

文章编号:1007-2780(2025)09-1275-14

基于色差的自适应权重亚像素渲染算法

董家昌^{1,2}, 温元毅^{1,2}, 郑喜凤^{1,3*}, 黄德举^{1,2}, 毛新越^{1,3}, 赵丽婷³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 长春希达电子技术有限公司, 吉林 长春 130103)

摘要: Micro-LED 显示通过亚像素复用技术实现了超越显示器物理分辨率的图像呈现, 从而在提升感知分辨率的同时有效降低了生产成本。然而, 传统针对 RGB 三角排布的不加权平均渲染算法容易导致颜色失真问题, 进而严重影响图像显示质量和用户的观看体验。为解决这一问题, 本文提出了一种基于色差的自适应权重亚像素渲染算法。该算法由图像预处理模块、颜色空间转换模块、自适应权重计算模块和亚像素渲染模块构成。首先, 图像预处理模块对输入图像进行边界扩展, 确保在后续亚像素渲染过程中不会出现越界问题。接着, 颜色空间转换模块将读取到的像素进行通道分离与扩展, 并从 sRGB 颜色空间转换至 CIELab 颜色空间。随后, 自适应权重计算模块通过计算像素间色差的极差实现场景匹配, 为输出亚像素赋值。若未能匹配到对应场景, 则选取中心像素, 并根据相邻像素的色差计算权重值。最后, 亚像素渲染模块依据权重值计算输出亚像素的灰度值, 完成最终图像的渲染。实验结果表明, 相较于传统的不加权平均亚像素渲染算法, 本文提出的基于色差的自适应权重亚像素渲染算法在 DIV2K 数据集上的表现更为优异。具体而言, 均方误差降低了 14.537 61, 峰值信噪比提升了 0.828 21 dB, 结构相似度提高了 0.014 96, 特征相似性指数提高了 0.000 83, 视觉信息保真度提高了 0.009 66。该算法显著抑制了颜色失真问题, 有效提升了显示质量及用户的观看体验。

关键词: Micro-LED; 亚像素复用; 色差; 自适应权重分配; 亚像素渲染

中图分类号: TN27; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0134 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0134

Adaptive weight sub-pixel rendering algorithm based on chromatic aberration

DONG Jiachang^{1,2}, WEN Yuanyi^{1,2}, ZHENG Xifeng^{1,3*}, HUANG Deju^{1,2},
MAO Xinyue^{1,3}, ZHAO Liting³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changchun Cedar Electronics Technology Co. Ltd., Changchun 130103, China)

Abstract: Micro-LED displays achieve image rendering beyond the physical resolution of the display by means of sub-pixel multiplexing technology, which effectively reduces the production cost while improving the perceived resolution. However, the traditional unweighted average rendering algorithm for the

收稿日期: 2025-06-25; 修订日期: 2025-07-11.

基金项目: 吉林省科技发展计划 (No.20230201001GX)

Supported by Jilin Science and Technology Development Programme (No.20230201001GX)

*通信联系人, E-mail: zhengxf@ccxida.com

triangular arrangement of RGB subpixels easily leads to the problem of color distortion, which in turn seriously affects the image display quality and user viewing experience. To solve this problem, this paper proposes an adaptive weighted subpixel rendering algorithm based on color difference. The algorithm consists of an image preprocessing module, a color space conversion module, an adaptive weight calculation module, and a subpixel rendering module. Firstly, the image preprocessing module extends the boundaries of the input image to ensure that no boundary-crossing problem occurs in the subsequent subpixel rendering process. Next, the color space conversion module separates and expands the channels of the read pixels and converts them from the sRGB color space to the CIE Lab color space. Subsequently, the adaptive weight calculation module achieves scene matching by calculating the color difference polarity between pixels and assigns values to the output subpixels. If it fails to match the corresponding scene, the center pixel is selected and the weight value is calculated based on the color difference of the neighboring pixels. Finally, the subpixel rendering module outputs the grayscale value of the subpixel based on the calculated weight value to complete the rendering of the final image. The experimental results show that compared with the traditional unweighted average subpixel rendering algorithm, the color difference-based adaptive weighted subpixel rendering algorithm proposed in this paper performs better on the DIV2K dataset. Specifically, the mean square error is reduced by 14.537 61, the peak signal-to-noise ratio is improved by 0.828 21 dB, and the structural similarity is improved by 0.014 96, the feature similarity index increased by 0.000 83, and the fidelity of visual information increased by 0.009 66. The algorithm significantly suppresses the color distortion problem, which effectively improves the display quality and the user viewing experience.

Key words: Micro-LED; sub-pixel multiplexing; color difference; adaptive weight assignment; sub-pixel rendering

1 引 言

随着显示技术的不断发展,LED 凭借其高效能、低功耗、长寿命以及环保等优势,逐渐成为主流显示技术^[1]。Micro-LED 作为当前显示技术的新高峰,其采用微米级(通常小于 50 μm)的无机 LED 器件作为发光像素,实现了主动发光的矩阵式显示。这一技术不仅继承了传统 LED 的各项优点,而且在亮度、对比度、响应速度、色彩饱和度及耐用性等方面也表现出卓越性能,被视为下一代显示技术的理想选择^[2]。然而,随着市场对超高分辨率、超高亮度以及超大尺寸显示需求的不断增长,LED 显示正朝着更小像素尺寸、更小像素间距和更高像素密度的方向发展,其应用也从传统的户外及室内大间距显示逐步转向室内高清细腻需求的小间距及微间距 LED 显示^[3-4]。然而,尽管通过提升像素密度可以满足更高的显示分辨率要求^[5],但同时也导致工艺复杂度和制造成本的指数级上升^[6]。此外,像素密度的增加

也引发了更为严峻的散热问题,进一步加剧显示系统的不稳定性,制约了 Micro-LED 技术的大规模商业化应用。在此背景下,亚像素复用技术应运而生,通过单个亚像素被多个像素共用来提高感知分辨率,这种方法不仅可以在不影响显示效果的前提下显著提升分辨率,还能够有效降低生产成本并缓解散热问题。这种技术推动了显示行业向更高性能、更低能耗和更具经济效益的方向发展,有助于加快 Micro-LED 技术的大规模商业化进程。

根据 Micro-LED 亚像素不同的排布方式,目前排布主要有 RGBG 方形排列^[7]和 RGB 三角排布^[8]两种。当前 LED 显示主要采用亚像素邻近复用算法,通过有效利用相邻的亚像素来提升显示效果和图像质量。长春希达电子技术有限公司是国内最早从事 LED 亚像素显示技术研究的企业,2005 已经申请了关于亚像素排布方式和亚像素邻近复用算法的专利^[8]。除了长春希达公司之外,国内的雷曼光电^[9]、中麒光电^[10]以及西安诺

瓦星云^[11]等企业也在LED亚像素显示技术方面展开了研究。然而这些研究大多局限于简单易实现的亚像素邻近复用算法,缺乏更深入的技术探索。因此,深入研究Micro-LED亚像素显示技术不仅有助于突破当前的显示瓶颈,提升图像显示细腻度和抗混叠性能,同时也是推动下一代高分辨率、低功耗显示系统发展的关键所在。

