 阈值则保留修改值，若大于 J_{th} 则算法处理后数据的 BIT1 仍为 $X_{cr}(0)$ 。接下来依次对 BIT2、BIT3、BIT4 的数据重复以上步骤，最终得到处理后的数据 X_c 。根据 AE-FJND 模型对低 4 位平面进行处理是一个比特位优先级的迭代过程，对比特位中低位平面数据优先进行处理。在对低 4 位平面数据处理流程结束之后，算法再将高 15 位平面数据和处理后的低 4 位平面数据共同进行 WBBS 编码压缩。

6 硅基微显示器系统验证

6.1 硬件系统框架

针对上述压缩算法设计相应的微显示控制器，并在以 FPGA 为核心的验证平台上对硅基 OLED 微显示器进行点亮，以验证该算法在硬件上的可行性。硬件整体框架如图 11(a) 所示。

该硬件系统主要由视频源、微显示控制器以及硅基 OLED 微显示器三部分构成。VR 设备的视频源通常由电脑、手机等设备中的 GPU 提供。该微显示控制器主要分为图像压缩模块和扫描控制模块两部分。输入 FPGA 平台的数据首先经过图像预处理模块，该模块主要将接收的图像数据进行缩放和亮度、对比度、伽马校正等预处理。在 JND 阈值计算模

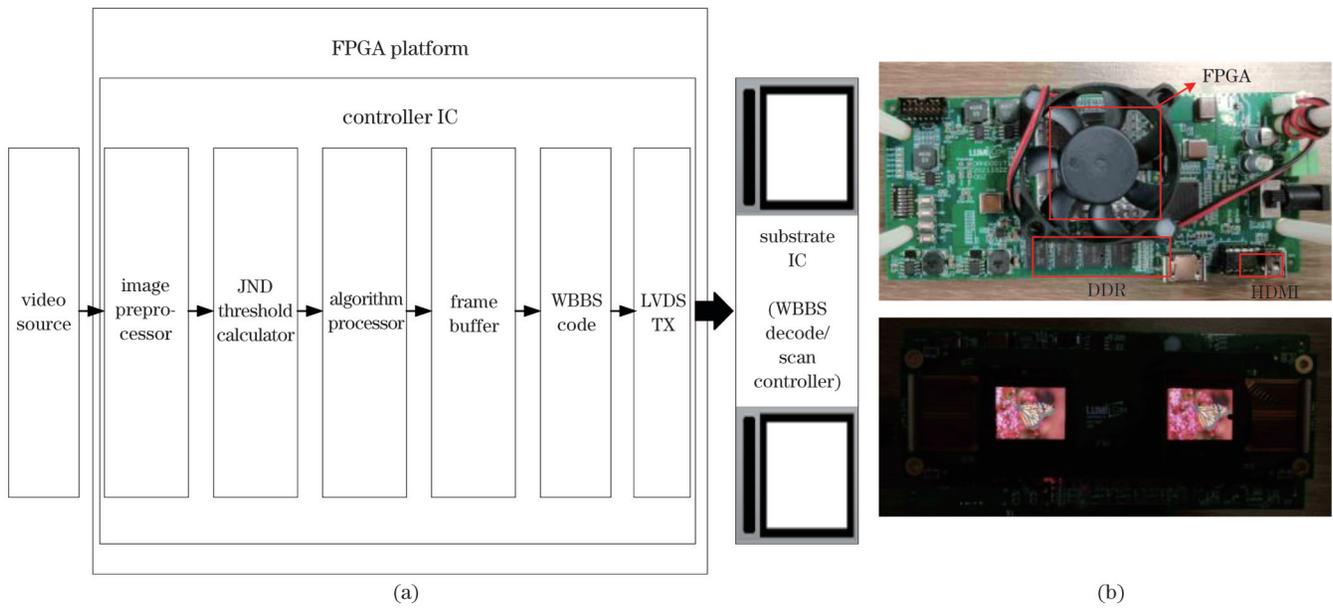


图 11 硬件系统。(a)硬件系统整体框架;(b)硬件测试平台实物图
Fig. 11 Hardware system. (a) Overall framework; (b) picture of hardware test platform

