

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

增强彩色电子纸饱和度的误差扩散优化

林珊玲, 谢欣欣, 林坚普, 林志贤, 郭太良

引用本文:

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-Electron Eng*, 2024, 51(1): 230309.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.230309>

收稿日期: 2023-12-20; 修改日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-05

相关论文

基于改进Otsu的电润湿缺陷图像分割

廖钦楷, 林珊玲, 林志贤, 陈哲亮, 李甜甜, 唐彪

光电工程 2020, 47(6): 190388 doi: 10.12086/oe.2020.190388

电润湿电子纸的实时动态显示驱动系统实现

钱明勇, 林珊玲, 曾素云, 林志贤, 郭太良, 唐彪

光电工程 2019, 46(6): 180623 doi: 10.12086/oe.2019.180623

基于双频域特征聚合的低照度图像增强

徐胜军, 杨华, 李明海, 刘光辉, 孟月波, 韩九强

光电工程 2023, 50(12): 230225 doi: 10.12086/oe.2023.230225

一种并行混合注意力的渐进融合图像增强方法

刘光辉, 杨琦, 孟月波, 赵敏华, 杨华

光电工程 2023, 50(4): 220231 doi: 10.12086/oe.2023.220231

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal

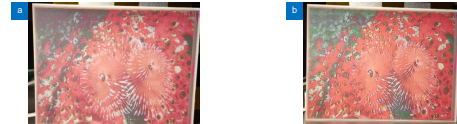


Website



DOI: 10.12086/oe.2024.230309

增强彩色电子纸饱和度的 误差扩散优化

林珊玲^{1,2}, 谢欣欣^{1,2}, 林坚普^{1,2*}, 林志贤^{1,2,3}, 郭太良^{2,3}¹福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362251;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 物理与信息工程学院, 福建 福州 350116

摘要: 为解决彩色电泳电子纸因粘滞阻力等引起的显示颜色饱和度低、边缘模糊等问题, 本文提出基于 HSL 空间的彩色电子纸边缘增强误差扩散算法, 以提高图像显示质量。该算法首先将去噪图像利用边缘检测算子得到边缘增强图像, 结合边缘增强图像像素邻域平均灰度、像素与邻域灰度差异和像素邻域相似度得到新 RGB 图像像素值。接着, 新 RGB 图像通过阈值处理过程得到 16 色阶 RGB 图像。最后, 16 色阶 RGB 图像转换到 HSL 空间, 建立 HSL 和 RGB 色彩空间的转换模型, 根据像素点的亮度和饱和度计算出调整因子, 从而增强 RGB 图像饱和度。该算法与传统的误差扩散算法相比, 信噪比 PSNR 提高了 3.9%~26.7%, UCIQE 提高了 10.1%~48.2%, 相似度 SSIM 提高了 13.2%~25.4%。主观评价参考 ITU-R BT.500-1 标准设计实验计算 Z 得分, 最终本文算法处理后图像在彩色电子纸上显示的图像细节和颜色更加接近原图, 整体视觉效果更好。

关键词: 彩色电泳电子纸; 误差扩散; 饱和度; 边缘检测; 图像增强

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

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-Electron Eng*, 2024, 51(1): 230309

Error diffusion optimization to enhance the saturation of colored e-paper

Lin Shanling^{1,2}, Xie Xinxin^{1,2}, Lin Jianpu^{1,2*}, Lin Zhixian^{1,2,3}, Guo Tailiang^{2,3}¹School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou, Fujian 362251, China;²Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou, Fujian 350116, China;³College of Physics and Telecommunication Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China

Abstract: To solve the problems of low color saturation and edge blurring caused by viscous resistance and other factors in color EPD, this paper proposes a color e-paper edge enhancement error diffusion algorithm based on HSL space to improve the display quality. This algorithm first uses an edge detection operator to obtain edge-enhanced images from denoised images. It combines edge-enhanced image pixel neighborhood average gray level, pixel and neighborhood gray level difference, and pixel neighborhood similarity to obtain new RGB image

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3603705); 国家自然科学基金青年基金 (62101132); 福建省自然科学基金 (2020J01468)

*通信作者: 林坚普, lj@fzu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

pixel value. Then, the new RGB image is processed by a threshold process to obtain a 16-level RGB image. Finally, the 16-level RGB image is converted to HSL space, and a conversion model between HSL and RGB color spaces is established. According to the brightness and saturation of the pixel, the adjustment factor is calculated to enhance the saturation of the RGB image. Compared with the traditional error diffusion algorithm, the signal-to-noise ratio PSNR of this algorithm is improved by 3.9%~26.7%, the UCIQE is improved by 10.1%~48.2%, and the SSIM is improved by 13.2%~25.4%. The subjective evaluation refers to the ITU-R BT.500-1 standard to design experiments and calculate Z scores. Finally, the image details and colors of the image processed by this paper algorithm are closer to the original image on the color e-paper, and the overall visual effect is better.