RGB三角排布的单个亚像素被周围6个像素共用,在相同的显示分辨率下,其像素数量约为实像素显示的1/6。这不仅大幅降低了屏幕的制造复杂度,而且有效减少了材料与工艺成本,从而在整体上实现了约6倍的成本优化。因此,RGB三角排布在量产可行性与经济性方面也展现出显著优势,为高分辨率显示技术的普及提供了全新的解决方案。然而,这种高效的排布也对亚像素渲染算法提出了更高的要求。传统的不加权平均亚像素渲染算法在处理RGB三角排布时存在明显不足,在面对高频信号如文字边缘、黑底白线这样的场景时,显示会出现亮度不够或者类似于白线变成彩线的颜色失真问题,严重影响了显示效果和观看体验。

本文针对RGB三角排布提出了一种基于色差的自适应权重亚像素渲染算法。该算法由图像预处理模块、颜色空间转换模块、自适应权重计算模块和亚像素渲染模块4部分构成。首先,图像预处理模块对输入图像进行边界扩展。接着,颜色空间转化模块将每个像素进行通道分离和扩展,并从sRGB颜色空间转换到CIELab颜色空间。然后,自适应权重计算模块通过计算像素色差的极差进行场景匹配,并为输出亚像素赋值^[12]。若未能匹配到相应场景,则选取中心像素并依据相邻像素色差计算权重。最后,亚像素渲染模块根据权重渲染输出亚像素。实验结果表明,相较于传统的不加权平均亚像素渲染算法,本文提出的算法在保证图像不失真和有效控制颜色失真的情况下,较好地还原了图像信息,有效提升了显示质量和观看体验。

2 基本原理

2.1 RGB三角排布

在LED显示中,一个像素通常由3个亚像素组成,每个亚像素显示预定的颜色(通常为红色、

绿色和蓝色),亚像素的几何结构使人眼能够将空间复用的颜色混合在一起,从而达到显示色彩的效果^[13]。图1为RGB三角排布结构图,其水平、垂直方向的亚像素间距相等,同一行中的亚像素为同基色,同一列中的亚像素为3种基色循环排列。图1中每一个三角结构作为一个虚拟像素,未处于边缘的亚像素与周围6个亚像素组成6个虚拟像素,通过单个亚像素被周围6个虚拟像素复用达到提高感知分辨率的目的^[14]。

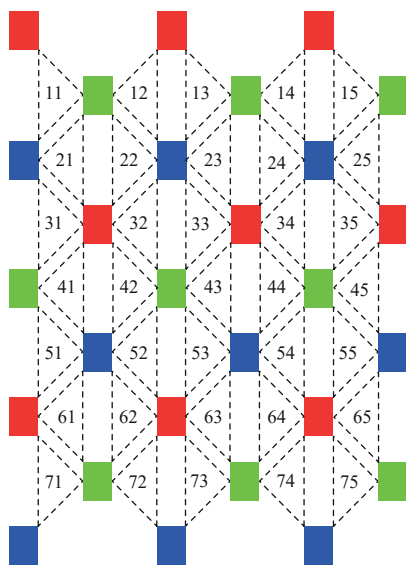


图1 RGB三角排布结构图

Fig. 1 Diagram of RGB triangle arrangement structure

2.2 人眼的视觉特性

人眼的视觉感知过程涉及对光的亮度和色彩信息的接收与处理。通过将环境中物体的亮度与色彩信息传递至大脑,人眼得以形成对周围世界的完整视觉印象,这一复杂的感知与处理机制构成了人眼的视觉系统^[15]。近年来,基于人眼视觉系统理论的研究成果已被广泛应用于图形图像处理、显示效果优化以及渲染算法设计等多个领域。

人眼能够分辨两个相邻亮点的最小间距被称为空间分辨率,即在该距离下仍能将两个靠近的点识别为两个独立的个体。然而,由于空间分辨率依赖于观察者与目标之间的观看距离,而实际观察过程中这一距离往往是动态变化的,因此通常采用分辨角(Angular Resolution)来衡量人眼的分辨能力,而非直接使用空间分辨率。

人眼的分辨角定义为:两个刚好可被分辨为独立亮点的点光源与眼睛所形成的视角张角。若将人眼近似视为一枚理想透镜,依据衍射理论,其理论极限分辨角可通过公式(1)进行计算^[16]:

$$\varphi = \frac{1.22\lambda}{D}, \quad (1)$$

其中: D 表示入射光瞳的直径, λ 代表入射光的波长,分辨角以角秒(Arcsecond)为单位。人眼对光的感光范围大致在 380~780 nm 之间。在光照较强的环境下,瞳孔直径约为 2 mm,代入公式(1)计算后,得到人眼的极限分辨角范围约为 61"~126"。大量实验数据统计结果显示^[17],人眼的实际分辨能力通常在 50"~120"之间。在照明条件良好的情况下,普遍采用的标准分辨角为 60" (即 1 角分),也即人眼在每度视角范围内可分辨约为 60 对均匀分布的亮暗线条。这一数值也被称作分辨阈值(Visual Acuity Threshold)。对于显示设备而言,当观看者与屏幕之间的距离使得相邻两个像素所形成的角度小于分辨阈值时,人眼便无法察觉像素之间的差异,此时显示画面不会呈现出颗粒感。因此,可以根据这一分辨阈值来计算显示器的最佳观看距离,即在该距离下观看画面时不会出现像素化现象的最小观看距离。

3 算法介绍

本文提出了一种基于色差的自适应权重亚像素渲染算法。该算法整体框架如图 2 所示,由图像预处理模块、颜色空间转换模块、自适应权重计算模块和亚像素渲染模块 4 部分构成。首先,图像预处理模块对输入图像进行边界扩展,从而确保在后续亚像素渲染过程中不会发生越界问题。接着,颜色空间转化模块对读取到的像素进行通道分离和扩展,并从 sRGB 颜色空间转换到 CIE Lab 颜色空间^[18]。然后,自适应权重计算模块通过计算像素色差的极差进行场景匹配,并据此为输出亚像素赋值。若未匹配到对应场景,则选取中心像素并依据相邻像素色差计算权重^[19]。最终,亚像素渲染模块根据权重计算输出亚像素的灰度值以完成输出图像的渲染。通过在水平方向上对单个亚像素进行两倍复用、竖直方向上进行 3 倍复用,输入分辨率为 $M \times N$ 的图像后,输出图像的实际物理像素分辨率约为原始分辨率的 1/6。在亚像素复用技术的支持下,借助虚拟显示系统,输出图像仍能够实现与原始分辨率 $M \times N$ 相当的视觉清晰度,从而在不增加硬件物理分辨率的前提下提升用户的感知分辨率体验。