块中,采用两个缓存块保存图像数据,一个数据缓存块采用 4 个 FIFO 和 25 个移位寄存器获取像素值,之后通过加权模板计算出背景亮度以及偏心角,再根据 AE-FJND 模型计算得到当前图像块的 JND 值。另一个采用 SDRAM 存储器作为数据缓存块,存储图像的每个像素值。在算法处理模块中,根据 JND 阈值对图像的低 4 位平面数据进行修改,增加全黑或全白块的长度。之后图像数据经过帧缓存模块。在跳白黑块编码模块中,对经算法处理模块修改后的 19 位平面数据进行编码压缩。最终经由 LVDS 发送模块发送至扫描控制模块。在扫描控制模块中,首先通过跳白黑块解码模块将编码后的图像数据解码;然后根据所建立的扫描查找表(LUT)对 SDRAM 进行寻址,读取解码后的图像数据;最后连同控制信号一起输出至微显示器芯片,采用脉宽调制(PWM)的扫描方式对硅基 OLED 微显示器进行驱动^[3]。图 11(b)为硬件测试平台实物图,通过该平台成功驱动点亮硅基 OLED 微显示器,并对图像的压缩效果进行了显示,验证了所提算法在硬件方面的可行性。

6.2 压缩结果与分析

压缩测试所用的 25 张图像来自 LIVE 2006 数据集^[19],通过软件将其分辨率扩展为 3840 pixel×2056 pixel 以满足硅基 OLED 微显示器的分辨率。

图 12 为以 Lena 图为例,使用基于 AE-FJND 模型的位平面图像压缩算法进行处理前后各位平面压缩率的分布图。从图 12 可以看出,经该算法处理后,低 4 位平面压缩率大幅度降低。表 4 具体给出了算法处理前后 Lena 图低 4 位平面的压缩率对比。从表 4 可以看出,第 1 和第 2 位平面的压缩率分别降低

为压缩前的 20.15% 和 15.53%,第 3 和第 4 位平面压缩率也得到了很大改善,从而验证了该算法的有效性。

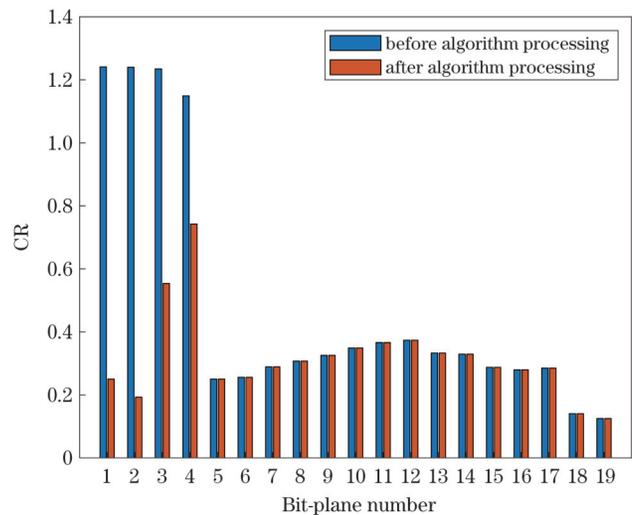


图 12 算法处理前后 Lena 图 19 位平面压缩率分布对比
Fig. 12 Comparison of 19-bit-plane compression ratio distribution of Lena before and after algorithm processing

表 4 算法处理前后 Lena 图低 4 位平面的压缩率对比
Table 4 Comparison of low 4-bit-plane compression ratio of Lena before and after algorithm processing unit:%

