

文章编号 1004-924X(2024)24-3554-12

电润湿电子纸的图像灰度信息自适应误差扩散

蔡蕊芃^{1,2}, 梅 婷^{1,2}, 林珊玲^{2,3}, 王廷雨^{2,3}, 毛文杰^{2,3},
张建豪^{2,3}, 郭太良^{1,2}, 林志贤^{1,2,3*}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350116;
2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福建 福州 350116;
3. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362200)

摘要:为解决当前电润湿电子纸显示灰度等级受驱动芯片限制和油墨回流影响,存在图像显示灰度等级丰富度不足,细节难以区分等问题,本文提出了一种用于电润湿电子纸的图像灰度信息自适应误差扩散技术。首先,对输入图像进行去噪和灰度化处理,以获得一个具有 256 级灰度的灰度图作为原始参考图;其次,通过亚像素边缘检测将图像细致地划分为边缘区域和平滑区域;本文强调了边缘区域,同时根据图像邻域灰度的变化,对平滑区域的纹理进行了优化,以符合人眼的局部视觉特性;最后,本文根据原始图像的灰度信息分布特点,调节阈值进行自适应误差扩散,以实现更精细的图像还原效果。实验结果表明,本算法处理后的图像在五分制的平均意见得分中获得 4.227 8 分,图像峰值信噪比的平均值达 45.903 3 dB,相较于其他先进技术提升了 16.47%~48.89%;平均视觉信息保真度达 0.964 3,相较于其他先进技术提升了 1.53%~50.02%。本文所提方法使电润湿电子纸显示的图像边缘更加清晰、细节还原度更高,提升了电润湿电子纸的可读性。

关键词: 电润湿电子纸;灰度等级;误差扩散;图像灰度信息

中图分类号: TN873 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243224.3554

Image gray scale information adaptive error diffusion of electrowetting electronic paper

CAI Bipeng^{1,2}, MEI Ting^{1,2}, LIN Shanling^{2,3}, WANG Tingyu^{2,3}, MAO Wenjie^{2,3},
ZHANG Jianhao^{2,3}, GUO Tailiang^{1,2}, LIN Zhixian^{1,2,3*}

(1. School of Physics and Info. Eng., Fuzhou Univ., Fuzhou 350116, China;
2. Fujian Optoelectronic Info. Sci. and Tech. Innovation Lab., Fuzhou 350116, China;
3. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou Univ., Quanzhou 362200, China)

* Corresponding author, E-mail: lzx2005000@163.com

Abstract: At present, the grayscale levels of electrowetting electronic paper are not enough to meet the display needs of mainstream images. Ink reflow also affects the image quality on electrowetting electronic paper, making it difficult to distinguish details, and leading to issues such as edge blur, loss of image details, and a strong particle sense in the displayed image. In order to solve these problems, this paper proposed an adaptive error diffusion algorithm based on characteristics of the grayscale information distribution

收稿日期: 2024-07-01; 修订日期: 2024-08-29.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2021YFB3600603)

in images. First, in order to obtain a high-fidelity grayscale reference image with 256 levels, an input color image was denoised and grayscale processed. Second, we employed sub-pixel edge detection to meticulously segment the image into edge and smooth regions. This method emphasized the edge areas while simultaneously enhancing the texture of smooth regions. This enhancement was tailored to align with the local visual characteristics of human eyes by considering the grayscale variations within the neighborhood of image. Last but not least, we adaptively adjusted the diffusion error threshold according to the grayscale information distribution characteristics of the reference image. This method reduced the error between the original reference grayscale image with 256 levels and the processed image. The experimental results showed that the images processed by this algorithm get 4.227 8 in the mean opinion score of the five-grade scoring system. The average peak signal to noise ratio reached 45.903 3 dB, marking a 16.47% to 48.89% improvement over other advanced technologies. Additionally, the average visual information fidelity reached 0.964 3, marking a 1.53% to 50.02% enhancement compared to other advanced methods. The method presented in this paper makes the edges of the images displayed on electrowetting electronic paper clearer and improves the detail and texture, thereby enhancing the readability of the electrowetting electronic paper.

Key words: electrowetting electronic paper; gray scale grade; error diffusion; image gray scale information

1 引 言

电润湿电子纸(Electrowetting Display, EWD)是一种以环境光作为反射光源,通过调节驱动电压来改变显示油墨的润湿性从而实现图像显示的器件,具有响应速度快、视角广、强光下可读性强、护眼、低功耗、易于柔性化等优点^[1-6],在倡导绿色环保的当下具有如户外大面积广告屏、护眼电子阅读器等广泛的应用前景,受到了国内外众多学者的关注。然而当前电润湿电子纸的显示灰度等级受驱动芯片和驱动方式限制,只能实现64个灰度等级的图像信息显示,这与主流的256灰度等级图像不匹配。传统解决方案采用保留高位灰度信息,舍去低位灰度信息来匹配显示,这种方法造成电润湿电子纸显示的图像出现阶跃跳变、边缘模糊、细节丢失^[7]。同时,电润湿电子纸作为一种被动发光型显示器,相对于LED等主动发光型显示器,电润湿的显示图像相对亮度较低,因此,对电润湿电子纸的显示灰度等级的丰富度和可分辨性的要求更高。为提高数字图像在电润湿电子纸上的显示效果,本文提出一种用于电润湿电子纸的图像灰度信息自适应误差扩散技术。误差扩散是半色调算法的一

种^[8],最早运用于印刷业,由FLOYD和STEINBERG提出经典的调频半色调算法^[9],后广泛用于显示、存储等领域。也有许多学者对该算法进行研究改进,比如KWAK等人^[10]专注于误差扩散算法造成的边缘质量损失上,提出了边缘信息优化的误差扩散算法;而曾素云等人^[7]、TAKAHIKO等人^[11]和HUAJIAN Z等人^[12]专注于量化过程中消失的弱纹理,提出了保留纹理的误差扩散算法;另有学者从阈值与参数着手进行改进,如KNOX等人^[13]提出不同的阈值权重设置的误差扩散算法;SHUO S等人^[14]提出对误差扩散核进行扩展,提高算法准确率;严惠等人^[15]提出一种以距离倒数作为基准,针对奇数和偶数行采用不同的误差扩散滤波器;ZI W等人^[16]、EVTIKHIEV N N等人^[17]和魏平平等人^[18]提出对全息图像进行多级误差扩散以及林珊玲等人^[19]进行了误差扩散技术的彩色优化。但这些技术都没有考虑原图的灰度信息分布特点以及不同显示器的显示特性差异,也无法兼顾图像边缘和纹理,导致处理后的图像未能充分还原原始图像信息。