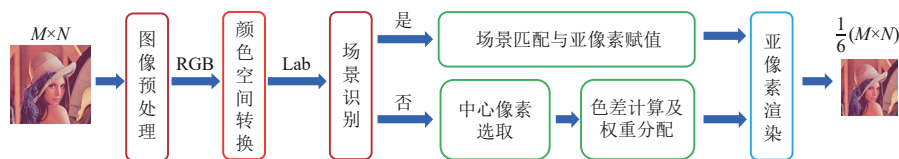


图 2 本文算法整体框架

Fig. 2 Overall framework of the algorithm in this paper

3.1 图像预处理

对于 RGB 三角排布,处于图像边缘的亚像素并没有被 6 个像素所复用;同样,在渲染这些处于边缘的亚像素时,也没有足够多的像素数据供使用。因此,为了便于接下来的数据处理,使算法变得简洁并提高运算速度,要对图像进行扩展。具体来说,在图像处理模块从上位机接收到一张分辨率为 $M \times N$ 的图片时,需要将其扩展为 $(M+4) \times (N+1)$,如图 3 所示。将原图像最后一列像素向右再复制一列,然后再将第一行、最

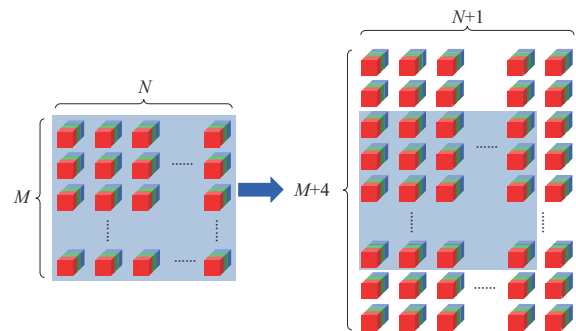


图 3 图像扩展示意图

Fig. 3 Schematic diagram of image extension

后一行像素分别向上、向下各复制两行,以避免后续算法在处理时出现边界问题,确保在渲染处于屏幕边缘的单个亚像素时访问周围像素不会出现越界问题。

3.2 颜色空间转换

在进行与人眼视觉感知密切相关的图像处理任务时,通常需要将颜色信息从设备相关的sRGB颜色空间转换到与人类视觉感知一致的CIE Lab颜色空间。CIE Lab是一个与设备无关、感知均匀的颜色空间。CIE Lab中 L 通道表示亮度; a 和 b 通道分别代表红绿和黄蓝的颜色对立维度,能够更准确地反映人眼对颜色差异的感知^[20]。相比于sRGB,CIE Lab不仅具有更广的色域,而且其颜色分布特性使颜色之间的欧氏距离在数学上更接近人眼所感知的色彩差异。在此空间中,常用 ΔE 来量化两个颜色之间的视觉差异,其计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (2)$$

研究表明, ΔE 数值大小与人眼感知的差异具有一致性,例如 $\Delta E < 1$ 时几乎无法察觉差异,而 $\Delta E > 2.3$ 则明显可辨。因此,在涉及色彩匹配、图像增强、视觉质量评估等需考虑人眼感知特性的高精度图像处理中,使用CIE Lab空间并结合 ΔE 分析,不仅可以消除设备特性带来的影响,还能实现更自然、更符合视觉特性的色彩管理与优化,从而提升整体处理结果的视觉一致性与准确性^[21]。

在颜色空间转换之前,需要先对像素各个通道进行处理。首先,在渲染任一亚像素时,要读取周围10个像素对应通道的灰度值^[22]。具体来说,在渲染红色亚像素时,需读取其参与构成的6个像素所对应的原图像素中红色通道的灰度值,并在此基础上继续向上和向下各读取1行,每行额外读取2个红色亚像素灰度值,共读取4个红色通道的灰度值,共计10个红色亚像素灰度值,其布局为5行2列结构,按照从左到右、从上至下的顺序进行读取,并依次记 $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}$ 。红、绿、蓝亚像素的渲染方式相同,在渲染绿色和蓝色子像素时,需要读取的亚像素灰度值分别为 $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7, G_8, G_9, G_{10}$ 和 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}$ 。

B_8, B_9, B_{10} 。

图4所示为单通道红色亚像素扩展示意图。在从sRGB颜色空间转换到CIE Lab空间之前,需要先对10个亚像素灰度值进行扩展,即将其蓝色和绿色通道的灰度值设置为0,记为 $(R_1, 0, 0), (R_2, 0, 0), (R_3, 0, 0), (R_4, 0, 0), (R_5, 0, 0), (R_6, 0, 0), (R_7, 0, 0), (R_8, 0, 0), (R_9, 0, 0), (R_{10}, 0, 0)$ 。同理,绿色亚像素扩展后分别为 $(0, G_1, 0), (0, G_2, 0), (0, G_3, 0), (0, G_4, 0), (0, G_5, 0), (0, G_6, 0), (0, G_7, 0), (0, G_8, 0), (0, G_9, 0), (0, G_{10}, 0)$;蓝色亚像素扩展为 $(0, 0, B_1), (0, 0, B_2), (0, 0, B_3), (0, 0, B_4), (0, 0, B_5), (0, 0, B_6), (0, 0, B_7), (0, 0, B_8), (0, 0, B_9), (0, 0, B_{10})$ 。

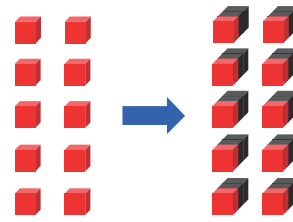


图4 红色亚像素扩展示意图

Fig. 4 Schematic diagram of red subpixel expansion

由于红色亚像素与绿色和蓝色亚像素渲染方式相同,因此为了算法叙述的简洁性和准确性,接下来的内容只以渲染红色亚像素为例。在单通道红色亚像素扩展完成后,为了确保色彩再现的准确性与视觉舒适性,根据显示屏的特性,选择D65作为参考白点(即默认色温为6 500 K)^[21],将扩展完成的像素从sRGB空间转换到CIE Lab空间。首先,将0~255范围的RGB值归一化到0~1之间,然后对每个通道分别进行逆伽马变换以获得线性RGB值^[20]:

$$C_{\text{linear}} = \begin{cases} \frac{C}{12.92} & C \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} & C > 0.04045 \end{cases}, \quad (3)$$

其中, $C_{\text{linear}} = R_{\text{linear}}, G_{\text{linear}}, B_{\text{linear}}$ 。

然后,使用sRGB标准的转换矩阵将线性化的RGB值转换为XYZ色彩空间。对于每个通道的线性值 $R_{\text{linear}}, G_{\text{linear}}, B_{\text{linear}}$,使用以下矩阵计算:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_{\text{linear}} \\ G_{\text{linear}} \\ B_{\text{linear}} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

最后,选择 D65 为参考白点,将式(4)得到的 X、Y、Z 值转换到 CIELab 颜色空间,转换公式如式(5)所示:

$$\begin{cases} L = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a = 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b = 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{cases}, \quad (5)$$

对于函数 $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}}, & x > 0.008856 \\ 7.787x + \frac{4}{29}, & x \leq 0.008856 \end{cases}, \quad (6)$$