Keywords: color electrophoresis display; error diffusion; saturation; edge detection; image enhancement

1 引言

电泳电子纸具备和普通纸张一样的反射型、宽视角特性, 在使用过程中不会因为背板光源的存在而伤害眼睛。同时电泳电子纸还具有低功耗、双稳态的优点, 所以常常适用于电子书籍、货架价签和广告牌^[1]。它的护眼特点使其深受大众喜爱, 进而人们对彩色电泳电子纸抱有更多的期待, 但目前仍存在显示图像细节不清晰, 色彩失真等问题。

本文中的电子纸显示屏采用的是 E-ink 微杯型彩色电泳电子纸^[2], 微杯中包含白色、品红色、黄色和青色粒子, 这些粒子本身都带有正电荷或负电荷。电子纸内壁集成了栅极和源极驱动模块, 在栅极和源极给予设计好的电压序列, 微杯内部形成电场, 粒子在电场力作用下运动, 呈现指定图像。目前市场上的彩色电泳电子纸的显示是根据 CMY 减色原理, 一个像素可以表达 32 种不同的颜色, 利用颜色抖动算法可以实现六万种颜色左右^[3]。颜色抖动算法^[4]主要包括随机颜色抖动、有序颜色抖动和误差扩散颜色抖动。其中误差扩散算法应用广泛, 适合电子纸这类反射式显示器件。在实际应用中, 彩色电子纸内部带电电荷的运动是受施加电压的控制, 施加电压的大小和时间会影响到电泳粒子的迟滞特性, 导致电子纸残影现象和预期色阶不能够精准再现的问题。最终在显示图像时出现图像失真、边缘信息丢失和颜色饱和度不够等问题。

从图像处理的角度出发, 最常用的是误差扩散算法来解决上述问题。Floyd 和 Steinberg^[5]两位研究学者提出了经典的 Floyd-Steinberg 误差扩散算法。将当前像素值与阈值化后像素值的误差采用 Floyd-Steinberg 滤波器扩散到周围像素点, 在一定程度上和单纯截取高四位算法比较, 图像更加平滑和自然。但

是还存在图像颜色失真、颗粒感严重的问题。林夏微等^[6]针对黑白电子纸灰阶少提出一种基于误差扩散动态检测的改进算法, 改善了黑白电子纸的图像显示质量, 但显示图像的固定纹路和边缘不够清晰。赵静等^[7]提出的基于 HVS 模型的误差扩散系数, 提高了误差扩散算法在色彩上的还原度。但在人的主观感受中图像的纹理更多。曾素云等^[8]提出基于像素邻域灰度信息的误差扩散算法, 以保持图像的边缘和丰富度, 但是仅仅在灰色图像实现, 没有考虑将新算法扩展到彩色图像或其他类型的图像。Kaiming Wu 等^[9]提出利用一维 Neugebauer 模型(一种用于印刷网点呈色的数学模型)重新表述灰度误差扩散, 然后增加模型的维度, 得到基于三维 Neugebauer 模型的 RGB 空间中的彩色误差扩散方法。相比较传统彩色误差扩散方法更好地保留了原始图像的色调和降低了噪声, 但适用性和效率太低。

基于以上研究, 为进一步提高误差扩散算法在电泳电子纸上的表现力, 增强彩色电泳电子纸的饱和度, 本文算法结合了传统的误差扩散算法和彩色电泳电子纸的特性分析, 提出了基于 HSL 空间的边缘增强的误差扩散算法, 使得经过本文算法处理后的图像在彩色电子纸上显示的图像细节更丰富, 颜色饱和度更加接近原图。

2 算法基本原理

2.1 传统误差扩散算法

误差扩散算法可以使得电子纸显示的图像在视觉上具有更多的色阶层次, 提高图像质量。传统的误差扩散算法如图 1 所示。

图中的 $f(m,n)$ 、 $f^*(m,n)$ 、 $b(m,n)$ 和 $e(m,n)$ 分别表示原像素值、误差扩散之后像素值、量化后像素值和量化前后像素误差值。

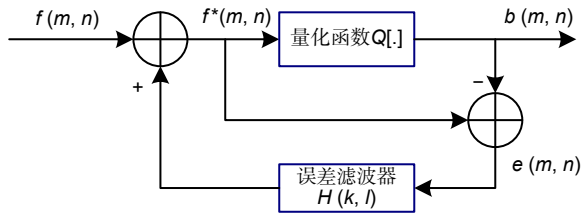


图 1 Floyd-Steinberg 误差扩散原理框图
Fig. 1 Block diagram of Floyd-Steinberg error diffusion

算法主要步骤：在彩色图像 RGB 空间中分别处理每个通道的像素点，当前像素点 $f(m,n)$ 加上邻近像素点扩散误差 $\sum H(k,l) \cdot e(m-k,n-1)$ 两者和为 $f^*(m,n)$ ，并根据电泳电子纸的硬件特性，设置阈值区间。阈值化处理后输出像素值 $b(m,n)$ ，阈值化前后值之间的误差 $e(m,n)$ 利用传统的误差扩散滤波器 $H(k,l)$ 扩散到周围像素上。最后，将三个颜色通道的处理后的像素点合成一幅新的彩色图像。主要公式为：

$$f^*(m,n) = f(m,n) + \sum H(k,l) \cdot e(m-k,n-1), \quad (1)$$

$$b(m,n) = Q[f^*(m,n)], \quad (2)$$

$$e(m,n) = f^*(m,n) - b(m,n). \quad (3)$$

传统的误差扩散滤波器 $H(k,l)$ 系数如表 1 所示，其中系数 6/17、1/17、5/17 和 3/17 指在分配误差时，相邻像素的权重比例；星号表示当前像素。

表 1 Floyd-Steinberg 误差扩散滤波器系数
Table 1 Floyd-Steinberg error diffusion filter coefficient