基于上述问题,本文从经典的误差扩散算法入手,首先对输入的图像进行去噪、灰度化

等预处理,将输入图像转化为具有 256 灰度等级的灰度图作为参考图像。其次,将图像根据改进的亚像素边缘检测方法将图像划分为边缘区域和非边缘区域:通过调整系数突出图像的边缘部分,同时利用图像邻域的灰度变化,对非边缘区域的平滑纹理进行优化,以符合人眼的局部视觉特性。最后,根据原始图像灰度信息分布特点对图像进行自适应误差扩散处理。实验表明,经本文算法处理后的图像在电润湿电子纸显示器上可以很好地还原原始图像的边缘轮廓和纹理细节,减少图像降阶导致的颗粒感。

2 误差扩散原理

误差扩散算法的核心思想是:将当前待处理像素灰度等级与设定阈值相比较后得到输出像素灰度,再将输入输出像素间的灰度误差扩散至邻域内未处理像素。算法流程如图 1 所示。

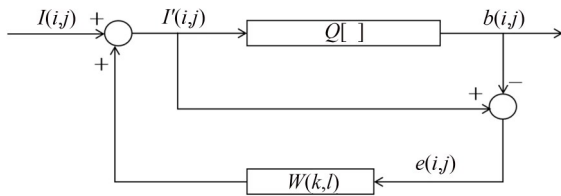


图 1 误差扩散算法流程图

Fig. 1 Flow chart of error diffusion algorithm

该算法主要包含以下步骤:如公式(1)所示,将当前待处理像素灰度 $I(i,j)$ 与其他已处理像素扩散至此的误差 $e(i,j)$ 相加得到新输入像素灰度 $I'(i,j)$:

$$I'(i,j) = I(i,j) + \sum_{m,n} W(m,n) \times e(i-m,j-n). \quad (1)$$

如式(2)所示,新输入像素灰度 $I'(i,j)$ 与阈值 $Q[]$ 比较后得到输出像素灰度 $b(i,j)$:

$$b(i,j) = Q[I'(i,j)]. \quad (2)$$

如式(3)所示,输入像素灰度 $I'(i,j)$ 与输出像素灰度 $b(i,j)$ 的差值作为误差 $e(i,j)$,通过误

差扩散滤波器 $Q[]$ 以相应系数权重扩散给相邻未处理区域像素:

$$e(i,j) = I'(i,j) - b(i,j), \quad (3)$$

其中: $Q[]$ 为量化阈值模型, $W(i,j)$ 为误差扩散滤波器, $m \times n$ 为待处理像素点进行误差扩散的区域。最为经典的 Floyd-Steinberg 误差扩散滤波器 $W(i,j)$ 如图 2 所示,该扩散滤波器区域为 2×3 。

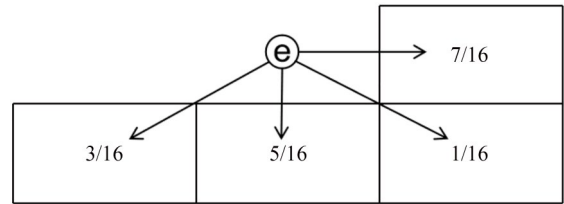


图 2 误差扩散滤波器示例

Fig. 2 Example of error diffusion filter

3 自适应误差扩散算法

误差扩散算法的核心方法是将误差扩散至相邻像素,通过空间上的人眼视觉特性提高图像显示信息,本质上是以图像分辨率为代价提升图像灰度等级丰富度,因此会造成图像分辨率下降,使图像边缘模糊、细节丢失。因此本文引入基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法并对边缘判断条件进行优化,从而能够对图像的边缘区域和非边缘区域进行精确而细致的分割。本文对图像的边缘区域赋予了特定的权重,以加强其在视觉上的显著性。此外,针对平滑区域的细微灰度变化,进行了纹理细节的优化处理,以符合人眼的视觉感知特性。最后根据图像灰度信息分布特点对误差扩散的阈值进行进一步调整,降低扩散误差。使显示图像边缘和细节更为清晰,降低图像颗粒感,提高电润湿电子纸的图像显示质量。

3.1 边缘增强的误差扩散处理

由于误差扩散算法是将当前像素误差扩散至邻域像素以平滑图像,这必然会导致图像的边缘轮廓模糊,而人眼本身对图像边缘是非常敏感的,边缘模糊会大幅降低显示图像的可读性。因此需要精确细致地提取出图像边缘进行强调,常

见的边缘检测方法有 Sobel 算子、Canny 算子和亚像素边缘检测。由于基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法具有良好的抗噪声能力,且检测精度可达亚像素级别^[20],将基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法引入误差扩散中有利于提高误差扩散对于图像边缘的处理性能,因此本算法通过提取图像基于 Zernike 矩的亚像素边缘进行强调。

首先将经去噪、灰度化得到的 256 灰阶参考图与 Zernike 正交矩进行卷积,使灰度图像经卷积后得以精确定位图像边缘,本算法采用高世一等人^[21]提出的 7×7 的 Zernike 模板系数集 M 与图像对应像素进行卷积运算得到图像对应 Zernike 矩集合 A 。通过图像 Zernike 矩计算各像素点边缘参数:边缘方向 θ 、参考距离 l_1 和 l_2 、边缘步长 k 、灰度差参数 d 。由于文献[21]依照公式(4)~公式(8)提取的图像边缘连贯性不足、边缘线条较为粗犷,因此本文在此基础上增加两个边缘参数提高边缘检测精度:由公式(9)得到检测边缘的随机距离 L ^[20]和由公式(10)得到边缘强度参数 G :

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(A_{31})}{\text{Re}(A_{31})} \right], \quad (4)$$

$$l_1 = \sqrt{\frac{5A_{40} + 3A_{20}}{8A_{20}}}, \quad (5)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{3A_{31} + A_{11}}{6A_{11}}}, \quad (6)$$

$$k = \frac{3A_{11}}{2(1 - l_2^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (7)$$

$$d = \frac{A_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \sin^{-1}(l_2) + kl_2 \sqrt{1 - l_2^2}}{\pi}, \quad (8)$$

$$L = \frac{A_{20}}{A_{11}}, \quad (9)$$

$$G = \frac{3A_{11}}{2(1 - L^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (10)$$

其中, $A = \{A_{00}, A_{11}, A_{20}, A_{31}, A_{40}\}$ 。为提高边缘提取精度,将边缘检测条件由公式(11)替换为公式(12)。其中, k_t, G_t, L_t 和 l_t 为判断阈值。若该像素点满足边缘检测条件则为图像边缘,依照式(13)取边缘亚像素坐标 (x_s, y_s) 标记为 1; 否则,

