

# 基于多尺度金字塔的硅基 OLED 微显示控制器

季渊<sup>1,2\*</sup>, 高钦<sup>1</sup>, 余云森<sup>1</sup>, 陈文栋<sup>2</sup>, 穆廷洲<sup>2</sup>, 冉峰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学微电子研究与开发中心, 上海 200444;

<sup>2</sup>上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444

**摘要** 针对近眼显示系统存在数据传输带宽过高的问题, 构建多尺度金字塔模型实现人眼视觉区域的多分辨率显示, 将人眼视觉区域空间变化率的特性应用到数据传输的过程中; 根据多尺度金字塔模型设计面向近眼显示系统的微显示控制器, 实现了对视频图像的编解码处理, 并在分辨率为  $1600 \times 1600 \times 3$  的全彩高清硅基有机发光二极管(OLED)微显示器上验证控制器的可行性。实验结果表明, 基于多尺度金字塔的多分辨率图像传输算法符合人眼的直观感受, 较好地去除了下采样过程中出现的边界线效应, 有效降低了数据的传输带宽, 能够满足近眼显示领域对微显示器实时渲染性能的要求。

**关键词** 光学器件; 视觉光学; 多尺度金字塔; 人眼视觉特性; 微显示器; 数据传输

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1223001

## OLED-on-Silicon Microdisplay Controller Based on Multi-Scale Pyramid

Ji Yuan<sup>1,2\*</sup>, Gao Qin<sup>1</sup>, Yu Yunsen<sup>1</sup>, Chen Wendong<sup>2</sup>, Mu Tingzhou<sup>2</sup>, Ran Feng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Microelectronic Research and Development Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract** With an aim to overcome the problem of excessive data transmission bandwidth in near-eye display systems, this study proposes a multiscale pyramid model to realize multi-resolution display in the human visual region. We apply the characteristics of the spatial change rate of the human visual region to the data transmission process. Based on a multi-scale pyramid model, a microdisplay controller for the near-eye display system is designed, realizing the encoding and decoding processes of the video image. The feasibility of this controller is verified on a  $1600 \times 1600 \times 3$  full-color high-definition OLED-on-silicon microdisplay. Experimental results show that the multi-resolution image fusion algorithm based on a multi-scale pyramid meets the visual perception requirements of human eyes and solves the boundary line effect appearing in the subsampling process, effectively reducing the data transmission bandwidth. The proposed algorithm satisfies the requirements for the real-time rendering performance of the microdisplay in the near-eye display field.

**Key words** optical devices; vision optics; multi-scale pyramid; human visual characteristic; microdisplay; data transmission

**OCIS codes** 230.3990; 110.2990; 200.3050; 330.4595

## 1 引 言

近眼显示器是一种位于人眼附近、由光学系统放大形成大视场的新型显示器, 可用于穿戴式近眼显示场景, 如虚拟现实<sup>[1-2]</sup>(VR)、增强现实(AR)领域。近年来, VR、AR 应用的持续升温推动近眼显示器向高分辨率和高刷新率的方向发展。其中, 硅基有机发光二极管(OLED)微显示器借助于成熟的

互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺, 具有面积小、像素密度高等优点<sup>[3]</sup>, 可提升用户对“虚拟世界”的沉浸感、减少因分辨率不足而造成的纱窗效应。然而, 随着分辨率和刷新率的不断提高, 近眼显示系统所需的显示数据量急剧提升, 微显示器的极小尺寸限制了数据带宽的增大, 当前技术的传输带宽难以承载 VR、AR 领域需求的海量视频图像数据。

考虑到视频图像信息源存在很大的视觉感知冗

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-07-21; 录用日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(61674100, 61774101)、军民融合发展专项(2019-jmrh1-kj37)

\* E-mail: jiyuan@shu.edu.cn

余<sup>[4]</sup>,传输并显示人眼视觉系统(HVS)不能觉察到的冗余信息对近眼显示系统来说是一种浪费,可利用人眼视觉特性<sup>[5]</sup>对图像进行数据压缩,从而减小近眼显示系统在数据传输带宽上面临的压力。基于视觉特性的视频编码技术主要包括基于人类视觉感兴趣区域(ROD)的视频编码<sup>[6]</sup>和基于中心凹的视频编码<sup>[7]</sup>。基于ROI的视频编码提取人眼的感兴趣区域并分配较多的码率以满足人眼的主观感受,但这类算法计算复杂度较高,不利于硬件化实现。基于中心凹模型的视频编码利用HVS在空间上采样不均匀的特性,在保证人眼感知质量的前提下减少视频码率。Zhang等<sup>[8]</sup>提出基于非线性Mipmap插值的实时Foveation滤波算法,对人眼的凝视效果进行模拟,但未考虑数据传输带宽方面的问题。季渊等<sup>[9]</sup>利用纹理金字塔,将人眼视觉特性应用到数据传输带宽领域,其在相邻图层间添加过渡带进行图层的融合,需要同时传输两个图层的数据。