	*	6/17
3/17	5/17	1/17

2.2 图像边缘检测原理

一幅图像可以分为低频和高频部分，增强图像边缘也就是增强图像高频区域。边缘区域的像素点的灰度值梯度相较于非边缘区域大，梯度是指图像的像素点沿着不同方向的变化率，梯度越大该像素点变化越剧烈。因此可通过边缘检测算子来区分边缘区域与非边缘区域。常见的边缘检测算子有 Sobel 算子、Roberts 算子和 Laplace 算子。Laplace 算子的优点就是面对图像边缘多样的梯度方向都能够严格检测。对于一个连续的二元函数 $P(x,y)$ ，其 Laplace 运算定义为

$$\nabla^2 P = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (4)$$

对于数字图像，Laplace 算子可以简化为

$$g''(m,n) = 4f''(m,n) - f''(m+1,n) - f''(m-1,n) - f''(m,n+1) - f''(m,n-1). \quad (5)$$

此外，Laplace 算子也可以用模板的形式^[10]。为增加对角线方向的灰度变化，产生更强烈的边缘增强效果。本文采用如下所示的 Laplace 算子扩展模板：

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

拉普拉斯算子扩展模块的原理是利用负值来增强图像中的边缘和细节，相比其他的基本拉普拉斯算子，可以更好地保持图像的各向同性。

2.3 HSL 增强色彩饱和度原理

HSL 空间由色调、饱和度和亮度描述图片，更符合人眼的主观感受。因此可通过在 HSL 空间对饱和度进行调整，从而增强显示图像的饱和度。其算法步骤如下：首先将 RGB 空间图像转换到 HSL 空间，用来对饱和度 s 进行上下限控制：

$$L = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}), \quad (6)$$

$$s = \begin{cases} \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} & L \leq 0.5 \\ \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 - (I_{\max} + I_{\min})} & L \geq 0.5 \end{cases}, \quad (7)$$

其中： L 表示亮度， s 表示饱和度， I_{\min} 和 I_{\max} 代表 RGB 空间的 R、G、B 颜色值中的最小值和最大值。

设置饱和度增量 i ，并计算出适用于 RGB 空间的调整系数 α 进行饱和度调整。当 $i+s$ 大于 1 时，取 s 作为调整依据，当 $i+s$ 小于 1，取 i 作为调整依据。RGB 空间的调整系数 α 为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1-s}{s} & i+s > 1 \\ \frac{i}{1-i} & i+s < 1 \end{cases}. \quad (8)$$

计算出调整系数后，将调整系数运用在 RGB 空间对 RGB 进行调整，调整公式为

$$\begin{cases} R = R + (R - 255L) \times \alpha \\ G = G + (G - 255L) \times \alpha \\ B = B + (B - 255L) \times \alpha \end{cases}. \quad (9)$$

3 基于 HSL 边缘增强的误差扩散算法

电子纸作为一种反射式显示屏，其显示图像的饱和度受到外界环境光的影响比传统显示屏更大，且人眼感知的色彩饱和度随着外界光照变弱而变低，因此所观察到的显示图像会存在色差和失真。因此本文提出基于 HSL 边缘增强的误差扩散算法，算法基本流程如图 2 所示。首先将输入的 RGB 图像进行平滑去

噪处理, 避免噪声影响后续的边缘检测。接着将图像与拉普拉斯扩展模板算子进行卷积运算^[11], 得到拉普拉斯图像。图像分层过程如式 (10) 和式 (11) 所示:

$$g(m,n) = -8F(m,n) + F(m+1,n) + F(m-1,n-1) + F(m-1,n+1) + F(m+1,n-1) + F(m+1,n+1) + F(m-1,n) + F(m,n+1) + F(m,n-1), \quad (10)$$

$$g'(m,n) = F(m,n) - g(m,n), \quad (11)$$

式中, $F(m,n)$ 为输入的 RGB 图像各通道的像素值, $g(m,n)$ 为各通道拉普拉斯图像, $g'(m,n)$ 为边缘增强后图像。

人眼不仅对图像灰度信息敏感, 对图像像素结构信息也敏感。因此在边缘增强后图像中结合像素邻域相似度和人眼视觉感知差异来提取图像像素结构信息。依据当前像素与邻近八个像素之间的平均偏差计算像素相似度, 平均偏差越小, 相似度越大^[12]。而当前像素对于邻域像素的影响与像素之间的欧式距离相关, 两像素越近影响越大, 权重越大。因此用欧式距离来衡量两像素之间的偏差^[8], 计算公式为

$$M(m,n) = \sum_{-1 \leq k \leq 1} \sum_{-1 \leq l \leq 1} \cdot \exp \left[-\frac{\alpha^2 |g'(m,n) - g'(m+k,n+l)|}{3 \times 3} \right], \quad (12)$$

其中: 3×3 为邻近像素区域大小; $g'(m,n)$ 为当前像素点灰度值; α 为控制因子, 控制对函数的影响来保留细节平滑噪声。选取 0.01 作为步进, 0 到 1 作为范围进行实验, 通过主客观评价选择合适的参数代表, α 取 0.4。