其中,对于 D65 的参考白点^[21], $X_n = 95.047$ 、 $Y_n = 100.000$ 、 $Z_n = 108.883$ 。

3.3 场景识别与匹配

在颜色空间转换后,原本以 RGB 色彩分量表示的单个像素信息被映射至 CIELab 颜色空间,从而获得对应的 Lab 色彩分量。因此,在单个红色亚像素渲染过程中,得到了共 10 个像素的 CIELab 色彩值。为了区分不同显示场景下的颜色表现差异,首先需计算这 10 个像素色差的最大极差。为此,选取色彩点 $(0, -128, -128)$ 作为参考零点,并依据公式(2),分别计算每个像素色彩分量相对于该零点的色差值,即二者在 CIELab 空间中的欧氏距离。

得到 10 个色差之后,计算色差最大值与最小值所对应像素的色差极差,如果大于 100,则进行场景匹配。首先根据公式(7)对预先读取的亚像素灰度值进行截断处理^[23]:

$$R_{\text{sat}} = \begin{cases} 0 & R \leq T_L \\ 255 & R \geq T_H \\ R & \text{others} \end{cases}, \quad (7)$$

其中: R_{sat} 表示截断操作后的红色亚像素灰度值; R 表示输入红色亚像素灰度值; T_L 和 T_H 分别表示阈值下限和阈值上限,在这里取 8 和 247。截断操作后进行相应场景匹配,如果匹配成功,则对输出红色亚像素进行对照赋值,具体场景如表 1 所示。

表 1 场景匹配对照表

Tab. 1 Scene matching reference table

像素 编号	场景类型(灰度分布)					
	场景一	场景二	场景三	场景四	场景五	场景六
1	0	0	0	255	255	255
2	0	0	0	255	255	255
3	255	0	0	0	255	255
4	255	0	0	0	255	255
5	0	255	0	255	0	255
6	0	255	0	255	0	255
7	0	0	255	255	255	0
8	0	0	255	255	255	0
9	0	0	0	255	255	255
10	0	0	0	255	255	255
输出 亚像素	255	255	255	0	0	0

3.4 权重计算与亚像素渲染

如果未能匹配到对应场景,则进入自适应权重分配和亚像素渲染环节。对于 RGB 三角排布,单个亚像素被周围 6 个像素所复用,而从图 1 可以看出,由于距离差异,单个亚像素对左右两个像素比对上下 4 个像素贡献要多,因此根据左右两个像素色差值选取中心像素。此时,在渲染单个红色亚像素时,只需要其参与构成的 6 个像素所对应的原图像素中红色通道的灰度值,即 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 。其在 CIELab 颜色空间的色彩分量分别为 (L_3, a_3, b_3) 、 (L_4, a_4, b_4) 、 (L_5, a_5, b_5) 、 (L_6, a_6, b_6) 、 (L_7, a_7, b_7) 、 (L_8, a_8, b_8) 。Mahy 等人的实验结果显示^[24],在 CIELab 空间中,当两种颜色的色差 $\Delta E < 2.3$ 时,视觉感知上几乎不可区分,这一阈值被用于判断颜色是否具有视觉一致性。根据公式(2)计算 R_5 和 R_6 在 CIELab 颜色空间的色差,当色差 $\Delta E \leq 2.3$ 时,选择二者的平均值作为中心像素,其色彩分量分别为:

$$\begin{cases} L_r = \frac{L_5 + L_6}{2} \\ a_r = \frac{a_5 + a_6}{2} \\ b_r = \frac{b_5 + b_6}{2} \end{cases}. \quad (8)$$

当 $\Delta E > 2.3$ 时,分别计算 R_5 、 R_6 与周围 4 个

像素的总色差。若色差相等,使用式(8)计算中心像素的色彩分量。否则,若 R_5 相对于周围4个像素的色差小于 R_6 ,则选择 R_5 作为中心像素,反之选择 R_6 作为中心像素。

中心像素选取之后,采用公式(2)分别计算 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 在CIELab颜色空间的色彩分量相对于中心像素(L, a, b)的色差。根据公式(9)所划分的色差区间,由计算得到的色差以确定每个像素所处的区间^[25]:

$$k = \begin{cases} 4 & \Delta E < 1 \\ 3 & 1 \leq \Delta E < 2.3 \\ 2 & 2.3 \leq \Delta E < 4 \\ 1 & 4 \leq \Delta E < 6 \\ 0 & 6 \leq \Delta E \end{cases}, \quad (9)$$

然后根据公式(10)确定每个像素的权重:

$$w_i = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \times \frac{n-k}{n}, \quad (10)$$

其中: w_i 表示第 i 个红色亚像素的权重($i=3, 4, 5, 6, 7, 8$); $w_{\min}$ 、 $w_{\max}$ 表示最小和最大权重,对于本算法, $w_{\min}=1/6$, $w_{\max}=1$; n 表示色差区间的数量; k 表示每个像素的区间索引,由式(9)决定。

为了保证所有权重的总和为1,对计算出的权重进行归一化处理,将归一化后得到的权重记为 w'_i :

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=3}^8 w_i}. \quad (11)$$

最后,基于上述计算出的权重,结合所有6个像素对应通道的灰度值,采用加权平均的方法计算最终的输出亚像素的灰度值。具体而言,使用相应的权重进行加权求和,得出最终的灰度值为:

$$R' = \sum_{i=3}^8 w'_i \times R_i. \quad (12)$$

同样,对于蓝色和绿色亚像素采用相同的渲染方式,最终得到实像素分辨率只有原图1/6的图片,而在亚像素复用下能达到与原图相同的感知分辨率。

4 实验结果

4.1 实验平台

本文所提出的算法在Matlab R2019a环境下

运行,实验平台基于Windows 11操作系统,硬件配置为Intel Core i7-10700F处理器,基础频率为2.90 GHz,并搭载NVIDIA GeForce GTX 1050显卡。实验所用LED显示屏为32 in (1 in=2.54 cm,屏幕尺寸为720 mm×405 mm),虚拟显示模式下最大分辨率可达1 920×1 080,其屏幕亮度为1 200 cd/m²,亚像素间距为0.375 mm。

4.2 实验数据集

本文采用公开的数据DIV2K作为日常场景的数据集。DIV2K数据集涵盖了各种场景,包括室内场景、建筑物、动物、自然风光等,能够有效覆盖显示器日常使用中的大多数应用场景。同时,该数据集凸显了亚像素图像中容易出现颜色错误的高频部分,是评估亚像素图像质量的优质工具。本文从中选取了具有代表性的图片48张,分辨率分别为1 020×678、1 540×864、2 040×1 356,每种分辨率图片各16张,如图5(a)中所示。为了讨论算法对噪声干扰的适应性,从图5(a)中随机选取了16张图片并随机添加了噪声密度为5%的轻微椒盐噪声,如图5(b)中所示。