鉴于此,本文首先通过构建多尺度金字塔进行多分辨率的图像融合,提出一种基于人眼视觉特性的近眼显示方法,在人眼凝视点附近提供高分辨率的显示画面,在边缘区域提供低分辨率的显示画面,并使分辨率随着空间分布从人眼凝视点向四周递减,从而降低数据传输带宽。然后设计面向近眼显示系统的微显示控制器,在分辨率为 $1600 \times 1600 \times 3$ 的全彩高清硅基OLED微显示器上实现了视频图像的实时显示,验证了所设计控制器的可行性。

## 2 多尺度金字塔模型

就空间而言,人眼在视线中心处的视觉敏感度最高,随着视角的增大,视觉敏感度越来越低。基于多尺度金字塔模型的多分辨率图像传输算法借鉴高斯尺度空间,构造多尺度金字塔代替空间变化的高斯滤波,模拟人眼凝视的中心凹视觉效果。该算法的主要流程如图1所示。

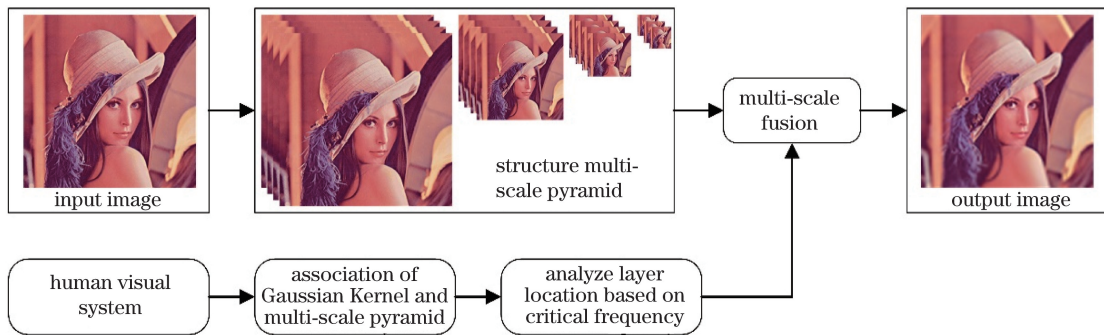


图1 基于多尺度金字塔的多分辨率图像传输算法

Fig. 1 Multi-resolution image transmission algorithm based on multi-scale pyramid

### 2.1 人眼临界频率

Kronauer等<sup>[10]</sup>在研究人类视网膜中心感光细胞的分布时发现,人眼在采集外界信息的过程中存在一种多尺度采样的特性。图2(a)为 $5^\circ \sim 50^\circ$ 视角范围内视网膜上感光细胞对视觉信息的采样模式,每个六边形单元代表相同数量的感光细胞。

人眼通过视网膜上的视锥细胞和视杆细胞获取

外界信息,感光细胞高度不均匀的分布导致HVS在空间上存在非均匀分辨率的特性。人眼视觉在中心凹处的空间分辨率最高,随着到中心凹距离的增加,空间分辨率下降很快。图2(b)为典型的人眼观看模式。假设图像的像素宽度为 $N$ ,人眼视线垂直于图像平面,人眼到图像平面的距离为 $Nv$ , $v$ 为视距,图像上某一像素点所处视角为 $e$ ,到凝视点的距离为 $d(x)$ 。

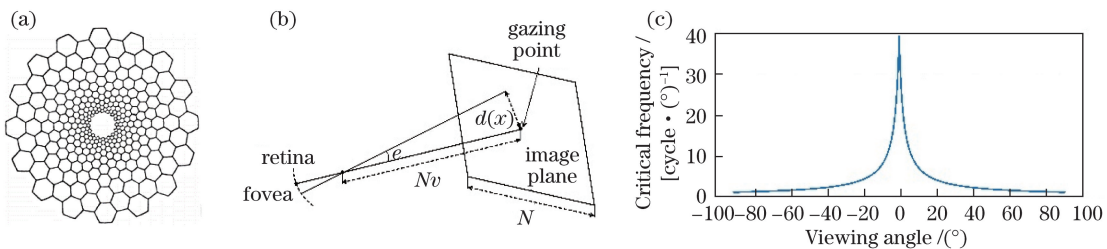


图2 人眼视觉特性。(a)人眼采样密度;(b)人眼观看模式;(c)临界频率与视角的关系

Fig. 2 Human visual characteristics. (a) Human eye sampling density; (b) human eye viewing mode; (c) relationship between critical frequency and viewing angle