标记为 0, 取下一像素点重新计算边缘参数, 依次遍历整个图像提取图像边缘。

$$f_{\text{edge}} = k \geq k_t \cap |l_2 - l_1| \leq l_t, \quad (11)$$

$$f_{\text{edge}} = (k \geq k_t \cup |G| \geq G_t) \cap (|L| \leq L_t \cup |l_2 - l_1| \leq l_t), \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{NL}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中, N 为 Zernike 模板阶数。

依照公式(14)设定边缘强调值 α , 得到强调图像边缘的子图像 1:

$$I_{tf}(i, j) = \alpha \times f_{\text{edge}}(i, j), \quad (14)$$

其中: α 表示边缘强调系数, 经实验分析发现, 该值在 $[0.005, 0.010]$ 之间取值时, 实验效果较为理想; $f_{\text{edge}}(i, j)$ 表示图像边缘区域像素灰度。

人眼对图像的视觉感知不仅对图像边缘敏感, 还受到人眼局部视觉偏差和图像邻域的平均灰度影响, 因此本文将图像的局部区域设定为以待处理像素点为中心的 3×3 大小区域, 如公式(15)所示, 计算引入人眼局部视觉偏差的邻域加权平均灰度^[7]:

$$\text{Avg}(i, j) = \frac{\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 (S(m, n) \times F_i(i + m, j + n))}{2}, \quad (15)$$

其中, $S(m, n)$ 为邻域空间权重函数, 具体数值如式(16)所示: 由于人眼在水平和垂直方向的敏感度高于对角线方向, 因此取待处理像素本身权重为 1, 取对角线方向权重为 0.103 5, 水平和垂直方向权重为 0.146 5:

$$S(m, n) = \begin{bmatrix} 0.1035 & 0.1465 & 0.1035 \\ 0.1465 & 1 & 0.1465 \\ 0.1035 & 0.1465 & 0.1035 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

取非边缘区域像素 $F_i(i, j)$, 根据人眼视觉特性得到人眼感知到的图像灰度误差为 $\Delta F_i(i, j)$, 即待处理像素点与图像邻域加权平均灰度之间的差异^[7], 式(17)为计算公式:

$$\Delta F_i(i, j) = F_i(i, j) - \text{Avg}(i, j). \quad (17)$$

人眼对于图像的感知还包括图像结构信息: 图像结构偏差可通过当前待处理像素点与邻域内像素间的平均偏差来表征, 平均偏差越小, 像素结构相似度越大。同时邻域像素与当前待处

理像素间关系可以通过像素间欧氏距离进行表征,两像素欧氏距离越小,影响越大,所占权重越高^[7]。因此,依照公式(18)引入欧氏距离说明图像邻域结构相似度:

$$D(i, j) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \exp \left(- \frac{|F_i(i, j) - F_i(i + m, j + n)|}{N_p / h^2} \right), \quad (18)$$

其中: h 为控制因子,用于保留图像纹理细节信息,经实验分析,该值取0.4时图像纹理细节保留效果最好; N_p 邻域区域大小,本文设置为 3×3 。

对于图像非边缘区域的纹理细节和结构信息,依照公式(19)结合图像非边缘区域的人眼视觉感知差异和图像邻域结构相似度对图像进行细节优化,得到顾及图像平滑区域细节纹理的子图像2:

$$IEE(i, j) = \beta \times D(i, j) \times \Delta F_i(i, j) \times F_i(i, j), \quad (19)$$

其中, β 为控制系数,经实验分析发现,该值在 $[0.1, 0.5]$ 之间取值时,实验效果较为理想。

将强调图像边缘灰度信息的子图像1、顾及图像平滑区域细节纹理的子图像2和预处理后的256灰阶参考图 $z(i, j)$ 融合得到理想图像 $z1(i, j)$,从而更好地保留图像边缘与纹理,降低图像细节的丢失率,减轻图像颗粒感,计算公式如式(20)所示:

$$z1(i, j) = z(i, j) + Itf(i, j) + IEE(i, j). \quad (20)$$

3.2 结合图像信息的自适应误差扩散滤波器

根据误差扩散算法的原理可知,处理过程中传递给邻域像素的误差越小,最终图像的还原细节就越丰富,显示效果也就越接近原图的显示效果。在传统误差扩散算法中,传递的误差设定为目标图像和降阶得到的低灰阶图像间的灰度差,灰度降阶采用循环二值化的思想进行,如256灰度等级降至128灰度等级,就是将256灰阶两两一组重新划分成128灰阶。这种方法计算简单,但不同图像灰度信息的集中区域是不一致的,这一矛盾使进行均匀降阶后直接进行误差扩散处理的图像无法充分传递分布相对集中的图像信息,导致显示效果不佳。为解决

决这一问题,本文提出根据图像峰值灰度、均值灰度和中值灰度的关系设定评估参数 $index1$ 和 $index2$ 来评估图像灰度信息的分布情况,将图像分为高灰度等级信息丰富图像(High grayscale information rich image)、灰度等级信息均匀图像(Grayscale grade information uniform image)和低灰度等级信息丰富图像(Low grayscale information rich image)三类,图像分类过程如图3所示:

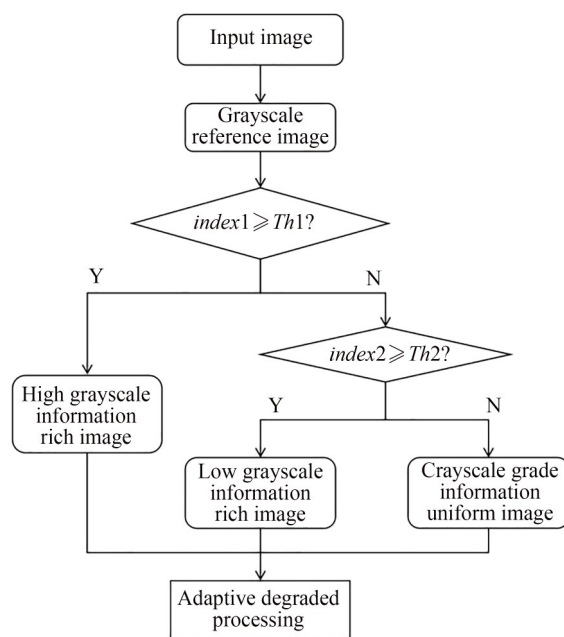


图3 图像分类流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the image classification flow