Bit-plane	BIT1	BIT2	BIT3	BIT4
Origin CR	124.09	123.99	123.46	114.91
Processed CR	25.00	19.26	55.37	74.23

为对压缩图像质量以及压缩率进行分析,将该算法与文献[11]采用的基于 FD-JND 模型的多重色阶

压缩算法进行对比。采用 PSNR、中心凹峰值信噪比 (FPSNR) 和结构相似性 (SSIM) 三个客观质量评价参数进行评价。针对人眼中心凹的视敏度分布特性, 对图像的中心区域和边缘区域分别计算 PSNR、FPSNR 和 SSIM。FPSNR 将 PSNR 与视敏度函数结合, 用来评估中心凹图像的整体质量。SSIM 可以对压缩前后图像在亮度、对比度以及结构方面进行相似

性评估, 压缩后图像与原图相似性越高, 其值越接近 1。

算法处理的结果如图 13 所示。与原图相比, 两种算法均能在人眼视敏度高的中心凹区域保持和原图相近的清晰度, 而在人眼视敏度低的边缘区域, 清晰度有所下降。文献 [11] 提出的算法舍弃了 JND 阈值范围内的 RGB 分量的色阶, 图像失真更明显。

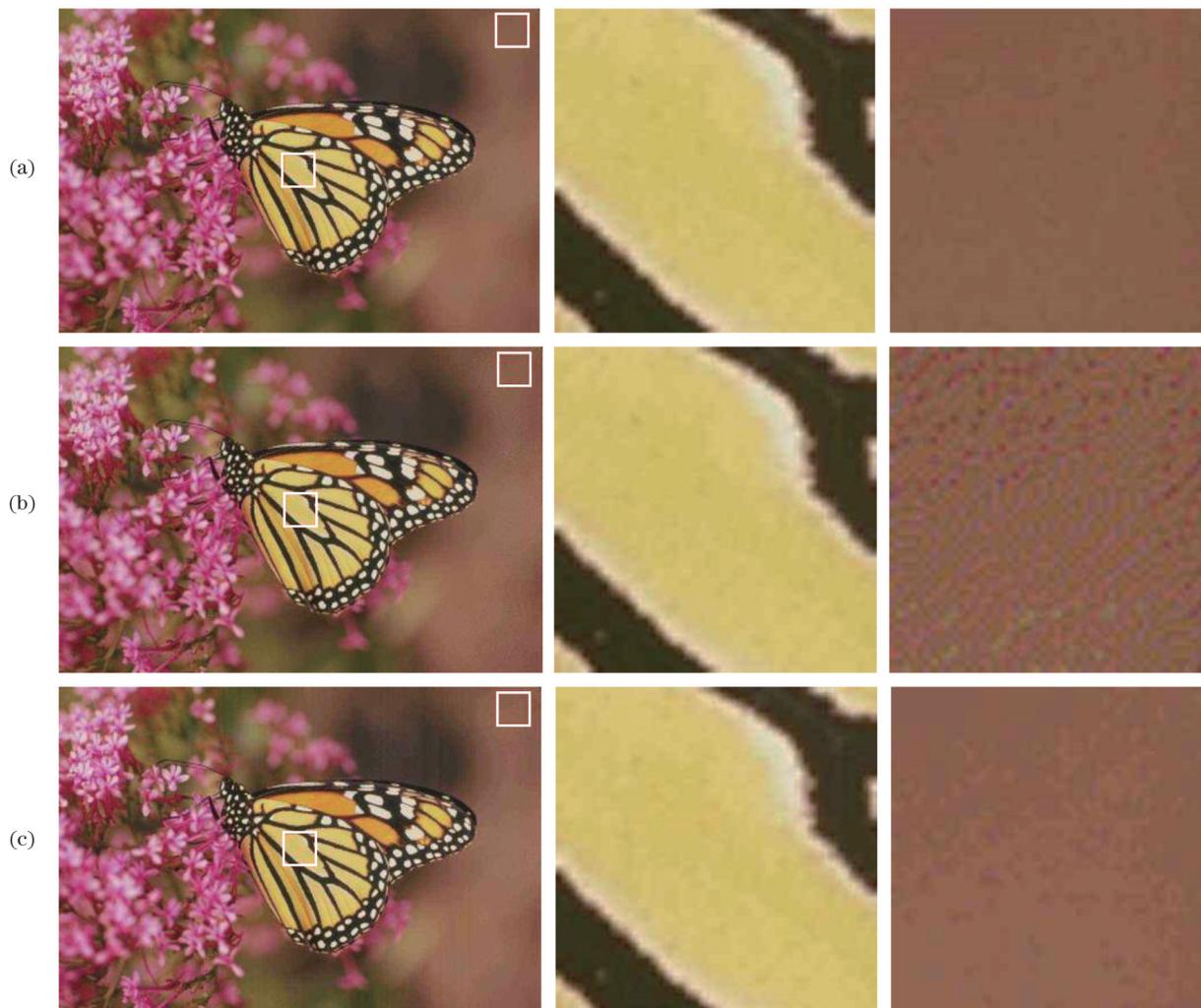


图 13 图像压缩效果的对比及其局部放大图。(a)原始图像;(b)文献[11]模型;(c)本文模型

Fig. 13 Compression effect comparison of images and partially enlarged view. (a) Original image; (b) model in Ref. [11]; (c) our model