人眼视觉感知差异 $\Delta g'(m,n)$ 表示当前像素与周围像素平均灰度 $\bar{g}'(m,n)$ 的差异, 差异越大为边缘信息概率越大。公式为:

$$\bar{g}'(m,n) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 g'(m+i,n+j), \quad (13)$$

$$\Delta g'(m,n) = g'(m,n) - \bar{g}'(m,n). \quad (14)$$

根据上述像素邻域相似度和人眼视觉感知差异提取到的图像像素结构信息, 构造出一个新的 RGB 图像函数, 公式为

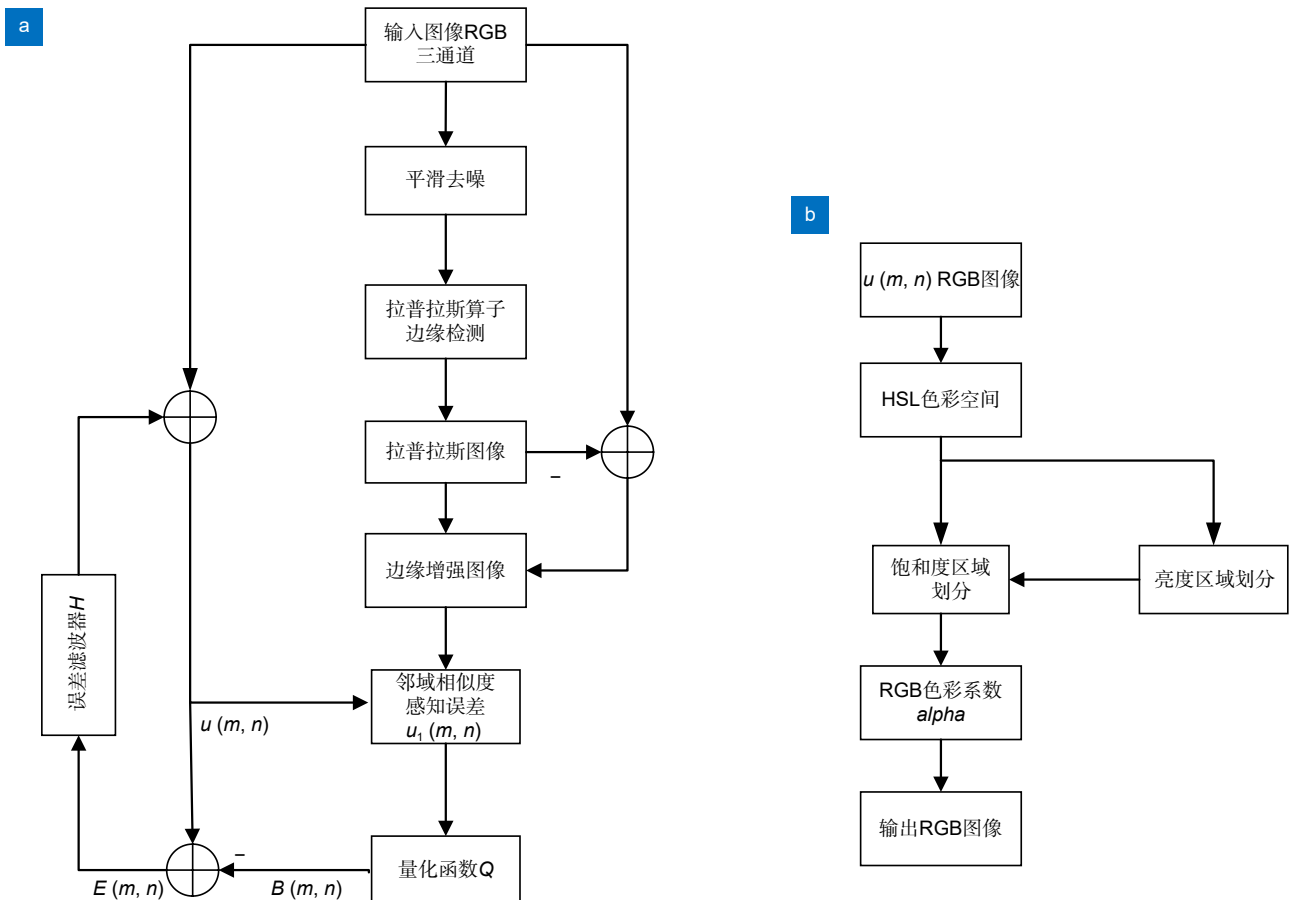


图 2 (a) 误差扩散算法流程图; (b) 图像饱和度增强流程图

Fig. 2 (a) The flow chart of error diffusion algorithm; (b) The flow chart of image saturation enhancement

$$G(m,n) = g'(m,n) + \beta \times \overline{g'}(m,n) \times \Delta g'(m,n) \times M(m,n), \quad (15)$$

式中: β 是控制调节阈值信息的系数取 0.01, $G(m,n)$ 为新的输入像素值, 记作 $u_1(m,n)$, 将 $u_1(m,n)$ 进行阈值处理得到量化后的输出像素值 $B(m,n)$, 公式为:

$$u_1(m,n) = G(m,n), \quad (16)$$

$$B(m,n) = Q\{u_1(m,n)\}, \quad (17)$$

量化前后像素值相减得到误差 $E(m,n) = F(m,n) - B(m,n)$, 利用传统误差扩散滤波器扩散到邻域像素, 整个误差扩散算法循环反馈, 最终得到一幅新的 RGB 图像 $u(m,n)$ 。