4.3 评价指标

本文采用客观评价与主观评价相结合的方式对图像质量进行综合评估。传统的客观评价指标,如均方误差(Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)以及结构相似度(Structural Similarity Index, SSIM),在图像质量评估领域具有广泛的应用基础^[26],其计算公式如式(13)、(14)和(15)所示^[27]。然而,在面对亚像素图像时,由于其屏幕上实际显示的像素数量仅为原始图像的1/6,直接使用这些指标进行比较存在一定的局限性^[28]。为了更准确地衡量亚像素图像与原图之间的相似程度,从而更客观地反映亚像素渲染算法的实际性能,需要先对图像进行上采样处理。具体而言,单个亚像素在水平方向上2倍复用,而在垂直方向上3倍复用。这意味着,每个亚像素在水平方向上参与构成2个虚拟像素,在垂直方向上则参与构成3个虚拟像素。因此,最终在水平和垂直方向分别实现2倍与3倍的上采样,使其分辨率与原始图像一致。

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I_i(i, j) - I_0(i, j)]^2, \quad (13)$$

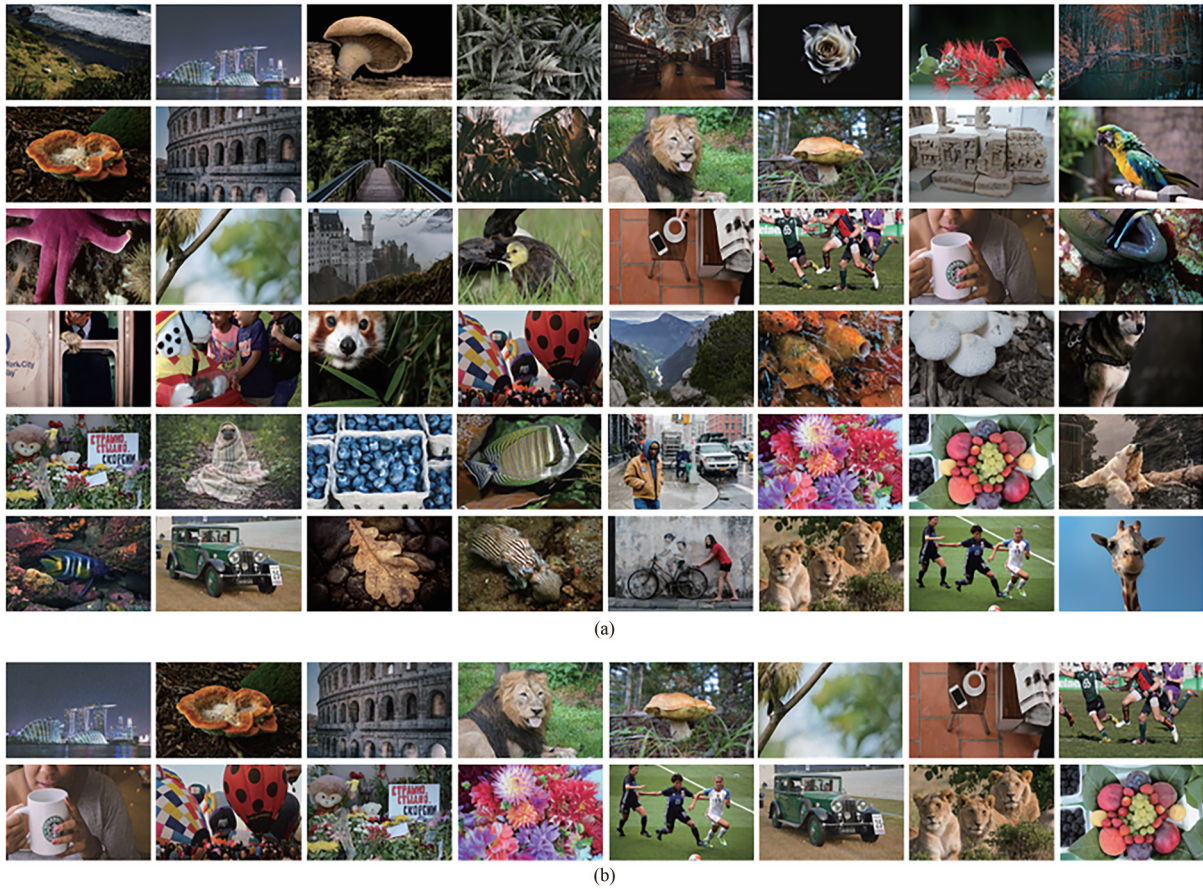


图5 DIV2K数据集。(a) 原始数据集的48张图片;(b) 加高斯噪声的16张图片。

Fig. 5 DIV2K dataset. (a) 48 images from the original dataset; (b) 16 images plus Gaussian noise.

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\sum_{i,j,c} (I_1(i,j,c) - I_0(i,j,c))^2}, \quad (14)$$

$$\text{SSIM} = \text{SSIM}(I_1, I_0), \quad (15)$$

其中: I_1 表示插值的亚像素图像, I_0 表示原图像, i, j 表示图像的位置索引, c 表示图像的通道索引, m 和 n 代表图像像素的行数和列数。尽管 MSE、PSNR 和 SSIM 作为客观评价指标不能精确反映人眼的视觉感知, 但作为评估对原图像客观还原程度的指标仍然是衡量亚像素渲染算法性能的重要工具^[29]。

为进一步提升图像质量评估的准确性, 本文在均方误差、峰值信噪比和结构相似度的基础上, 进一步引入了 FSIM_c 和 VIF 两个更具视觉感知能力的评估指标。其中, FSIM_c (Feature Similarity Index for Color Images) 是一种专门针对彩色图像设计的质量评估方法, 它不仅考虑了图像的亮度和结构信息, 还融合了颜色通道间的相关性, 能够更全面地反映人眼对图像细节、边缘和

色彩变化的感知特性, 如公式 (16)、(17) 所示^[30]。另一方面, VIF (Visual Information Fidelity) 则基于信息论原理, 通过衡量参考图像与重构图像之间共享的视觉信息量来评估图像质量, 如公式 (18) 所示。该指标从人类视觉系统感知图像信息的角度出发, 强调图像内容在感知层面的信息保真度, 而非单纯的像素误差。VIF 对低对比度区域、边缘细节以及图像整体信息完整性的变化尤为敏感, 能够更准确地反映出亚像素渲染算法在图像重建中可能引起的视觉信息衰减问题^[31]。