表 5 为彩色图像压缩后各项评价指标和压缩率的对比数据。从表 5 可以看出, 在视场中心处, 用提出的算法压缩后的图像 PSNR 依然能保持在 59 dB 左右。文献 [11] 提出的算法在视场中心处的 PSNR 平均值可以达到 77.427 dB, 这表明本文提出的算法可以在不影响人眼视觉主观感受的前提下, 计算出更多的视觉冗余, 对图像进行更大程度的压缩。在视场边缘区域, 两种算法的 PSNR 均有下降, 文献 [11] 采用的算法下降更剧烈, 更容易对人眼主观观测产生影响。本文提出的算法在 FPSNR 和 SSIM 方面的平均值均高于文献 [11] 模型的结果, 表明在 VR 设备中显示的图像经本文算法压缩后在客观层面图像质量优于文献 [11] 模

型的结果。在压缩率方面, 本文提出的算法对图像平均压缩率能达到 39.573%, 较大程度上小于文献 [11] 的 67.077%, 表明提出的算法在压缩性能指标方面优于文献 [11] 模型。

针对位平面图像压缩, 季渊等 [20] 进行了大量的研究, 提出了一种基于位平面运动估计的视频压缩方案。表 6 列出了对图像数据压缩后的评价指标和压缩率对比结果。从表 6 可以看出, 本文提出的压缩算法在 PSNR、SSIM 和压缩率方面均优于文献 [20] 算法, 表明提出的算法能够在不影响人眼视觉感受并保证图像质量的情况下, 对图像进行更大程度的压缩。

表 5 不同压缩算法对彩色图像压缩后的各项评价指标和压缩率比较

Table 5 Comparison of evaluation indexes and compression ratio of different compression algorithms for color image compression