由于彩色电泳电子纸具有 16 色阶, 所以这里的量化函数的阈值区间分为 16 段, 误差扩散算法的阈值模型如式 (18)~(19) 所示:

$$B(m,n) = i - 1, \quad (18)$$

$$T_{i-1} < u_1(m,n) < T_i,$$

$$\begin{cases} T_{i-1} = 16(i-1) \\ T_i = 16i \end{cases} \quad i \in [1, 16], \quad (19)$$

其中: T_i 和 T_{i+1} 为两个可变阈值, i 依次从 1 取到 16, 对应的 256 级 RGB 图像映射到色阶为 16 级的彩色电泳电子纸上显示。

最后, 将新的 RGB 图像转换到 HSL 色彩空间, 利用了 2.3 节所述 HSL 增强饱和度算法原理, 其中 i 设置为 0.3。在 HSL 颜色空间根据图像亮度区域划分决定饱和度的区域划分, 结合亮度和饱和度构造出 RGB 色彩增长系数 $alpha$, 最后图像再转换回 RGB

颜色空间, $alpha$ 作为 RGB 三通道的增强权重, 可以用来改善图像的视觉效果。

4 仿真结果

本文从客观和主观两个角度来评价不同算法处理后的图片质量。客观上我们从 PSNR、SSIM 和 UCIQE 三个评价指标出发, 用指标数据量化不同算法处理后的图像失真度和相似度。主观上从人眼的感受出发, 分析图像的对比度、边缘清晰度和图像色彩饱和度这三个重要的视觉特征, 比较不同算法处理后的图像在这三个视觉特征上面的差异性。

本文使用了 Matlab2022 进行图像预处理实验, Lena 图和 Baboon 图作为测试图, 采用经典 Floyd-Steinberg 边缘增强误差扩散算法、Knox 边缘增强误差扩散算法^[13]、Kwak 边缘增强误差扩散算法^[14-15] 和本文算法对测试图进行图像处理。不同算法的效果图如图 3~图 7 所示, 其中局部细节图如图 4、图 5 和图 7 所示。

4.1 客观评价

为评估算法的表现能力, 实验选取 Kodak24^[16] 和 CBS68^[17] 两组彩色图像数据集。相较而言, Kodak24 图像数据集亮度更高色彩更加丰富, CBS68 图像数据集的整体偏暗淡。本文算法在 Kodak24 和 CBS68 两组彩色图像数据集上与其他误差扩散算法对比。同时采用算法后图像与参考图像之间的峰值信噪比

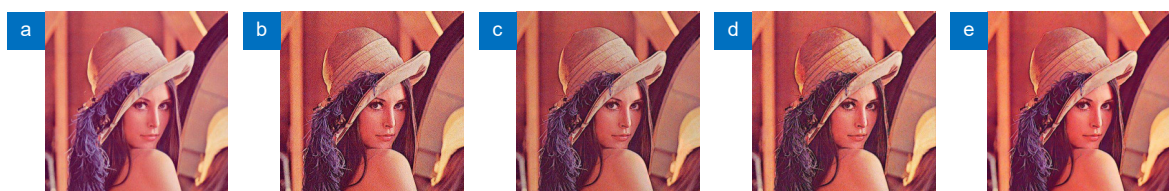


图 3 (a) Lena 原图; (b) Floyd-Steinberg 算法效果图; (c) Knox 算法效果图; (d) Kwak 算法效果图; (e) 本文算法效果图
Fig. 3 (a) Lena original image; (b) Floyd-Steinberg algorithm rendering; (c) Knox algorithm rendering; (d) Kwak algorithm rendering; (e) Algorithm rendering of this article

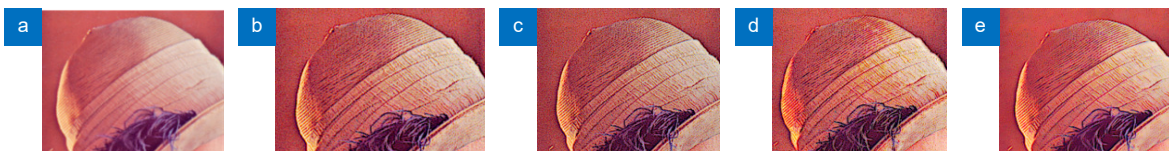


图 4 (a) Lena 原图帽子细节图; (b) Floyd-Steinberg 算法帽子细节图; (c) Knox 算法帽子细节图; (d) Kwak 算法帽子细节图; (e) 本文算法帽子细节图

Fig. 4 (a) Detailed picture of Lena's original hat; (b) Detailed picture of Floyd-Steinberg algorithm hat; (c) Detailed picture of the Knox algorithm hat; (d) Detailed picture of the Kwak algorithm hat; (e) Detailed picture of the algorithm hat of this article



图 5 (a) Lena 原图眼部细节图; (b) Floyd-Steinberg 算法眼部细节图; (c) Knox 算法眼部细节图; (d) Kwak 算法眼部细节图; (e) 本文算法眼部细节图

Fig. 5 (a) Detailed picture of Lena's original eyes; (b) Detailed picture of Floyd-Steinberg algorithm eyes; (c) Detailed picture of Knox algorithm eyes; (d) Detailed picture of the Kwak algorithm eyes; (e) Detailed picture of the algorithm eyes of this article