其中,灰度特征评估参数 $index1$ 和 $index2$ 分别如式(21)和式(22)来计算:

$$index1 = \omega_1 \times average + \omega_2 \times mid + \omega_3 \times peak, \quad (21)$$

$$index2 = |average - peak|, \quad (22)$$

其中, $average$, mid 和 $peak$ 分别表示灰度平均值、中值灰度和峰值灰度。

(1) 灰度等级信息均匀图像:当灰度特征信息加权平均数满足 $index1 < Th1$ 且 $index2 < Th2$ 时,该图像视为灰度信息在直方图中分布均匀,其中 $Th1$ 为高位信息图像和其他图像的分界阈值, $Th2$ 为低位信息图像和均匀信息图像的分界阈值,由于电润湿电子纸具有相对亮度非线性

的特点,经实验分析, $Th1$ 在 $[110, 170]$ 之间取值且 $Th2$ 在 $[33, 36]$ 时,分类结果较为理想,对该类图像采用公式(23)进行均匀降阶处理:

$$b(i, j) = z1(i, j) \cap (11\ 111\ 100)_2. \quad (23)$$

(2) 高灰度等级信息丰富图像:当图像灰度

$$\begin{cases} 0 \leq z1(i, j) < th_{h1}: b(i, j) = 5 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j)}{5}\right) \\ th_{h1} \leq z1(i, j) < th_{h2}: b(i, j) = (th_{h1} + 1) + 4 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j) - (th_{h1} + 1)}{4}\right) \\ th_{h2} \leq z1(i, j) \leq 255: b(i, j) = (th_{h2} + 1) + 3 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j) - (th_{h2} + 1)}{3}\right) \end{cases} \quad (24)$$

其中, th_{h1}, th_{h2} 分别为高位信息图像的中间灰阶段与低灰阶段和高灰阶段的分界阈值。

(3) 低灰度等级信息丰富图像:当灰度特征信息加权平均数满足 $index1 < Th1$ 且 $index2 \geq$

$$\begin{cases} 0 \leq z1(i, j) \leq th_{l1}: b(i, j) = 3 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j)}{3}\right) \\ th_{l1} < z1(i, j) \leq th_{l2}: b(i, j) = (th_{l1} + 1) + 4 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j) - (th_{l1} + 1)}{4}\right) \\ th_{l2} < z1(i, j) \leq 255: b(i, j) = (th_{l2} + 1) + 5 \times \text{round}\left(\frac{z1(i, j) - (th_{l2} + 1)}{5}\right) \end{cases} \quad (25)$$

其中: th_{l1} 为对于低位信息图像的中间灰阶段与低灰阶段的分界阈值, th_{l2} 为对于低位信息图像的中间灰阶段与高灰阶段的分界阈值。

图像进行自适应降阶处理得到待误差扩散处理的64灰阶图像,将误差设定为由公式(20)得到的强化边缘且优化平滑区域纹理的256灰阶理想图像和待误差扩散处理的64灰阶图像的像素灰度差,通过经典的Floyd-Steinberg误差扩散核进行误差扩散,得到误差扩散结果图。

4 实验结果与分析

为验证所提技术对不同类型图像的自适应能力,本文从网络公开数据集和免费图片网站上抽取如图4所示的15张图像作为测试图像,这些图像具有不同的灰度层次和细节,覆盖了从简单到复杂多种场景,尽可能确保了实验的全面性和代表性。

信息分布评估参数满足 $index1 \geq Th1$ 时,该图像视为图像灰度信息集中在高灰度等级部分,对该类图像进行如公式(24)所示的分段降阶处理,即高灰阶段细致划分,低灰阶段粗略划分,中间灰阶段均匀划分:

$Th2$ 时,该图像信息集中在低灰度等级部分,对该类图像进行如公式(25)所示的分段降阶处理,即高灰阶段粗略划分,低灰阶段细致划分,中间灰阶段均匀划分:

4.1 图像边缘提取

为弥补误差扩散引起的图像边缘模糊问题,需要精确细致地提取出图像边缘进行强化。为验证本文所提出的对亚像素边缘检测算法改进的客观效果,在MATLAB R2015a平台上对图4所示的15张测试图像分别采用文献[20]、文献[21]和本文边缘检测方法进行处理,从边缘强度和边缘线条的长宽比两个维度对三种算法的处理结果进行对比评估,平均边缘强度和平均长宽比结果如表1所示。

图像边缘强度越大说明图像检测的边缘越精确,图像平均长宽比越大说明图像边缘绘制得越细致,从表1的对比结果可以看出文献[19]的亚像素边缘检测技术中边缘判定条件的边缘长度和边缘步长阈值恒定,所以虽然刻画的图像边缘最为细致,但精度不足;文献[20]提出对文献[19]所采用的卷积的Zernike矩进行改进,刻画的图像边缘精确度更高,但是边缘判定条件上缺