Image	PSNR ($e_x=0^\circ$) /dB		PSNR ($e_x=60^\circ$) /dB		FPSNR /dB		SSIM		CR/%	
	Ref. [11]	Ours	Ref. [11]	Ours	Ref. [11]	Ours	Ref. [11]	Ours	Ref. [11]	Ours
Bikes	76.06	56.35	47.84	53.72	43.56	43.57	0.95	0.99	70.16	46.18
Buildings	84.44	62.48	47.38	58.55	42.99	45.01	0.96	0.99	66.52	51.60
Caps	—	55.77	47.26	51.65	43.18	43.75	0.91	0.98	68.84	31.61
Carnivaldolls	70.01	65.42	47.05	54.39	40.50	47.34	0.87	0.99	62.44	37.08
Coinsinfountain	86.72	56.50	48.08	55.05	42.24	43.65	0.95	0.99	64.42	41.64
House	—	64.17	47.93	56.16	43.08	47.66	0.93	0.99	67.80	36.31
Lighthouse	77.00	63.30	48.67	56.63	44.41	43.78	0.94	0.99	70.78	38.90
Monarch	66.94	59.59	50.26	56.40	42.61	45.13	0.90	0.98	67.67	35.68
Ocean	—	56.45	46.73	54.91	42.49	43.81	0.91	0.98	68.86	35.44
Parrots	—	56.06	47.78	54.52	42.88	43.34	0.89	0.98	67.29	38.08
Plane	65.47	64.51	47.89	50.96	42.76	46.49	0.92	0.99	60.63	29.68
Rapids	86.47	56.57	46.84	53.99	43.01	43.92	0.91	0.99	69.58	36.05
Sailing4	74.96	56.56	48.37	56.28	43.33	43.57	0.92	0.99	69.14	37.15
Stream	—	56.45	47.93	54.70	43.48	43.89	0.97	0.99	68.23	48.47
Studentsculpture	86.20	62.55	47.77	56.52	42.13	47.04	0.97	0.99	63.80	49.73
Average	77.427	59.515	47.852	54.962	42.483	44.797	0.927	0.99	67.077	39.573

表 6 位平面压缩算法评价指标和压缩率比较

Table 6 Evaluation index and compression ratio comparison of bit-plane compression algorithms

Algorithm	PSNR /dB	SSIM	CR /%
Ref. [20]	37.66	0.97	72.22
Ours	55.63	0.99	39.57

7 结 论

本文为解决高分辨率、高刷新率的微显示器中视频数据传输量过大的问题,针对数字驱动硅基 OLED 微显示器的扫描方式,将视频数据按位平面进行压缩。由于 19 位平面图像的低位平面体现的是图像更多的细节,较难被进一步压缩,因此引入 JND 理论,考虑人眼的 HVA 和 VMA 这两种视觉特性,提出了 AE-FJND 模型,更符合人眼的视觉冗余特性。结合该模型,提出了一种与之相对应的位平面图像压缩算法,对低 4 位平面数据进行 JND 处理,然后分别对不同位平面进行 WBBS 编码压缩。针对该压缩算法设计了相应的硅基微显示控制器,在 FPGA 平台上成功驱动了硅基 OLED 显示器。结果表明,所提出的压缩算法在保证不影响人眼主观感受的前提下,能够较大程度地减少 VR 设备图像传输数据量,为解决“元宇宙”中 VR 设备面临的数据传输量大问题提供了一种较优的解决方案。

参 考 文 献

- [1] Ai T Y. Metaverse theory[J]. SSRN Electronic Journal, 2021: 3840764. DOI:10.2139/ssrn.3840764.
- [2] Huggett J. Virtually real or really virtual: towards a heritage metaverse[J]. Studies in Digital Heritage, 2020, 4(1): 1-15.
- [3] 季渊, 龚淑萍, 穆廷洲, 等. 基于亮度衰减模型的硅基 OLED 微显示器寿命研究[J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1923003. Ji Y, Gong S P, Mu T Z, et al. Lifetime of OLED-on-silicon microdisplay based on luminance decay model[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1923003.
- [4] 陈弈星, 夏军. 硅基微显示芯片综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011006. Chen Y X, Xia J. Review on silicon-based microdisplay chips[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011006.
- [5] Chen W D, Ji Y, Mu T Z, et al. Atomized scan method for high-definition silicon-based OLED microdisplays[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(10): 4293-4299.
- [6] 季渊, 许怡晴, 陈宝良, 等. 硅基微显示器发展现状与研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011007. Ji Y, Xu Y Q, Chen B L, et al. Development and research progress of silicon-based microdisplays[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011007.
- [7] Wu H R, Reibman A R, Lin W S, et al. Perceptual visual signal compression and transmission[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(9): 2025-2043.
- [8] Chou C H, Li Y C. A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable-distortion profile[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5(6): 467-476.
- [9] Fan Y, Larabi M C, Cheikh F A, et al. Just noticeable difference model for asymmetrically distorted stereoscopic images[C]// 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 12-17, 2019, Brighton, UK.