基于大量的生理、心理学实验, Geisler 等<sup>[11]</sup> 提出人眼视觉的经验模型, 通过对比度阈值公式来确定人眼的中央凹区域, 人眼临界频率和视角之间的关系为

$$f_c(e) = -e_2 \ln(CT_0) / (ae + ae_2). \quad (1)$$

引用文献<sup>[11]</sup>的参数来设定对比度敏感模型, 其中空间频率衰减系数常数  $\alpha$  取 0.106, 最小对比度阈值  $CT_0$  取 1/64, 半分辨率偏心率常量  $e_2$  取 2.3, 得到人眼临界频率  $f_c$  和视角  $e$  之间的关系如图 2(c) 所示。

### 2.2 构造多尺度金字塔

HVS 多尺度采样的特性在模拟人眼凝视效果的视觉模型中被频繁采用。Itti 等<sup>[12]</sup> 提出多分辨率金字塔模型, 将人眼多尺度采样特性体现在不同分辨率的采样层次上。然而, 多分辨率金字塔模型中使用的下采样操作会大幅度地减少视频图像中的高频信息, 导致相邻图层之间存在非常明显的边界线效应, 不符合人眼的生理特性。边界线效应会导致在人眼凝视点位置发生改变及图像运动到图层交界处时出现图像混淆。

高斯尺度空间能最大限度地模拟 HVS 在不同距离尺度下获取到的图像信息。因此, 本文借鉴高斯尺度空间的概念, 构造适用于人眼视觉特性的多尺度金字塔<sup>[13-15]</sup>。首先对输入的图像进行高斯滤波和下采样操作, 建立图像金字塔以降低数据的传输带宽。设  $I^0$  为输入图像,  $I^l$  为第  $l$  次滤波下采样所得到的图像, 则下一次滤波下采样图像  $I^{l+1}$  为

$$I^{l+1}(x, y) = \sum_{i=-p}^p \sum_{j=-p}^p \omega(i, j) I^l(2x - i, 2y - j), \quad (2)$$

式中:  $\omega(i, j)$  为  $p \times p$  的高斯卷积模板。下采样操作选取滤波图像的奇数行、奇数列, 使得图层  $I^{l+1}$  的像素数据总量为图层  $I^l$  的 1/4。然后对原始图像与每一滤波下采样图层进行不同尺度的高斯滤波, 得到临界频率平缓变化的、不同模糊程度的多个图层, 以在实际显示过程中消除边界线效应。各下采样图层及其对应的不同尺度高斯滤波图像为同一组 (octave), 多尺度金字塔模型如图 3 所示。同一组各个图层的分辨率大小相同。

### 2.3 多分辨率图像生成

高斯滤波可较好地滤除视频图像中的高频信息, 本研究采用空间变化的高斯滤波来模拟人眼视觉灵敏度下降的效果。实验中使用 MATLAB 软件进行

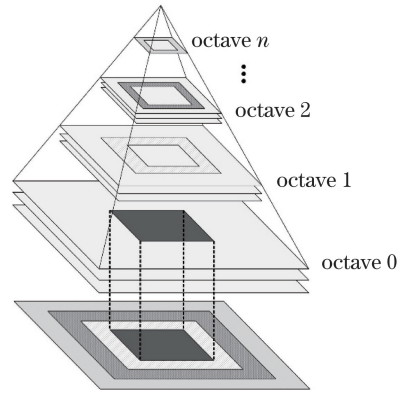


图 3 多尺度金字塔模型

Fig. 3 Multi-scale pyramid model

多尺度金字塔和人眼临界频率的关联。首先, 生成不同高斯核半径的高斯滤波图像及多尺度金字塔的各个图层, 并将多尺度金字塔中除 octave 0 以外的图层通过双线性插值法放大到原始分辨率大小。然后, 用逐像素最小均方差法将多尺度金字塔图层与高斯滤波图像进行关联, 得到各图层所对应的高斯核半径  $\sigma$ 。

利用文献<sup>[8]</sup>中高斯核半径  $\sigma$  与人眼临界频率  $f_c$  的关系, 可推导出不同尺度滤波图像在显示器图像平面中所处的位置, 其对应关系为

$$\sigma = \frac{d(x)}{e} \cdot \frac{1}{1.86 f_c} = \frac{d(x)}{\arctan[d(x)/Nv]} \cdot \frac{\alpha \{e_2 + \arctan[d(x)/Nv]\}}{1.86[-e_2 \ln(CT_0)]}. \quad (3)$$

由此, 可得到多尺度金字塔各图层的图像混合输出结构, 如图 4 所示。在同一组中, 使用多尺度滤波图层代替下采样图层的边缘区域, 模拟出人眼临界频率平缓变化的效果。