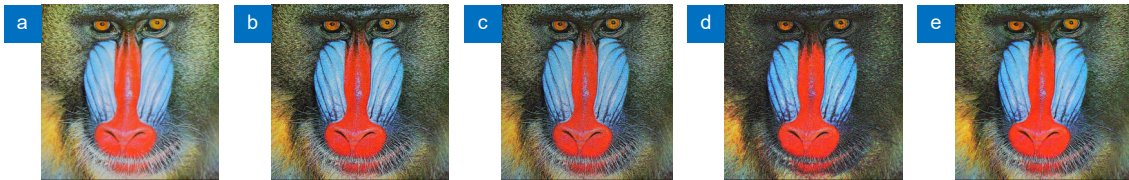


图 6 (a) Baboon 原图; (b) Floyd-Steinberg 算法效果图; (c) Knox 算法效果图; (d) Kwak 算法效果图; (e) 本文算法效果图

Fig. 6 (a) Baboon original image; (b) Floyd-Steinberg algorithm rendering; (c) Knox algorithm rendering; (d) Kwak algorithm rendering; (e) Algorithm rendering of this article

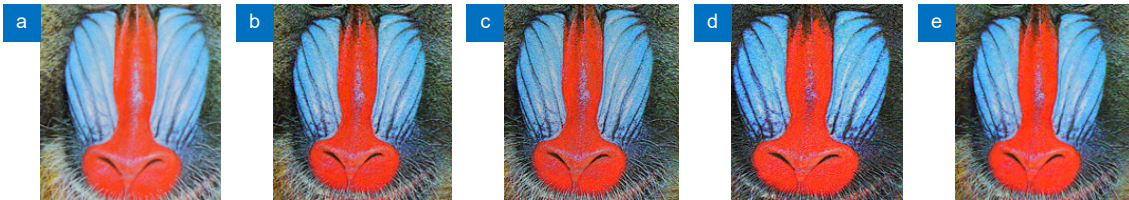


图 7 (a) Baboon 原图鼻部细节图; (b) Floyd-Steinberg 算法鼻部细节图; (c) Knox 算法鼻部细节图; (d) Kwak 算法鼻部细节图; (e) 本文算法鼻部细节图

Fig. 7 (a) Detailed picture of Lena's original nose; (b) Detailed picture of Floyd-Steinberg algorithm nose; (c) Detailed picture of Knox algorithm nose; (d) Detailed picture of the Kwak algorithm nose; (e) Detailed picture of the algorithm nose of this article

PSNR 和结构相似度 SSIM 作为图像失真性能评价指标。采用改进的水下图像评价指标 UCIQE 作为图像饱和度增强评价指标^[18]。评估结果如表 2 所示。

由于本文算法是基于 HSL 空间饱和度增强, 而信噪比和相似度主要反映图像的失真度, 不能够有效地衡量饱和度的增强效果, 只能作为本文算法的辅助评价指标。所以本文还采用了水下图像评价指标 UCIQE, 它是结合图像的色度、饱和度和对比度的线性组合, 最初作为评价水下图像的标准。主要公式为

$$UCIQE = c_1 \times \sigma + c_2 \times \text{contrast} + c_3 \times \text{saturation}, \quad (20)$$

其中: σ 、 contrast 和 saturation 分别表示色度、对比度和饱和度, c_1 、 c_2 和 c_3 表示权重系数。由于本文算法目的是增强图像的饱和度, 所以在公式中将权重系数 c_1 和 c_2 置为零, c_3 置为 1。

其中 saturation 的计算过程: 首先将 RGB 图像转换到 Lab 色彩空间, 计算图像颜色的纯度 $\sqrt{a^2 + b^2}$,

颜色的鲜艳程度 $\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{L}$; 图像平均饱和度 $\frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{L \times M \times N}$; $M \times N$ 为图像的像素大小, L 表示图像的亮度值, a 和 b 表示红绿色差、黄蓝色差。这样, UCIQE 的值反映了图像的饱和度水平。UCIQE 值越大, 说明图像的饱和度越高, 增强效果越好。

从表 2 可以看出, 在数据集 Kodak24 中经本文算法处理后图像较 Floyd-Steinberg、Knox 和 Kwak 算法处理后图像峰值信噪比分别提高了 8.0%、26.7%、10.2%。CBSD68 数据集信噪比分别提高 7.0%、23.4%、10.3%。在相似度方面 Kodak24 数据集上较其他三种算法分别提升了 22.3%、23.6%、25.5%。CBSD68 数据集相似度提升了 14.5%、13.2%、13.7%。在饱和度方面 Kodak24 数据集上较其他三种算法分别提升了 24.8%、22.5%、26.5%。CBSD68 数据集饱和度分别提升 48.2%、32.2%、31.8%。从以上数据分析中得知, 本文算法能够在保证图像的保真度的同时, 还能够提高图像饱和度。

表 2 不同边缘误差扩散增强后图像的 SSIM、PSNR 值和 UCIQE 值

Table 2 SSIM, PSNR, and UCIQE values of images after different edge error diffusion enhancements

Image datasets	Kodak24			CBSD68		
	PSNR/dB	SSIM	UCIQE	PSNR/dB	SSIM	UCIQE
Floyd-Steinberg	20.1667	0.6111	0.3205	19.8109	0.6468	0.2587
Knox	17.1841	0.6043	0.3265	17.1904	0.6538	0.2901
Kwak	19.7710	0.5996	0.3163	19.2995	0.6508	0.2909
Ours	21.7799	0.7472	0.4001	21.2150	0.7406	0.3835