- New York: IEEE Press, 2019: 2277-2281.
- [10] Chen Z Z, Guillemot C. Perceptually-friendly H.264/AVC video coding based on foveated just-noticeable-distortion model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(6): 806-819.
- [11] 季渊, 郑志杰, 吴浩, 等. 立体视觉中心凹 JND 模型及其图像压缩硬件实现[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1210001.
Ji Y, Zheng Z J, Wu H, et al. Foveated JND model based on stereo vision and its application in image compression with hardware implementation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1210001.
- [12] Wang H K, Yu L, Wang S W, et al. A novel foveated-JND profile based on an adaptive foveated weighting model[C]//2018 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP), December 9-12, 2018, Taichung, Taiwan, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [13] 季渊, 王成其, 陈文栋, 等. OLED 微显示器的原子扫描策略[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 998-1005.
Ji Y, Wang C Q, Chen W D, et al. An atom scan strategy for OLED micro display[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(4): 998-1005.
- [14] 刘勇, 尹立新, 赵洋. 一种新的二值图像自适应跳块编码[J]. 计算机工程, 2009, 35(13): 219-221.
- Liu Y, Yin L X, Zhao Y. New adaptive block skipping coding of binary image[J]. Computer Engineering, 2009, 35(13): 219-221.
- [15] Alfonso J F, Fernández-Vega L, Senarís A, et al. Prospective study of the Acri. LISA bifocal intraocular lens[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2007, 33(11): 1930-1935.
- [16] Liu T S, Heeger D J, Carrasco M. Neural correlates of the visual vertical meridian asymmetry[J]. Journal of Vision, 2006, 6(11): 1294-1306.
- [17] Abrams J, Nizam A, Carrasco M. Isoeccentric locations are not equivalent: the extent of the vertical meridian asymmetry[J]. Vision Research, 2012, 52(1): 70-78.
- [18] García-Pérez M A. Forced-choice staircases with fixed step sizes: asymptotic and small-sample properties[J]. Vision Research, 1998, 38(12): 1861-1881.
- [19] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, et al. LIVE image quality assessment database release 2[EB/OL]. [2022-11-09]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [20] 季渊, 宋远胜, 陈远生, 等. 面向数字驱动近眼显示的位平面运动估计算法[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 0710001.
Ji Y, Song Y S, Chen Y S, et al. Bit-plane motion estimation for digitally driven near-eye display[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7): 0710001.

OLED-on-Silicon Micro-Display Based on Asymmetric Elliptical Foveated JND Model

Zhu Yichong¹, Ji Yuan^{1,2*}

¹Microelectronics Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

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

Abstract

Objective Micro-display is an important interface connecting the real world and the metaverse world. Compared with other types of micro-displays, organic light emitting diode (OLED) on silicon micro-displays have the advantages of high resolution, high integration, low power consumption, small size, and light weight, and they have become the preferred choice of near-eye display devices. Compared with traditional OLEDs-on-silicon driven by analog signal, OLED-on-silicon micro-display driven by digital signal has obvious advantages in ultra-high-definition display. Driven by users' demand for immersive experience of virtual reality (VR) and other near-eye display devices, near-eye displays are developing towards high resolution and high frame rate. However, this brings the problem of excessive video data transmission to the micro-display system. In order to give users a higher definition and smoother near-eye display experience, it is urgent to propose an image compression algorithm for micro-displays to solve the problem of excessive video data transmission.