## 3 微显示控制器

针对基于多尺度金字塔的多分辨率图像传输算法, 设计出一款面向近眼显示系统的微显示控制器。其结构如图 5 所示, 主要包含金字塔编码、图像合成和扫描控制 3 个模块。金字塔编码模块主要完成对输入图像的下采样、多尺度滤波等操作, 构建多尺度金字塔, 并将图像数据发送至低压差分信号 (LVDS) 接口进行传输; 图像合成模块用于对接收到的不同分辨率图像进行缩放、融合; 扫描控制模块用于驱动硅基 OLED 微显示器, 产生控制硅基 OLED 微显示器所需的控制信号。微显示控制器对输入的每一帧图像进行流水线处理, 以满足系统的实时性要求。

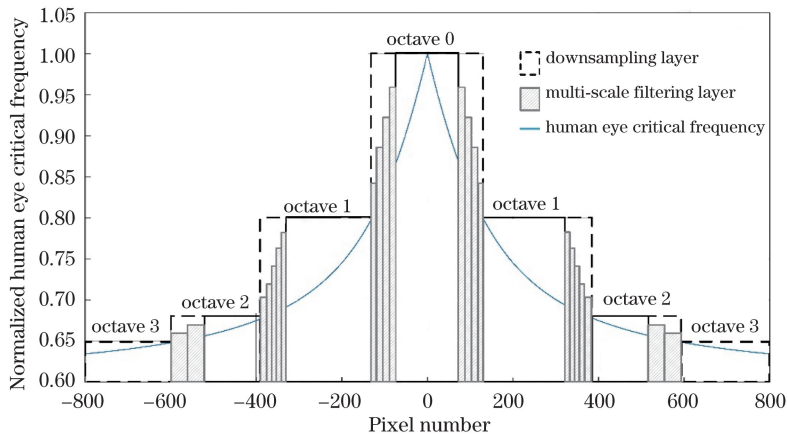


图 4 多尺度金字塔图像混合输出结构

Fig. 4 Multi-scale pyramid image hybrid output structure

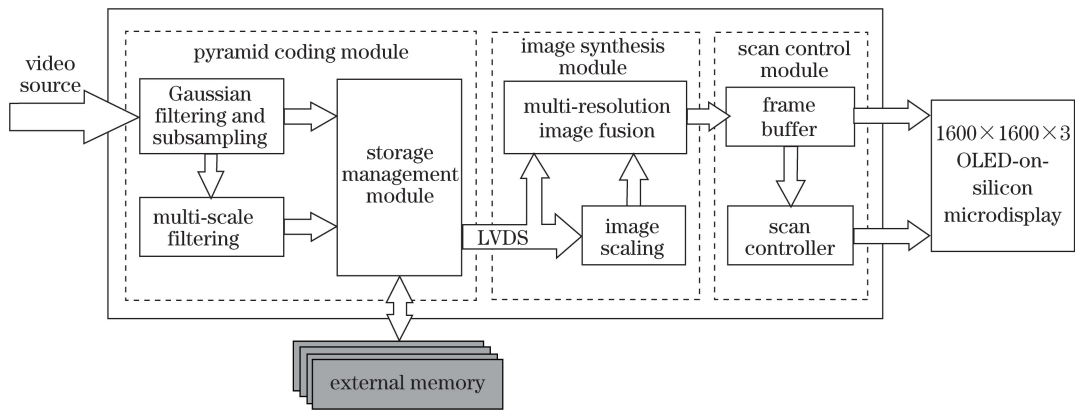


图 5 控制器系统框图

Fig. 5 Diagram of controller system

### 3.1 金字塔编码模块

微显示控制器的输入为高清晰度多媒体接口 (HDMI)信号,经过解码芯片后得到符合视频电子

标准协会(VESA)标准的视频图像数据。金字塔编码模块对输入图像进行下采样和多尺度滤波操作构建多尺度金字塔,具体流程如图 6 所示。

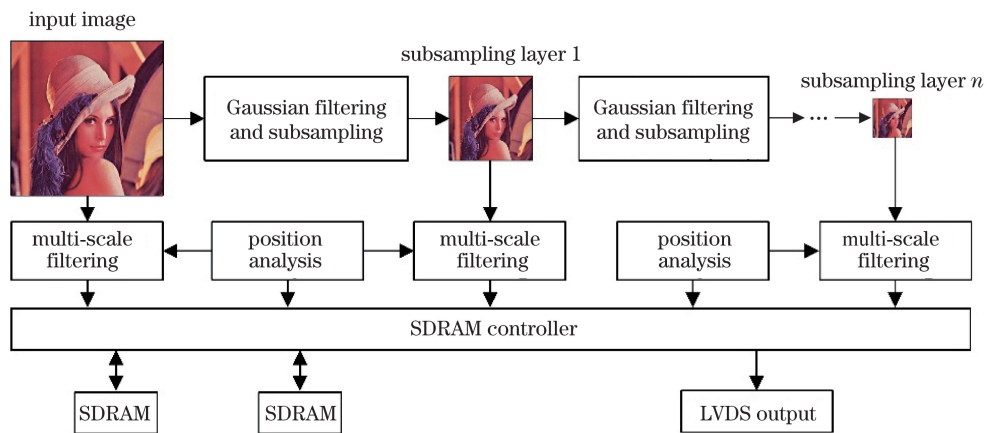


图 6 多尺度金字塔编码流程

Fig. 6 Coding process of multi-scale pyramid

下采样之前需对图像进行高斯滤波,去除下采样之后图像放大操作造成的块状效应。利用现场可

编程门阵列(FPGA)并行流水的特性,对输入数据流进行缓存用于高斯滤波。根据卷积窗口的大小进



行缓存,将缓存的像素再次缓存形成矩阵窗口,然后进行卷积运算。以  $3 \times 3$  窗口为例,使用 2 个 FIFO 存储器 和 9 个移位寄存器获得卷积所需的像素值,以  $3 \times 3$  卷积模板对图像进行遍历运算,得到卷积之后的新图像。

在 高 斯 滤 波 的 同 时,选 择 隔 行、隔 列 的 输 出 数 据,进 入 下 一 高 斯 滤 波 模 块,通 过 深 度 减 半 的 FIFO 进 行 缓 存 和 卷 积,即 可 获 得 下 一 图 层 的 视 频 图 像 数 据,其 长、宽 皆 为 当 前 图 层 的  $1/2$ 。以 此 类 推,得 到 所 有 的 下 采 样 图 层。