4.2 主观评价

验证采用的是型号为 AC133UT1 的彩色电泳显示屏, 屏幕尺寸 13.3 英寸, 显示分辨率为 1600 像素×1200 像素, 最大屏幕刷新率为 65 Hz。实验拍摄环境在暗室中进行, 暗室设置灯光源, 灯光光源的色温为 4000 K 和亮度为 3500 cd/m²。电子纸屏幕在位移台进行固定。图 8 为本文算法处理前后图像在电泳电子纸上显示的效果图。可以看出, 人物帽体的纹理和帽子的羽毛更加清晰, 人物眼部周围细节更多。花群的原图叶子部分色彩偏黑, 增强后叶子部分更绿, 整体上图像色彩更加饱和, 细节更多。

为进一步说明算法的效果, 参考 ITU-R BT.500-14 标准^[19], 选取实验室 40 名人员进行主观评价打分。

其中男性 22 名, 女性 18 名, 年龄在 22~45 岁之间, 具有正常 (或矫正后正常) 的视力和彩色视觉。实验环境如 4.2 所述, 实验测试前向评价人员介绍测试方法、评价指标和评分等级。参考 ITU-RBT.500-14 标准定义的双刺激连续质量分级法 DSCQS, 将待评估图像序列和相应的原图交替播放给评估者看, 每个图像持续时间为 10 s, 每个图像之后有 2 s 的灰画面间隔, 评估者可在在此期间打分。

选取图像库中的人物、风景、房子等图像, 分别获取彩色电泳电子纸显示效果图, 让评价人员对图片进行主观打分实验, 计算原图和本文算法图在上屏显示的 Z 得分^[20], 得分结果如表 3 所示。根据 Z 得分情况, 充分说明了本文算法的有效性。



图 8 (a) Lena 原图显示效果图; (b) 本文算法处理后 Lena 显示效果图; (c) 花丛原图显示效果图; (d) 本文算法处理后花丛显示效果图

Fig. 8 (a) Rendering of the Lena's original image; (b) Lena display effect after the algorithm processing in this paper; (c) Renderings of the original drawings of the flowers; (d) Effect of the flowers display after the algorithm processing in this paper

表 3 不同显示效果图的 Z 得分
Table 3 Z-scores for different display renderings

Images	Z-scores	
	Before	After
Figure	-0.68	0.68
Animal	-0.69	0.69
Scenery	-0.68	0.68
House	-0.65	0.65
Plant	-0.69	0.69
Food	-0.68	0.68
Average value	-0.678	0.678

5 结论

电泳电子纸粒子主要受三种力：粒子间相互作用力、溶剂的粘滞阻力和电场力。三者之间的受力不均匀导致粒子到达公共电极时间延迟，最后电子纸显示的图像色彩饱和度低，边缘细节模糊丢失等，影响电子纸使用者的感受。目前除了器件方面的研究，图像处理技术也可以很大程度上补足一些器件性能无法解决的缺陷。本文提出基于 HSL 空间彩色电子纸边缘增强的误差扩散算法研究，通过 MATLAB 对本文算法进行仿真。结果表明，本文算法对比其他算法在信噪比 PSNR 上提高了 3.9%~26.7%，饱和度提高了 10.1%~48.2%，相似度 SSIM 提高了 13.2%~25.4%。从电子纸显示角度上，增强了图像的边缘和细节，提高了图像的清晰度和可视性，更好地保留原图的信息和色彩。墨水屏展现了更多的图像细节的部分，这些细节都得到了充分的增强。图像的色彩更加接近原图，饱和度更高。这些都给电子纸的使用者带来了更良好的视觉体验。