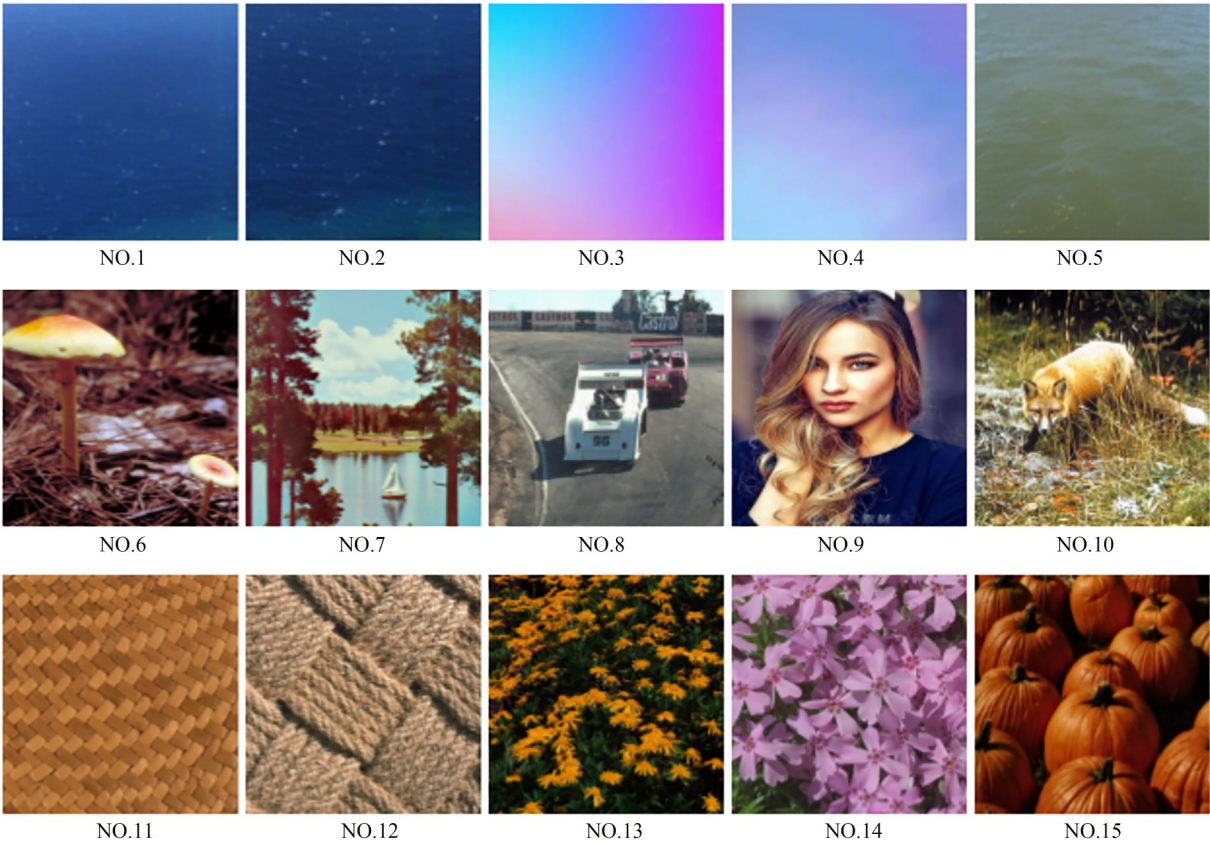


图4 测试图像
Fig. 4 Test images

表 1 边缘检测结果

Tab. 1 Edge detection results

Method	Index	
	Mean edge strength	Mean aspect ratio of the edge lines
Literature [20]	1. 345 3	2. 115 5
Literature [21]	2. 094 9	1. 619 8
Proposed method	2. 327 8	1. 756 4

乏对图像整体灰度的参考,因此刻画的图像边缘线条较粗,且存在无法检测出较为平滑区域内的边缘等问题;而本文在文献[20]的基础上,对边缘判定条件的阈值设定增加了基于图像整体灰度参考的条件,使亚像素边缘检测的平均边缘强度相对于次优方法(文献[20])提升了约11.12%,平均边缘长宽比虽不如文献[19],但边缘的提取更为精确,且线条长宽比优于文献[20]的检测结果,因此采用本文改进的边缘提取技术可以有效强调图像边缘。

4.2 主观评价分析

为了验证本研究提出的图像处理技术在视觉感知上的效果是否符合人眼的主观感受,我们参照张博文等人^[22]对HDR图像的主观评价分析方法进行主观评价实验:首先,对如图4所示的测试图像集进行去噪和灰度化处理,获得15张256灰阶的参考图像。然后,我们在MATLAB R2015a平台上对图4所示的15张测试图像分别采用文献[7]、文献[11]、文献[15]、文献[19]和本文算法进行处理,获得75张测试图像。图5为本文算法对图4所示的15张测试图像的处理结果。最后,在如图6(a)所示的测试环境中,依次将参考图像与测试图像同时展示给受试者进行主观评价实验。

邀请了60名受试者逐一在正对显示屏40 cm处进行无限时主观评价打分,评价标准采用5分制:5分为极佳,4分为较好,3分为一般,2分为较差,1分为糟糕,每次实验前随机调整图像组的顺序。参与实验的60名受试者中,男女比例为1:1,

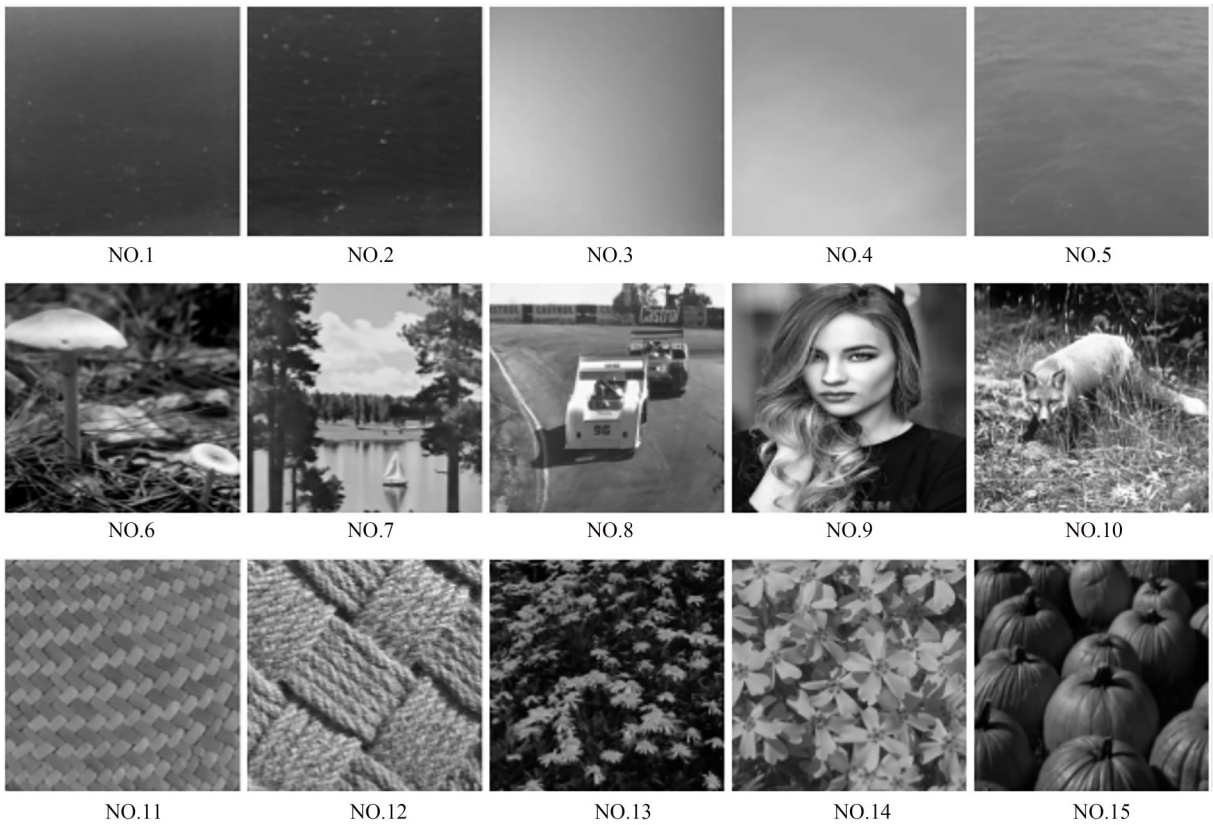


图 5 本文算法处理结果

Fig. 5 Results of the algorithm proposed in this paper

年龄跨度从 17 岁到 65 岁,其中 30 岁以下的占 60%,30 至 50 岁的占 25%,50 岁以上的占 15%,平均年龄为 33 岁。所有参与者都经过筛选,确保他们的色彩分辨能力和视力水平均符合实验要求,以保证实验结果的准确性和可靠性。