下 采 样 操 作 产 生 的 图 像 金 字 塔,其 相 邻 图 层 所 对 应 的 人 眼 临 界 频 率 相 差 较 大,需 要 对 下 采 样 得 到 的 图 层 进 行 多 尺 度 滤 波。若 采 用 并 行 结 构 设 计,可 对 下 采 样 图 层 进 行 独 立 的 不 同 高 斯 核 半 径 的 滤 波。考 虑 到 硬 件 资 源 的 消 耗,利 用 高 斯 函 数 的 半 群 性 质<sup>[16]</sup>对 下 采 样 图 层 进 行 叠 加 滤 波。如 图 7 所 示,  $image_0$  为 输 入 的 下 采 样 图 层,经 行 缓 存 并 行 进 入 卷 积 窗 口,得 到  $image_1$  和  $image_2$ ,再 将  $image_1$  的 图 像 数 据 流 入 下 一 尺 度 的 高 斯 滤 波 模 块,得 到  $image_3$  和  $image_4$ 。其 中  $image_3$  由 滤 波 函 数 1 和 3 卷 积 得 到,  $image_4$  由 滤 波 函 数 1 和 4 卷 积 得 到。通 过 两 个 较 小 尺 度 参 数 的 高 斯 函 数 卷 积,得 到 一 个 大 尺 度 参 数 的 高 斯 函 数。同 时,利 用 FPGA 基 于 流 的 操 作<sup>[17]</sup>,尽 可 能 减 少 金 字 塔 生 成 过 程 中 所 使 用 的 存 储 单 元。

下 采 样 和 多 尺 度 滤 波 操 作 所 生 成 的 各 个 图 层 经 存 储 管 理 器 存 入 片 外 SDRAM 中,存 储 管 理 器 从 每

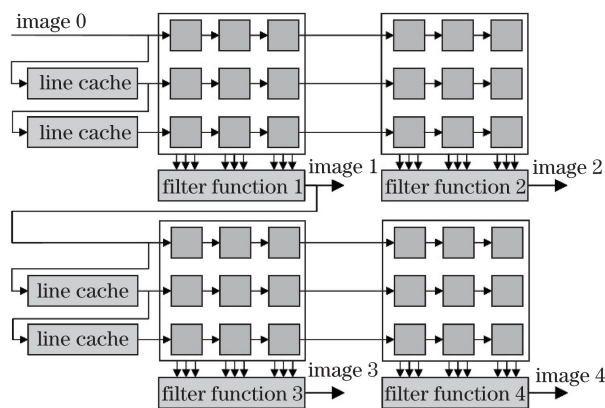


图 7 多尺度滤波操作

Fig. 7 Multi-scale filtering operation

一 下 采 样 图 层 和 其 所 对 应 的 多 尺 度 图 层 中 选 取 相 应 位 置 的 像 素 数 据,通 过 LVDS 接 口 传 给 图 像 解 码 模 块。

### 3.2 图像合成模块

金 字 塔 编 码 模 块 输 出 的 视 频 图 像 数 据 经 过 LVDS 接 口 解 码 后,还 原 成 多 分 辨 率 的 输 入 图 像,图 像 合 成 模 块 对 多 分 辨 率 图 像 进 行 双 线 性 插 值 放 大,同 时 根 据 各 图 层 的 位 置 对 图 层 进 行 融 合,流 程 结 构 如 图 8 所 示。由 于 各 图 层 的 缩 放 倍 数 均 为 2 的 指 数 幂,考 虑 到 乘 法 的 运 算 速 度 和 对 硬 件 资 源 的 消 耗,采 用 移 位 操 作 代 替 乘 法,优 化 运 算 效 率。图 层  $n$  放 大 2 倍 之 后 与 图 层  $n-1$  进 行 合 并,再 进 行 放 大 操 作。依 此 类 推,最 终 将 图 像 放 大 至 原 始 分 辨 率 大 小,将 其 存 入 帧 缓 存 中,以 供 扫 描 控 制 模 块 进 行 扫 描 输 出。