因此, 结合 MSE、PSNR、SSIM、FSIM_c 与 VIF 的评估结果, 不仅可以从图像结构特征匹配与视觉信息保真的双重维度提升评估体系的全面性, 同时也能增强评价结果与人眼实际感知之间的一致性, 使图像质量评估更加贴近视觉感知特性。

$$\text{FSIM}_c = \frac{1}{3} (\text{FSIM}_R + \text{FSIM}_G + \text{FSIM}_B), \quad (16)$$

$$\text{FSIM} = \frac{\sum_x S_L(x) \cdot \text{PC}_m(x)}{\sum_x \text{PC}_m(x)}, \quad (17)$$

$$\text{VIF} = \frac{I(Y; C)}{I(X; C)}, \quad (18)$$

其中: $S_L(x)$ 表示局部相似度, $\text{PC}_m(x)$ 表示相位一致性。

4.4 实验结果

本文从主观和客观两方面对所提出的算法和基准算法(不加权平均渲染算法)的图像质量进行比较。为了更加全面地展示本文提出的算法相较于不加权平均算法在渲染效果上的优势,选取 DIV2K 数据集中 48 张测试图像,并分别采用这两种算法进行渲染。首先,针对字体和单线宽这样的典型场景下的亚像素图像进行了视觉比较,直观展示两种算法的表现差异。其次,利用 MSE、PSNR、SSIM、FSIM_c 和 VIF 这 5 项指标对选定的图像的质量进行了量化分析,以此进一步评估两种算法的表现。这种比较不仅为算法的有效性提供了实证支持,同时也为进一步优化算法提供了参考依据。

如图 6 所示,在渲染水平方向上单像素宽度的黑底白线时,不加权平均算法由于未考虑相邻像素间的灰度差异,仅简单地对相应通道的灰度值进行不加权平均处理,导致了显著的亮度不足问题,使得原本清晰的黑底白线呈现为不够鲜明的黑底灰线。相比之下,本文提出的自适应权重



图 6 单线宽黑底白线渲染。(a) 原图;(b) 不加权平均算法渲染效果;(c) 自适应权重算法渲染效果。

Fig. 6 Single-linewidth black background white line rendering. (a) Original drawing; (b) Rendering effect of the unadvised averaging algorithm; (c) Rendering effect of the adaptive weighting algorithm.

亚像素渲染算法有效解决了这一问题,通过对这种特殊场景的识别及处理,有效保持了线条原有的对比度和清晰度。

此外,如图 7 所示,在渲染字体这类包含高频成分的图像时,不加权平均算法在渲染字体边缘的亚像素时会导致灰度值不够,造成明显的颜色失真问题。而自适应权重渲染算法通过精确考量像素间的色差来调整渲染策略,在渲染边缘亚像素时能够有效抑制颜色失真,实现了更高的还原度和更加鲜明的视觉效果,在细节呈现方面展现出更优越的性能。

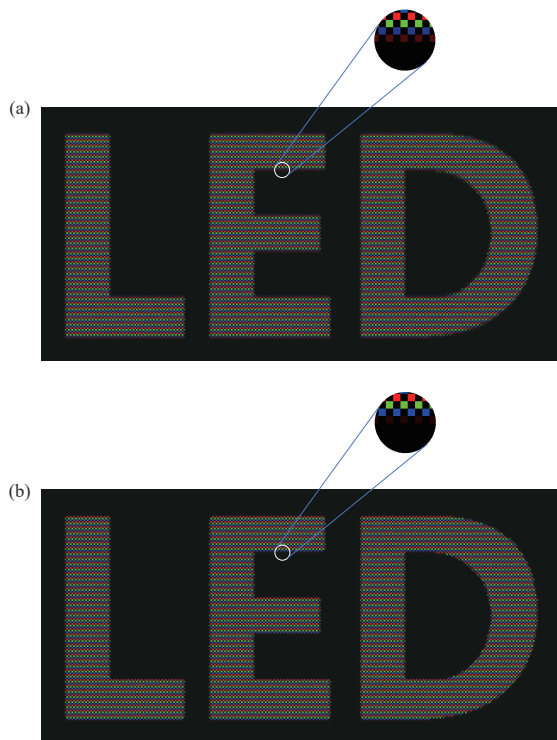


图 7 英文字母渲染。(a) 不加权平均算法渲染效果;(b) 自适应权重算法渲染效果。

Fig. 7 Rendering of the English letters. (a) Rendering effect of the unadvised average algorithm; (b) Rendering effect of the adaptive weight algorithm.

使用从 DIV2K 数据集中选择的 48 张测试图片,如图 5(a)所示,对不加权平均渲染算法和自适应权重渲染算法的渲染结果进行对比。表 2 展示了两种算法在 5 个指标下的平均值。在 MSE 指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法低约 14.537 6;在 PSNR 指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法平均高约

0.828 21 dB;在 SSIM 指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法平均高约 0.014 96,表明后者在渲染图像上与原图的差异更小;在 FSIM_c和 VIF 两个测试指标上,自适应权重渲染算法相较于不加权平均渲染算法分别提高了 0.000 83 和 0.009 66,表明所提方法在图像特征相似性与视觉信息保真度方面均有所改善,进一步验证了其在模拟人眼视觉感知特性方面的有效性。

表 2 两种渲染算法的图像质量指标对比

Tab. 2 Comparison of image quality metrics of two rendering algorithms

指标	不加权平均渲染算法	自适应权重渲染算法
MSE	87.963 61	73.426 01
PSNR/dB	28.900 78	29.728 99
SSIM	0.915 26	0.930 22
FSIM _c	0.994 13	0.994 96
VIF	0.522 36	0.532 02

为了更直观地比较不加权平均渲染算法与自适应权重渲染算法在不同图像上的表现,我们将计算得到的每张图片的 MSE、PSNR、SSIM、FSIM_c和 VIF 的值绘制成图,如图 8、9、10、11、12 所示。这些图提供了详细的对比,有助于深入理解两种算法在处理不同类型图像时的性能差异。通过对全部 48 组图像数据的对比分析发现,自适应权重渲染算法在多数情况下优于不加权平均算法,尤其在处理包含丰富边缘与纹理信息的复杂场景图像时,优势更为显著。整体趋势表明,该算法显著降低了图像的 MSE 值,并提升了 PSNR 和 SSIM 指标,印证了其在图像保真度和结构保持方