通过 SPSS 26 软件对主观评价实验结果进行分析,分析结果如表 2 所示,表 2 中:df 为自由度;F 为组间方差和组内方差的比值;Sig. 为显著性。分析结果表明,误差扩散技术和图像灰度信息特点均是误差扩散图像质量的重要影响因素。

256 灰阶的灰度图像经本文算法处理后,所得 64 灰阶灰度图像质量最佳,如图 6(b)所示,其

表 2 不同变量因素对图像质量评分的 ANOVA 影响

Tab. 2 ANOVA effect of different variable factors on image quality scores

Factor	Image quality score		
	df	F	Sig.
Method	4	130.714	0
Image grayscale information features	14	10.619	0

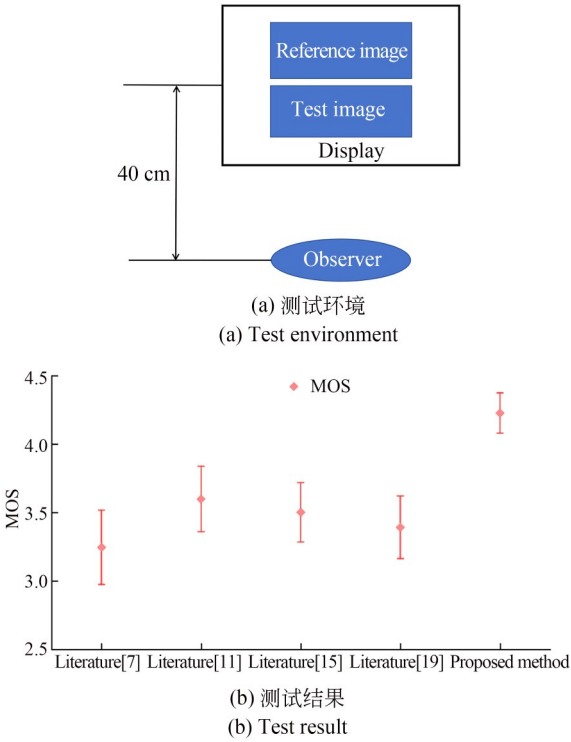


图 6 主观评价实验

Fig. 6 Subjective evaluation experiment

图像平均意见(Mean Opinion Score, MOS)达到 4.227 8 分,而次优方法(文献[11])的 MOS 为 3.600 分,本文方法相较于次优方法提升了 17.44%,实验结果表明,本文所提方法能较好地将 256 灰阶灰度图显示效果还原,且有明显优势。

4.3 客观评价

本文着眼于图像灰度信息特点,对电润湿电子纸进行符合人眼视觉特性的显示优化,因此我们采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)^[19]和视觉信息保真度(Visual Information Fidelity, VIF)^[23]这两个业内公认的评估指标对本文算法与文献[7]、文献[11]、文献[15]和文献[19]的处理结果进行评估对比。这两个指标能够全面地评估图像处理结果的信息丰富度和视觉符合度,以确保本文所提技术在提升图像质量的同时保持图像的视觉观感。实验结果如表 3 所示,可以得到本算法的峰值信噪比 PSNR 的平均值达到 45.903 3 dB,因此相对于文献[7]算法、文献[11]、文献[15]算法和文献[19]算法分别提升了 48.89%, 16.47%, 33.61% 和 42.43%;本算法的视觉信息保真度平均值达到 0.9643,相对于文献[7]算法、文献[11]算法、文献[15]和文献[19]算法分别提升了 10.98%, 1.73%, 1.53% 和 50.02%;经分析:文献[7]算法由于只专注于误差扩散技术与图像邻域信息的结合,缺乏对图像边缘信息的考量,造成图像干燥且边缘模糊;文献[11]算法虽然根据图像纹理信息修正了扩散误差,但缺乏对图像的不同灰度信息分布特征的考量,对于不同灰度分布特征的图像的处理不够灵活,因此在图像平滑区域内与原始图像所传达的信息间存在较大误差,产生“蠕虫”现象;文献[15]采用的以距离倒数为基准,在奇数行和偶数行分别采用不同的误差扩散滤波器处理,这种方法虽然降低了扩散误差,但缺乏对人眼局部视觉特性的考量和误差扩散对图像边缘的弱化,导致图像的视觉保真度不足;文献[19]算法考量了边缘和图像邻域信息的影响,但没有利用图像灰度信息调节误差扩散的阈值,导致图像扩散误差较大,产生了“伪轮廓”;而本算法在强调图像边缘信息和细节纹理的同时,根据图像灰度信息的分布特征进行了自适应处理,减少了扩散误差,使本算法处理后的图像充分保留了原图的信息,图

像信息更加丰富。表 3 的客观评价结果说明了经本文算法处理后的图像在误差扩散过程中充分利用图像灰度分布特点来保留原始图像细节,在还原图像边缘和细节的同时提升了图像的观感。

表 3 客观评价结果

Tab. 3 Objective evaluation results

Method	Mean value of objective evaluation	
	PSNR/dB	VIF
Literature [7]	30.830 5	0.868 9
Literature [11]	39.410 7	0.949 8
Literature [15]	34.355 3	0.947 9
Literature [19]	32.228 9	0.642 8
Proposed algorithm	45.903 3	0.964 3

4.4 样机实验结果验证

由于电润湿电子纸受驱动芯片限制,256 灰度等级图像需要转化为 64 灰度等级进行显示,传统处理方法采用的直接保留高位、舍去低位会造成图像细节丢失、边缘模糊,而本文所提出的技术是在强化图像边缘和平滑区域的纹理的基础上根据图像灰度信息分布特点对图像进行自适应误差扩散处理,既可以保留了图像边缘纹理,又针对图像灰度信息分布的特点降低了图像的扩散误差,降低误差扩散对图像的负面影响,因此采用本文所提出的技术进行处理的图像在电润湿电子纸上具有更丰富的纹理细节、更清晰的图像边缘。为验证本文所提技术在电润湿电子纸上的显示效果符合预期,将 4.2 节的 256 灰阶参考图像和图 5 所示的本文算法处理结果分别传输给分辨率为 648×480 、支持 64 级灰阶的单色电润湿显示屏上进行样机验证。图 7 和图 8 分别为 Woman 测试图和 Car 测试图的原始图像和本文算法处理后的图像在电润湿上的显示效果。从图 7(c)可以看出 Woman 测试图上脸部左侧的,海纹理相对于图 7(b)具有更多细节层次,与图 7(a)的细节更加贴合,右侧眉眼的边缘轮廓更加清晰。从图 8(c)可以看出,图像的字母比图 8(b)的显示轮廓更加清晰;如图 8(c)所示,在电润湿显示屏上显示时,图 8(a)白车左上角的车辆轨迹在图 8(b)中丢失了,而在图 8(c)上可以看出,经过本文算法处理后,这个轨迹在电润湿显示屏