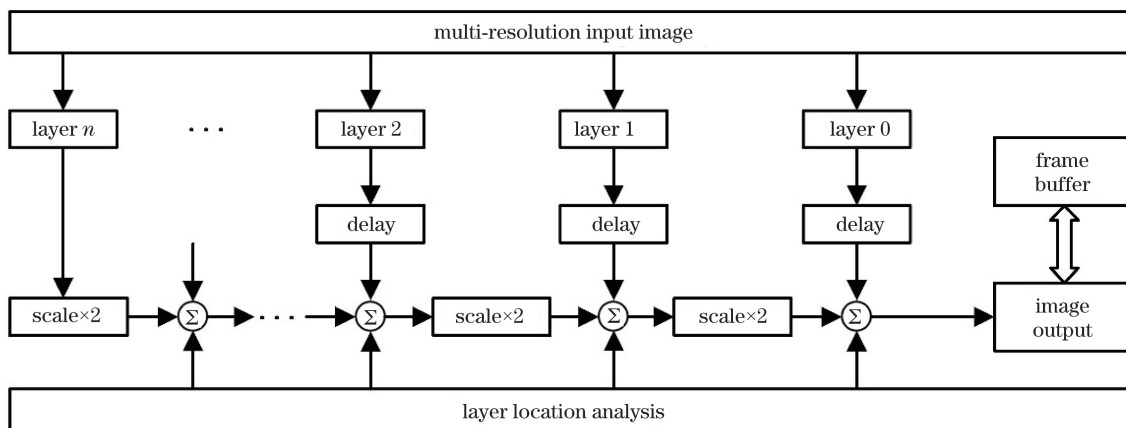


图 8 图像合成模块流程

Fig. 8 Flow of image synthesis module

### 3.3 扫描控制模块

扫 描 控 制 模 块 采 用 数 字 脉 宽 调 变 (PWM) 的 扫 描 方 式 对 硅 基 OLED 微 显 示 器 进 行 驱 动。首 先,对 图 像 合 成 模 块 缓 存 输 出 的 一 帧 图 像 进 行 数 据 接 收 和

预 处 理,按 位 平 面 进 行 分 区 域 存 储;然 后,根 据 所 建 立 的 扫 描 LUT 对 SDRAM 进 行 寻 址,读 取 出 像 素 数 据;最 后,连 同 控 制 信 号 一 起 输 出 至 微 显 示 器 芯 片,将 视 频 图 像 扫 描 到 硅 基 OLED 微 显 示 器 上。

### 4 硬件系统验证

通过硅基 OLED 微显示器测试平台验证基于多尺度金字塔的微显示控制器的可行性。硬件测试平台如图 9 所示,主要包括输入视频源、微显示控制器和硅基 OLED 微显示器芯片 3 个部分。输入视频源由计算机通过 HDMI 接口提供;微显示控制器包含金字塔编码模块、图像融合模块及扫描控制模块;所选微显示器的分辨率为  $1600 \times 1600 \times 3$ ,采用数字驱动方式,灰度级为 256,微显示器尺寸为 1.15 inch ( $2.921 \text{ cm}$ ),全彩像素尺寸为  $12.9 \mu\text{m} \times 12.9 \mu\text{m}$ 。

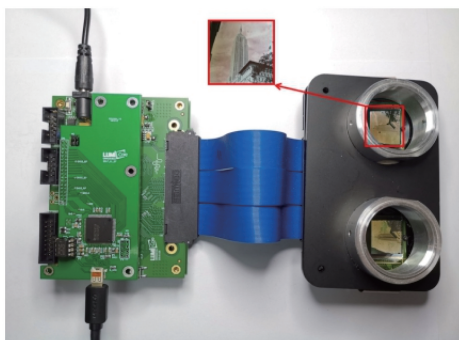


图 9 硬件测试平台

Fig. 9 Hardware test platform

图 10 为基于多尺度金字塔的多分辨率图像传输算法的凝视效果图。其中,图 10(a)为仅使用下采样图层进行传输的效果图,图 10(b)为本文方法的效果图。可以看出,多尺度滤波可以较好地去除边界线效应,符合人眼视觉分辨率平缓变化的特性。