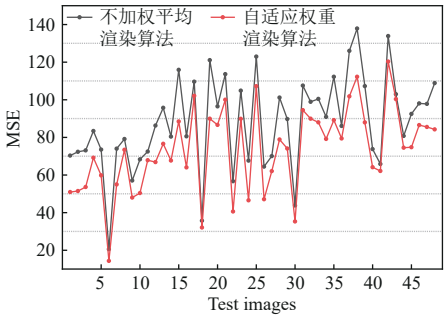


图 8 两种算法的 MSE 对比

Fig. 8 Comparison of MSE between the two algorithms

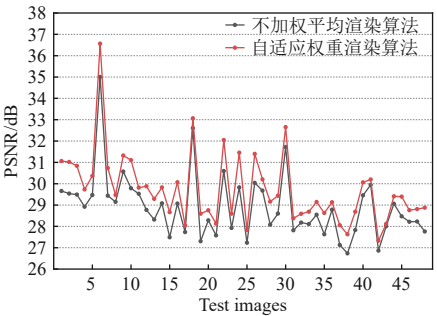


图 9 两种算法的 PSNR 对比

Fig. 9 Comparison of PSNR between the two algorithms

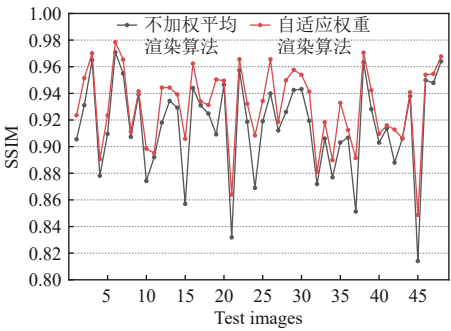


图 10 两种算法的 SSIM 对比

Fig. 10 Comparison of SSIM between the two algorithms

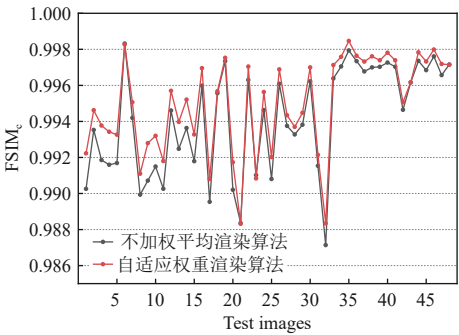


图 11 两种算法的 FSIM_c对比

Fig. 11 Comparison of FSIM_c between the two algorithms

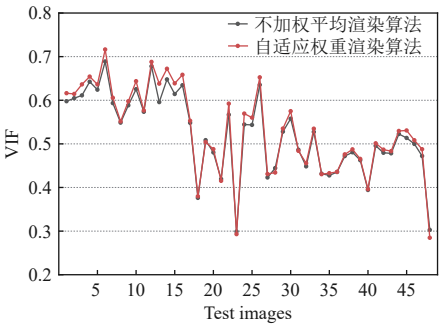


图 12 两种算法的 VIF 对比

Fig. 12 Comparison of VIF between the two algorithms

面的优越性能。例如,部分图像的MSE降幅超过20个单位,PSNR提升可达1.5 dB以上;且在SSIM、FSIM_c和VIF等更符合人眼视觉感知的指标上,也呈现出一致性提升,表明该算法能更有效地保留图像细节与色彩特征,改善视觉质量。在少数内容平滑、边缘稀少的图像样本中,两种算法表现相近,各项指标差异较小,说明自适应权重渲染算法在低频区域的优化空间相对有限。总体而言,自适应权重渲染算法在大多数图像中展现出更高的重构精度和更优的视觉效果,在高频信息丰富图像中的优势尤为突出。

为了进一步讨论自适应权重亚像素渲染算法对噪声干扰的适应性,本文从选定的测试集中随机选择了16张图片并添加椒盐噪声,如图5(b)所示。采用不加权平均算法和自适应权重算法处理添加椒盐噪声的图像,继而计算各结果与原始无噪图像的指标值并进行对比。表3展示了两种算法在5个指标下的平均值。在MSE指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法低约137.733 65;在PSNR指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法平均高约3.150 38 dB;在SSIM指标上,自适应权重渲染算法比不加权平均渲染算法平均高约0.150 68;在FSIM_c和VIF两个测试指标上,自适应权重渲染算法相较于不加权平均渲染算法分别提高了0.033 66和0.024 24。

表3 两种渲染算法的图像去噪质量指标对比

Tab. 3 Comparison of image denoising quality metrics of two rendering algorithms

指标	不加权平均渲染算法	自适应权重渲染算法
MSE	270.382 09	132.648 44
PSNR/dB	23.844 19	26.994 57
SSIM	0.705 36	0.856 04
FSIM _c	0.935 41	0.969 07
VIF	0.458 60	0.482 84

为了更直观地比较不加权平均渲染算法与自适应权重渲染算法对噪声干扰的适应性,从处理后的16张噪声图片中选择3张图片进行对比,如图13所示。

在处理被椒盐噪声污染的图像时,实验结果充分表明,自适应权重亚像素渲染算法相较于传

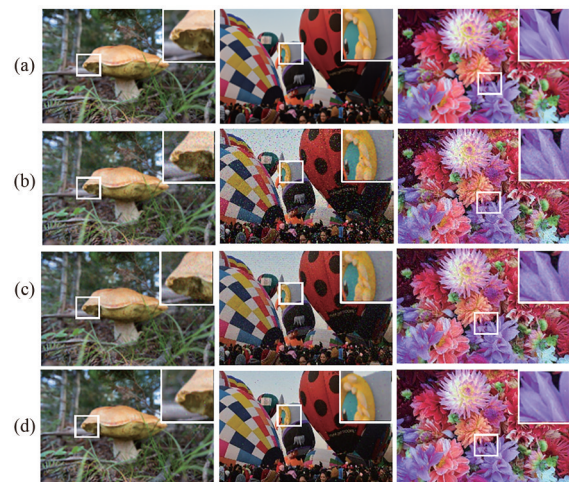


图13 两种算法的去噪效果对比。(a) 原图;(b) 添加椒盐噪声的图片;(c) 不加权平均渲染算法的去噪效果;(d) 自适应权重渲染算法的去噪效果。

Fig. 13 Comparison of the denoising effects of the two algorithms. (a) Original images; (b) Images of salt and pepper noise; (c) Denoising effect of the unweighted average rendering algorithm; (d) Denoising effect of the adaptive weight rendering algorithm.

统的不加权平均算法具有更优越的去噪性能和图像恢复能力。由于椒盐噪声具有随机性和极端灰度值特征,这些异常值会严重破坏局部结构信息。传统不加权平均方法在处理这类噪声时往往将噪声点与真实像素同等对待,导致在平滑过程中引入伪影或模糊细节,从而降低图像质量。而自适应权重算法能够根据局部区域的像素统计特性动态调整各像素的贡献权重。在存在椒盐噪声的区域,通过识别潜在的异常值并赋予其较低权重,有效降低噪声点对最终结果的影响;而在结构清晰、纹理丰富的区域则保留较大的权重以保持图像细节,从而实现去噪与保真的良好平衡。从图像质量评估指标来看,该算法在MSE、PSNR、SSIM、FSIM_c以及VIF指标上均显著优于不加权平均渲染算法,处理后的图像在误差更小的同时,也更接近原始无噪图像,在视觉感知层面表现出更强的真实感和保真度。

5 结 论

本文基于Micro-LED的RGB三角排布,针对传统的不加权平均亚像素渲染算法存在的颜

色失真问题,提出了一种基于色差的自适应权重亚像素渲染算法。首先,图像预处理模块对输入图像进行边界扩展操作。随后,颜色空间转换模块对读取到的像素数据进行通道分离与扩展,并将颜色信息从sRGB颜色空间转换至CIE Lab颜色空间,以便更准确地进行色彩分析与处理。接下来,自适应权重计算模块通过计算相邻像素间色差的极差来实现对当前显示场景的匹配判断,并据此为输出亚像素分配相应的权重值。若未

匹配到对应场景,则选取中心像素,并基于其邻近像素的色差动态计算权重。最后,亚像素渲染模块根据所获得的权重系数计算输出亚像素的灰度值,从而完成对输出图像的高质量渲染。与基准方法相比,本文所提算法的均方误差降低了14.537 6,峰值信噪比提高了0.828 211 dB,结构相似度提高了0.014 96,特征相似性指数提高了0.000 83,视觉信息保真度提高了0.009 66,有效提高了显示质量。