上还原出来了;图8(c)中的车号“96”的显示效果相对于图8(b)也更加清晰。以上结果验证了本文算法可以在 64 级灰阶的电润湿电子纸上更好地还原 256 级灰阶图像的细节轮廓。

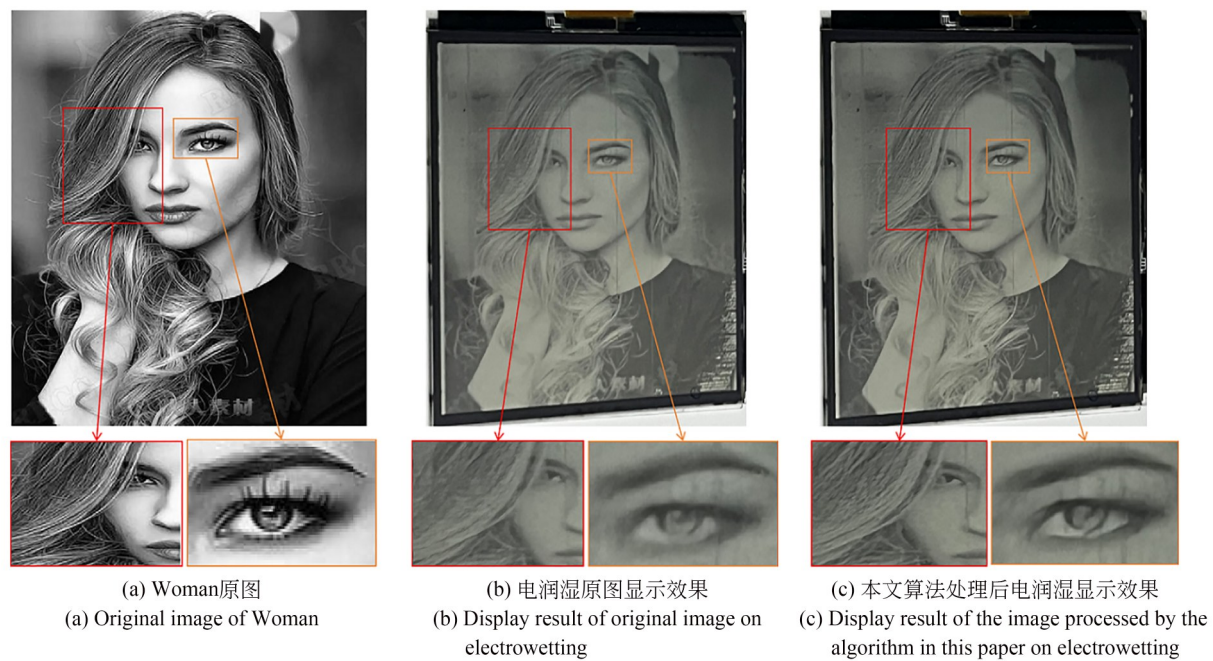


图7 Woman的单色电润湿显示屏显示效果对比图

Fig. 7 Comparison diagram of display effect of monochrome electrowetting display of Woman

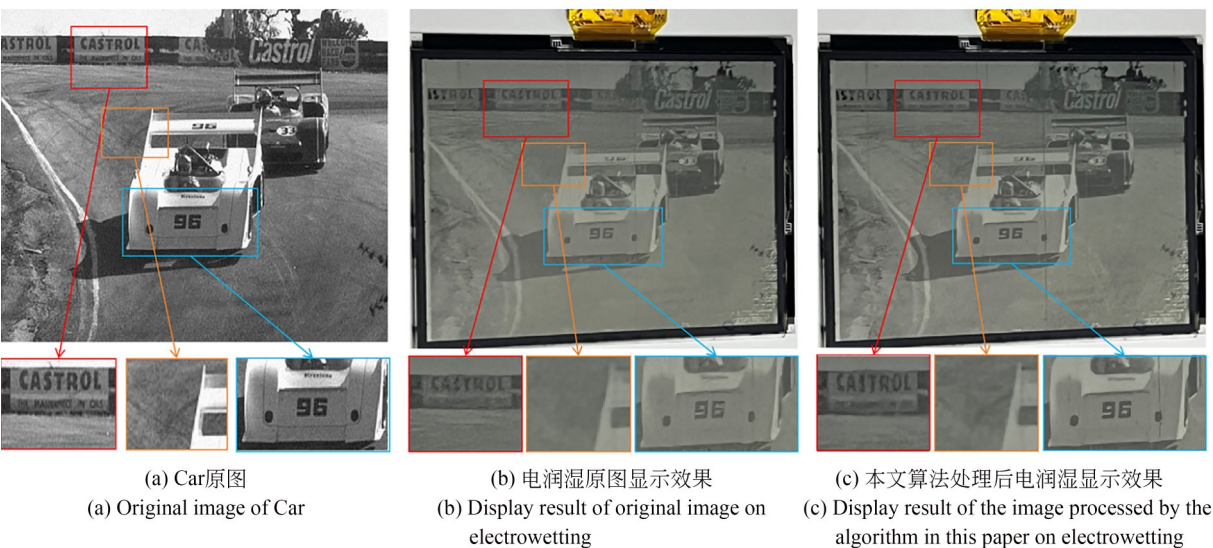


图8 Car的单色电润湿显示屏显示效果对比图

Fig. 8 Comparison diagram of display effect of monochrome electrowetting display of Car

5 结 论

本文针对电润湿电子纸受驱动芯片和驱动方式限制和油墨回流影响,导致电润湿电子纸显

示图像细节丢失、轮廓边缘模糊等问题,提出了适用于电润湿电子纸的图像灰度信息自适应误差扩散算法。本文先介绍了误差扩散的基本原理,再针对误差扩散算法的缺陷对显示图像进行