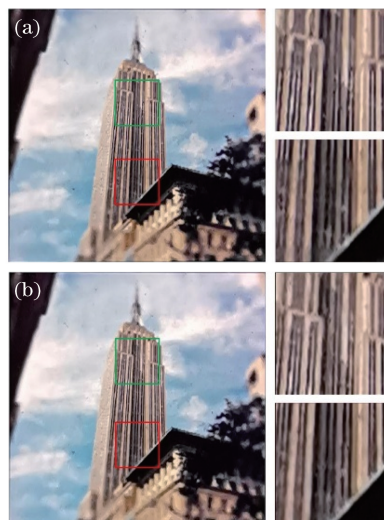


图 10 凝视效果对比图。(a)仅使用下采样图层进行传输的效果图;(b)本文方法的效果图

Fig. 10 Comparison of gaze effects. (a) Effect of just using the downsampling layer to transfer; (b) effect of the proposed method

图 11 为不同视距、不同凝视点的效果图,从左至右视距  $v$  依次为 1、2、3、4。图 11(a)~(d)为凝视点在屏幕中央的效果图,而图 11(e)~(h)为凝视点在屏幕左下角人像处的效果图。随着  $v$  的增大,微显示器所处人眼视角范围不断减小,对应人眼凝视的中心区域越来越大,整体图像越来越清晰,而图像的压缩比随之减小。表 1 为微显示器帧频为 60 Hz 时,不同视距  $v$  下采用不同组数多尺度金字塔对  $1600 \times 1600 \times 3$  分辨率图像进行压缩的效果对比。

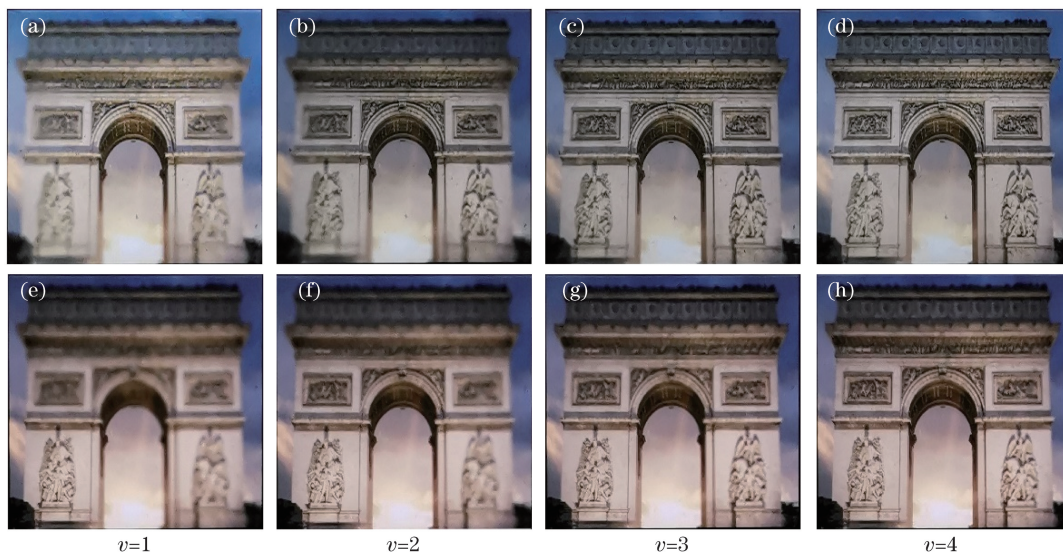


图 11 不同视距的滤波效果对比。(a)~(d)凝视点在屏幕中央的效果图;(e)~(h)凝视点在屏幕左下角人像处的效果图

Fig. 11 Comparison of filtering effects under different stadia. (a)-(d) Effect of gaze point in the center of screen; (e)-(h) effect of gaze point in the lower left corner of screen

表 1 不同视距下多尺度金字塔压缩效果对比  
( $N=1600$ , 灰度级为 256, 数据位宽为 24 bit)

Table 1 Comparison of compression effects of multi-scale pyramids under different stadia ( $N$  is 1600, gray level is 256, and data width is 24 bit)

$v$	Multi-scale pyramid	Data transmission frequency /MHz	Compression ratio
1	4 octaves	11.6	13.3
2	3 octaves	18.1	8.5
3	3 octaves	40.4	3.8
4	2 octaves	118.2	1.3

表 2 不同分辨率下 4 组多尺度金字塔压缩效果 ( $v=1$ , 灰度级为 256, 数据位宽为 24 bit)

Table 2 Comparison of compression effects of four multi-scale pyramids under different resolutions ( $v$  is 1, gray level is 256, and data width is 24 bit)

Resolution	Total number of pixels	Data transmission frequency /MHz		Compression ratio
		original	compressed	
1280×1024	1,310,720	78.6	7.9	9.88
1600×1200	1,920,000	115.2	10.9	10.60
1600×1600	2,560,000	153.6	11.6	13.30
1920×1080	2,073,600	124.4	12.3	10.10