参 考 文 献:

- [1] 李继军,聂晓梦,李根生,等. 平板显示技术比较及研究进展[J]. 中国光学,2018,11(5):695-710.
LI J J, NIE X M, LI G S, *et al.* Comparison and research progress of flat panel display technology [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 695-710. (in Chinese)
- [2] Display Technology: New findings from Chung Ang university describe advances in display technology (Rating analysis and comparisons of resonant circuit based sustain drivers for PDPs) [N]. *Technology News Focus*, 2015.
- [3] 季洪雷,张萍萍,陈乃军,等. Micro-LED显示的发展现状与技术挑战[J]. 液晶与显示,2021,36(8):1101-1112.
JI H L, ZHANG P P, CHEN N J, *et al.* Micro-LED display: recent progress and future challenges [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1101-1112. (in Chinese)
- [4] ZHAO X M, ZHOU X Y, YUAN S C. Comparison and research of LED screen's image quality optimizing technology [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 480-481: 1373-1377.
- [5] 黄硕. Mini/Micro LED像素级采集及显示效果提升技术研究[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2024.
HUANG S. Research on pixel-level acquisition and display effect improvement technology for Mini/Micro LED [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences), 2024. (in Chinese)
- [6] 王伟,赵甜甜,刘强,等. Mini/Micro LED巨量转移技术研究与发展现状[J]. 光学精密工程,2023,31(2): 183-199.
WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.* Research and development status of Mini/Micro LED mass transfer technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)
- [7] 丁铁夫,郑喜凤,王瑞光,等. 一种像素复用提高显示屏图像解析度的方法:中国,CN1892745[P]. 2007-01-10.
DING T F, ZHENG X F, WANG R G, *et al.* Method of pixel multiplexing to increase display screen image analytic degree: CN, CN1892745 [P]. 2007-01-10. (in Chinese)
- [8] 郑喜凤,王瑞光,汪洋,等. 一种显示面板虚拟像素复用控制方法:中国,CN114822376A[P]. 2022-07-29.
ZHENG X F, WANG R G, WANG Y, *et al.* Display panel virtual pixel multiplexing control method: CN, CN114822376A [P]. 2022-07-29. (in Chinese)
- [9] 李漫铁,陈勇林,余亮,等. 像素排列结构、虚拟像素排列结构、显示面板和控制方法:中国,CN118335768A[P]. 2024-07-12.
LI M T, CHEN Y L, YU L, *et al.* Pixel arrangement structure, virtual pixel arrangement structure, display panel and control method: CN, CN118335768A [P]. 2024-07-12. (in Chinese)
- [10] 叶国辉,殷淑仪. 像素排列结构及基于该像素排列结构的虚拟像素结构:中国,CN115084186A[P]. 2022-09-20.
YE G H, YIN S Y. Pixel arrangement structure and virtual pixel structure based on same: CN, CN115084186A [P]. 2022-09-20. (in Chinese)
- [11] 赵小明,赵国美,刘延,等. 基于二维亚像素采样的超分辨率显示方法及装置:中国,CN103338378A[P]. 2013-

- 10-02.
- ZHAO X M, ZHAO Y M, LIU Y, *et al.* Two-dimensional sub-pixel sampling-based super-resolution display method and device: CN, CN103338378A [P]. 2013-10-02. (in Chinese)
- [12] KANG S J. Adaptive weight allocation-based subpixel rendering algorithm [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2014, 24(2): 224-229.
- [13] CHEN Y J, WANG X R, ZHANG J L, *et al.* Resolution improvement of integral imaging based on time multiplexing sub-pixel coding method on common display panel. [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17897-17907.
- [14] 许峰,张俊生. LED信息屏组合虚拟像素技术及其算法研究[J]. 中国图象图形学报,2009,14(9):1915-1918.
- XU F, ZHANG J S. The combined-virtual pixels technology for LED display and study of algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(9): 1915-1918. (in Chinese)
- [15] NADENAU M J. Integration of human color vision models into high quality image compression [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [16] CAMPBELL F W, GREEN D G. Optical and retinal factors affecting visual resolution [J]. *The Journal of Physiology*, 1965, 181(3): 576-593.
- [17] DEERING M F. The limits of human vision [C]//*Proceedings of the 2nd International Immersive Projection Technology Workshop*. Ames: the Electronic Visualization Laboratory (EVL), 1998.
- [18] KANG S J. Color difference-based subpixel rendering for matrix displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(8): 632-637.
- [19] SHARMA G, TRUSSELL H J. Digital color imaging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 901-932.
- [20] BLANKENBACH K, YAN Q, O'BRIEN R J. *Handbook of Visual Display Technology* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, doi: 10.1007/978-3-642-35947-7.
- [21] HILL B, ROGER T, VORHAGEN F W. Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1997, 16(2): 109-154.
- [22] CHAE S H, YOO C H, SUN J Y, *et al.* Subpixel rendering for the pentile display based on the human visual system [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2017, 63(4): 401-409.
- [23] 马奔,杨文华,尹勇生,等. RGB-Delta结构 AMOLED子像素渲染算法的研究[J]. 激光与光电子学进展,2020, 57(10):101106.
- MA B, YANG W H, YIN Y S, *et al.* Research on RGB-delta structure AMOLED sub-pixel rendering algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101106. (in Chinese)
- [24] MAHY M, VAN EYCKEN L, OOSTERLINCK A. Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV [J]. *Color Research & Application*, 1994, 19(2): 105-121.
- [25] 黄成强,杨友昌,贺娟,等. 基于权重因子的RGB-RGBG像素结构转换算法及其FPGA实现[J]. 液晶与显示, 2017,32(7):572-579.
- HUANG C Q, YANG Y C, HE J, *et al.* RGB to RGBG conversion algorithm based on weighting factors and related FPGA realization [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(7): 572-579. (in Chinese)
- [26] 王成,刘坤,杜砾. 全参考图像质量指标评价分析[J]. 现代电子技术,2023,46(21):39-43.
- WANG C, LIU K, DU L. Evaluation and analysis of full reference image quality indicators [J]. *Modern Electronics Technique*, 2023, 46(21): 39-43. (in Chinese)
- [27] SAIGO H. Mean square error and variance estimation of the sample ratio under Lahiri's design [J]. *Statistics & Probability Letters*, 2025, 216: 110277.
- [28] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [29] ZENG J, FANG L, PANG J H, *et al.* Subpixel image quality assessment syncretizing local subpixel and global

- pixel features [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(12): 5841-5856.
- [30] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, *et al.* FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [31] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(11): 3440-3451.

作者简介:



董家昌,男,硕士研究生,2023年于长春理工大学获得学士学位,主要从事新型平板显示、数字图像处理方面的研究。
E-mail: dongjiachang23@mails.ucas.ac.cn



郑喜凤,女,博士,研究员,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事新型平板显示、数字图像处理、高速数据传输等方面的研究。E-mail: zhengxf@ccxida.com