边缘强调、结合人眼局部视觉偏差和图像邻域灰度变化调节图像平滑区域的细节纹理,最后在经典的 Floyd-Steinberg 误差扩散核的基础上根据原始图像的灰度信息分布特点自适应调节扩散误差,再传递给邻域像素,有效减少了扩散误差。实验结果证明:本算法处理后的图像在五分制的平均主观评分中获得 4.227 8 分;峰值信噪比的平均值达 45.903 3 dB,相较于其他先进技术提升了 16.47%~48.89%;视觉信息保真度的平均值达 0.964 3,相较于其他先进技术提升了 1.53%~50.02%。测试图像涵盖了色彩变化平

滑、有一定纹理变化的自然图像以及纹理边缘丰富的图像,所提技术均有良好表现,充分说明本文提出的技术既可以去除图像噪声干扰,还能完整保留原始图像边缘和细节纹理等信息,在电润湿电子纸上很好地复现了原始图像的信息,给人以较好的视觉观感。

同时,目前该技术还停留在对单色图像的显示优化上,未来我们将在此基础上根据电润湿所采用的彩色油墨特性改进我们的技术,实现对彩色电润湿电子纸显示图像的优化,并将其应用到视频上,以提高电润湿电子纸的彩色视频显示效果。

参考文献:

- [1] XU W Z, YI Z C, JIANG M H, *et al.* High-performance multi-level grayscale conversion by driving waveform optimization in electrowetting displays [J]. *Micromachines*, 2024, 15(1): 137.
- [2] 刘予敏,林珊玲,林志贤,等. 不同色温环境光下彩色电润湿电子纸的色彩校正[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(1): 32-39.
LIU Y M, LIN S L, LIN Z X, *et al.* Color correction of color electrowetting display under ambient light with different color temperatures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(1): 32-39. (in Chinese)
- [3] 杨斌,邱莹,林喆,等. 柔性电润湿显示发展现状及展望[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(4): 436-446.
YANG B, QIU Y, LIN Z, *et al.* Development status and outlook of flexible electrowetting display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(4): 436-446. (in Chinese)
- [4] MEI T, LIN Z X, XIE Z Y, *et al.* A driving method for gray scale multiplication of electrowetting display based on hybrid modulation [J]. *Frontiers in Physics*, 2024, 12: 1386889.
- [5] DAI X Y, YANG J K, SHU C, *et al.* Self-powered colorful dynamic electrowetting display systems based on triboelectricity [J]. *Small*, 2024, 20(27): e2310359.
- [6] YI Z C, ZHANG H, JIANG M H, *et al.* Editorial for the special issue on advances in optoelectronic devices [J]. *Micromachines*, 2023, 14(3): 652.
- [7] 曾素云,林珊玲,林志贤,等. 基于邻域灰度信息误差扩散算法的电润湿电子纸研究[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(3): 317-323.
- [8] ZENG S Y, LIN S L, LIN Z X, *et al.* Error diffusion algorithm based on neighborhood gray information in electrowetting electronic paper research [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(3): 317-323. (in Chinese)
- [9] LI D H, KIYOTOMO T, HORIUCHI T, *et al.* Texture-aware error diffusion algorithm for multi-level digital halftoning [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2020, 64(5): 50410-1-050410-9.
- [10] FLOYD R W, STEINBERG L. An adaptive algorithm for spatial gray scale [J]. *Proceedings of the Society for Information Display*, 1975, 17: 75-77.
- [11] KWAK N J, RYU S P, AHN J H. Edge-enhanced error diffusion halftoning using human visual properties [C]. 2006 *International Conference on Hybrid Information Technology*. Cheju, Korea (South). IEEE, 2006: 499-504.
- [12] KIYOTOMO T, TANAKA M, HORIUCHI T. Appearance-preserving error diffusion algorithm using texture information [J]. *Electronic Imaging*, 2019, 31(14): 104-1-104-5.
- [13] HUAIJIAN Z, DAZHONG M A. A scene-text feature enhanced halftone method based on invertible neural network [J]. *Academic Journal of Computing & Information Science*, 2024, 7(2): 19-25.
- [14] KNOX K T, ESCHBACH R. Threshold modulation in error diffusion [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2: 185-192.
- [15] SHAN S, XU P, ZHANG W, *et al.* Error-diffusion-kernel parameters for binary pattern in 1-bit fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(33): 8882-8893.

- [15] 严惠, 邓小龙, 孔德文. 一种新型的彩色图像多目标颜色的配准与抖动算法[J]. 电子器件, 2024, 47(1): 140-144.
YAN H, DENG X L, KONG D W. A new registration and dithering algorithm for multi-target colors of color image[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2024, 47(1): 140-144. (in Chinese)
- [16] WANG Z, TU K F, PANG Y J, *et al.* Lensless phase-only holographic retinal projection display based on the error diffusion algorithm[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46450-46459.
- [17] EVTIKHIEV N N, RODIN V G, SAVCHENKOVA E A, *et al.* Adaptive iterative method of selecting weight coefficients for digital hologram binarization using error diffusion [J]. *Measurement Techniques*, 2022, 65(6): 432-437.
- [18] 魏平平, 韩超. 基于误差扩散的计算全息显示方法[J]. 光学学报, 2024, 44(8): 3788/AOS231792.
WEI P P, HAN C. Computational holographic display method based on error diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 3788/AOS231792. (in Chinese)
- [19] 林珊玲, 谢欣欣, 林坚普, 等. 增强彩色电子纸饱和度的误差扩散优化[J]. 光电工程, 2024, 51(1): 230309.
LIN S L, XIE X X, LIN J P, *et al.* Error diffusion optimization to enhance the saturation of colored e-paper [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(1): 230309. (in Chinese)
- [20] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(2): 295-306.
- [21] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于Zernike正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1163-1168.
GAO S Y, ZHAO M Y, ZHANG L, *et al.* Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(9): 1163-1168. (in Chinese)
- [22] 张博文, 夏振平, 张跃渊, 等. 基于改进拉普拉斯金字塔的HDR图像色调映射算法[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(4): 3788/LOP230581.
ZHANG B W, XIA Z P, ZHANG Y Y, *et al.* Tone mapping algorithm for high dynamic range images based on improved Laplacian pyramid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(4): 3788/LOP230581. (in Chinese)
- [23] SHEIKH H R, BOVIK A C. Image information and visual quality [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2): 430-444.

作者简介:



蔡苾芃(2000—),女,福建福州人,硕士研究生,2022年于青岛大学获得学士学位,主要研究方向为电润湿电子纸显示技术和图像处理技术。E-mail: caibipeng20000@163.com

通讯作者:



林志贤(1975—),男,福建泉州人,博士,教授,博士生导师,1998年、2001年、2010年于福州大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位,主要研究方向为电子纸显示和平板显示器件及其驱动技术。Email: lzx2005000@163.com.