Methods Since the lower 4 bit-planes of the 19-bit-plane image reflect the details of the image and are difficult to compress, just-noticeable difference (JND) theory is introduced. In recent years, scientific research has shown that the distribution of visual acuity is asymmetric in the whole fovea range, and the human visual system has horizontal-vertical anisotropy (HVA) and vertical-meridian asymmetry (VMA). To make the JND model more consistent with the characteristics of human vision, this paper carries out psychological experiments on the luminance, contrast and foveated masking characteristics of human vision, and constructs an asymmetric elliptical foveated JND (AE-FJND) model based on the experimental results. Combined with the JND model, a corresponding bit-plane image compression algorithm is proposed. The data of the lower 4 bit-planes are processed within the JND threshold range, and then all-bit-plane images are compressed. The algorithm can compress the image without affecting the subjective perception of the human eyes. The algorithm is compared with the previously proposed compression algorithms in the following aspects: the subjective feeling of the compressed image is evaluated by the definition of the enlarged image in the center of the image, the quality of the compressed image is assessed by peak signal-to-noise ratio (PSNR), fovea PSNR (FPSNR), structural similarity (SSIM) and other evaluation indicators, and the compression performance of the algorithm is rated by compression rate.

Results and Discussions The accuracy of the proposed AE-FJND model is verified by experiments. Subjective experiments showed that compared with the other two types of JND models, the AE-FJND model got a higher subjective score. For the same subjective score, the AE-FJND model can calculate more visual redundancy (Table 3). Objective experiments showed that the AE-FJND model had less noise distribution in the foveated area, and the amount of noise injected into the upper part of the image was

greater than that in the lower part, which is consistent with the visual characteristics of human HVA and VMA (Fig. 9). It can be seen from the enlarged image of the center area after noise pollution that the AE-FJND model has a high definition of the center area after noise pollution, and the result is similar to the original picture (Fig. 10). In addition, the compression effect of the proposed image compression algorithm is verified. This algorithm can solve the problem that the lower 4 bit-planes cannot be compressed (Fig. 12 and Table 4). The image compressed by this algorithm can maintain the same definition as the original image at the center of the image (Fig. 13). Compared with a comparable compression algorithm, this algorithm can calculate more visual redundancy without affecting the subjective perception of vision, and the compressed image quality is better. In addition, the compression rate is lower than that of the comparable algorithm, which can reach 39.573%, indicating that the compression performance is better (Table 5). Compared with another compression algorithm, the proposed algorithm has higher PSNR and SSIM, and lower compression rate, which shows that this algorithm can not only ensure image quality, but also compress the image to a greater extent (Table 6).

Conclusions In order to solve the problem of excessive video data transmission in high resolution and high frame rate micro-displays, this paper proposes an algorithm to compress the video data by bit-plane according to the scanning mode of digitally driven OLED-on-silicon micro-displays. Since the lower 4 bit-planes of the 19-bit-plane image reflect more details of the image and are difficult to be further compressed, the JND theory is introduced, and the two visual characteristics of the human eye, namely, HVA and VMA, are considered. An AE-FJND model is proposed, which is more consistent with the visual redundancy characteristics of the human eyes. Based on this model, a corresponding bit-plane image compression algorithm is proposed, which performs JND processing on the data of the lower 4 bit-planes, and then performs white-black-block-skip (WBBS) coding compression on different bit-planes respectively. According to the compression algorithm, the corresponding OLED-on-silicon micro-display controller is designed, and the OLED-on-silicon micro-display is successfully driven on the field programmable gate array (FPGA) platform. The bit-plane image compression algorithm based on this model can compress the image to a large extent without affecting the subjective feeling of the human eye. The average image compression rate can reach 39.573%, providing a relatively preferred solution to the problem of excessive data transmission faced by VR devices in the metaverse world.

Key words optical devices; vision optics; micro-display; human visual characteristics; asymmetric foveated JND; data transmission