$v$  的不同,采用不同组数多尺度金字塔进行人眼凝视效果的模拟。使用所设计的微显示控制器,成功驱动分辨率为  $1600 \times 1600 \times 3$  的全彩高清硅基 OLED 微显示屏。实验结果表明,多尺度金字塔模型能够很好地模拟人眼的凝视效果,同时有效降低视频图像数据的传输带宽,使得相同传输频率下能够传输更高分辨率的视频图像。该设计能够很好地满足近眼显示领域对微显示器实时渲染性能的要求。下一步本课题组将结合微显示控制器与眼动追踪装置,进行实时的注视点渲染研究。

### 参 考 文 献

- [1] Yang H, Liu X L. Overview of virtual reality technique[J]. Software Guide, 2016, 15(4): 35-38. 杨欢, 刘小玲. 虚拟现实系统综述[J]. 软件导刊, 2016, 15(4): 35-38.
- [2] Cao X. Technological bottleneck of virtual reality[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(15): 94-103. 曹焯. 虚拟现实的技术瓶颈[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 94-103.
- [3] 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. 季渊, 王成其, 陈文栋, 等. OLED 微显示器的原子扫

表 2 为采用 4 组多尺度金字塔对不同分辨率的微显示器进行驱动的压缩效果对比。由于人眼视觉区域的空间分辨率与该区域所处人眼视角有关,本文方法在驱动分辨率为  $1600 \times 1600 \times 3$  的微显示器时压缩效果最好。

## 5 结 论

介绍了一种基于多尺度金字塔的多分辨率图像传输算法及其相应控制器的设计。借鉴高斯尺度空间,构造了多尺度金字塔模型以进行多分辨率的图像融合,在降低数据传输带宽的同时,较好地模拟了人眼视觉分辨率在空间上的平滑变化。根据视距

- [4] Majid M, Owais M, Anwar S M. Visual saliency based redundancy allocation in HEVC compatible multiple description video coding[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(16): 20955-20977.
- [5] Liu X S, Shen J X, Zhang Y P. Adaptive support weight stereo matching algorithm based on human visual characteristics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031013. 刘雪松, 沈建新, 张燕平. 基于人眼视觉特性的自适应支持权重立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031013.
- [6] Wu Z Q, Yu M, Jiang H, *et al.* 360° panoramic video coding based on region of interest[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061013. 吴志强, 郁梅, 姜浩, 等. 基于感兴趣区域的 360°全景视频编码[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061013.
- [7] Jiang G Y, Zhu Y P, Yu M, *et al.* Perceptual video coding: a survey [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 474-483. 蒋刚毅, 朱亚培, 郁梅, 等. 基于感知的视频编码方法综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 474-483.
- [8] Zhang X, Wang Z Y, Wang R, *et al.* Real-time foveation filtering using nonlinear Mipmap interpolation [J]. The Visual Computer, 2010, 26(6/7/8): 923-932.

- [9] Ji Y, Yu Y S, Gao Q, *et al.* System of OLED-on-silicon micro display based on visual perception of human eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0411001.  
季渊, 余云森, 高钦, 等. 基于人眼视觉特性的硅基 OLED 微显示器系统[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0411001.
- [10] Kronauer R E, Zeevi Y Y. Reorganization and diversification of signals in vision[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, SMC-15(1): 91-101.
- [11] Geisler W S, Perry J S. Real-time foveated multiresolution system for low-bandwidth video communication[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3299: 294-305.
- [12] Itti L, Koch C. Computational modelling of visual attention[J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2001, 2(3): 194-203.
- [13] Wang H Y, Wang L, Yin W R, *et al.* Multi-scale correlation filtering visual tracking algorithm combined with target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0115004.  
王红雨, 汪梁, 尹午荣, 等. 结合目标检测的多尺度相关滤波视觉跟踪算法[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0115004.
- [14] Liu X H, Chen Z B. Fusion of infrared and visible images based on multi-scale directional guided filter and convolutional sparse representation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1110004.  
刘先红, 陈志斌. 基于多尺度方向引导滤波和卷积稀疏表示的红外与可见光图像融合[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1110004.
- [15] Li Q Y, Shang G C, Tian Q, *et al.* No-reference quality assessment method of evaluating scanning electron microscopy images based on multi-scale characteristics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111005.  
李巧月, 商钢城, 田强, 等. 基于多尺度的扫描电镜图像无参考质量评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111005.
- [16] Yang C. FPGA architecture implementation of the SIFT algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 7-11.  
杨诚. 基于 FPGA 的 SIFT 算法架构实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 7-11.
- [17] Li P C, Liu K, Jiang J F, *et al.* Research on polarization control of distributed optical fiber sensing system based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510002.  
李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于 FPGA 的分布式光纤传感系统偏振控制研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510002.