参考文献

- [1] Du S Y. Driving system of electronic paper display based on image enhancement technology[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2013.
杜世远. 基于图像增强技术的电子纸显示驱动系统研制[D]. 福州: 福州大学, 2013.
- [2] Huitema E, French I. E ink's technicolor moment: the road to color E-Paper took two decades[J]. *IEEE Spectr*, 2022, **59**(2): 30-35.
- [3] Kao W C, Hong K D, Hsu C Y. Color reproduction of multi-pigment color electronic papers[C]//*Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 2023: 1-2. <https://doi.org/10.1109/ICCE56470.2023.10043485>.
- [4] Kao W C, Ye J A, Chu M I, et al. Image quality improvement for electrophoretic displays by combining contrast enhancement and halftoning techniques[J]. *IEEE Trans Consumer Electron*, 2009, **55**(1): 15-19.
- [5] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale[C]//*Proceeding of the Society for Information Displays*, 1975: 75-77.
- [6] Lin X W, Lin D. Multitoning technology application in the electric paper books display optimization[J]. *Comput Syst Appl*, 2015, **24**(3): 31-37.
林夏薇, 林东. 多级半色调技术在电纸书显示优化中的应用[J]. *计算机系统应用*, 2015, **24**(3): 31-37.
- [7] Zhao J, Tang X J. A pixel error diffusion halftoning based on HVS model and edge detection[J]. *J Ningxia Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, **29**(1): 37-39.
赵静, 唐晓静. 基于HVS模型及边缘检测的像素点误差扩散半色调算法[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2008, **29**(1): 37-39.
- [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]. *Chin J Liq Cryst Disp*, 2019, **34**(3): 317-323.
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.
- [9] Wu K M, Inoue K, Hara K. Neugebauer models for color error diffusion halftoning[J]. *J Imaging*, 2020, **6**(4): 23.
- [10] Gong Y H, Tang W M, Zhou L B, et al. Quarter Laplacian filter for edge aware image processing[C]//*Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Image Processing*, 2021: 1959-1963. <https://doi.org/10.1109/ICIP42928.2021.9506503>.
- [11] Sun H X, Zhang Y H, Luo F L. Color edge detection based on HSI color space[J]. *Opt Tech*, 2009, **35**(2): 221-224, 228.
孙慧贤, 张玉华, 罗飞路. 基于HSI颜色空间的彩色边缘检测方法研究[J]. *光学技术*, 2009, **35**(2): 221-224, 228.
- [12] Lin S H, Wang J W, Shen Y F, et al. Image inpainting by neighborhood similarity[J]. *Comput Eng Appl*, 2010, **46**(7): 190-191, 220.
林胜华, 汪继文, 沈玉峰, 等. 利用邻域相似度的图像修复[J]. *计算机工程与应用*, 2010, **46**(7): 190-191, 220.
- [13] Knox K T, Eschbach R. Threshold modulation in error diffusion[J]. *J Electron Imaging*, 1993, **2**(3): 185-192.
- [14] Kwak N J, Ryu S P, Ahn J H. Edge-enhanced error diffusion halftoning using human visual properties[C]//*Proceedings of 2006 International Conference on Hybrid Information Technology*, 2006: 499-504. <https://doi.org/10.1109/ICHIT.2006.253533>.
- [15] Zeng Z, Liu G Y, Yang M Y, et al. Simulation and analysis of edge ghosting for microcapsule E-Paper based on particles dynamics[J]. *SID Symp Dig Tech Papers*, 2022, **53**(S1): 29-32.
- [16] Franzen R. Kodak lossless true color image suite[EB/OL]. 1999. <https://r0k.us/graphics/kodak/>.
- [17] Martin D, Fowlkes C, Tal D, et al. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics[C]//*Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision*, 2001. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937655>.
- [18] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2015, **24**(12): 6062-6071.
- [19] ITU-R. Methodologies for the subjective assessment of the quality of television pictures: Recommendation ITU-R BT. 500-14[S]. Geneva: ITU-R, 2019.
- [20] Mantiuk R K, Tomaszewska A, Mantiuk R. Comparison of four subjective methods for image quality assessment[J]. *Comput Graphics Forum*, 2012, **31**(8): 2478-2491.

作者简介



林珊玲 (1991-), 女, 福建泉州人, 博士, 讲师, 2020 年于福州大学获得博士学位, 主要从事主要研究新型显示技术、平板显示器驱动系统、图像处理技术等。

E-mail: sllin@fzu.edu.cn



谢欣欣 (1998-), 女, 安徽铜陵人, 2020 年于蚌埠学院获得学士学位, 主要从事电子纸显示和图像处理技术的研究。

E-mail: 1665569679@qq.com



【通信作者】林坚普 (1989-), 男, 福建泉州人, 博士, 讲师, 2019 年于福州大学获得博士学位, 主要从事主要研究图像处理、深度学习、液晶透镜器件、裸眼 3D 显示技术等。

E-mail: ljp@fzu.edu.cn



林志贤 (1975-), 男, 福建泉州人, 博士, 教授, 博士生导师, 2010 年于福州大学获得博士学位, 主要从事电子纸显示和平板显示器件驱动以及图像处理技术的研究。

E-mail: lzx2005000@163.com



郭太良 (1963-), 男, 福建莆田人, 博士生导师, 研究员, 主要从事新型显示材料与器件。

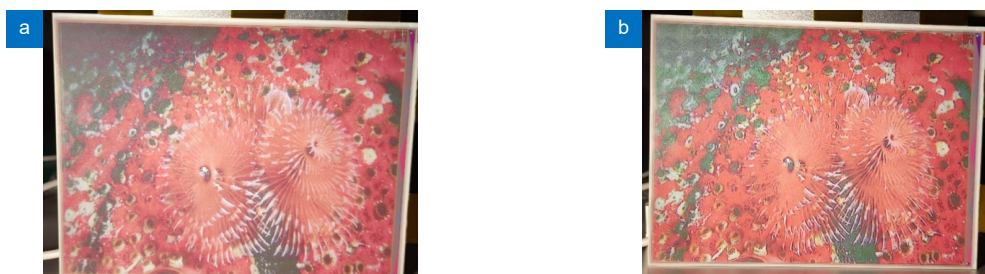
E-mail: gtl@fzu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Error diffusion optimization to enhance the saturation of colored e-paper

Lin Shanling^{1,2}, Xie Xinxin^{1,2}, Lin Jianpu^{1,2*}, Lin Zhixian^{1,2,3}, Guo Tailiang^{2,3}



(a) Renderings of the original drawings of the flowers; (b) Effect of the flower bush display after the algorithm processing in this paper

Overview: Electrophoretic display has the similar reflectance and wide viewing angle characteristics as paper, and will not harm the eyes due to the absence of a backlight. At the same time, electrophoretic display has the advantages of low power consumption and bistability, so EPD is often used for e-books, shelf price tags, and billboards. The eye protection characteristics make it deeply loved by the public, so people have more expectations for color EPD. However, there are still problems of unclear details and color distortion in the display image.

There are three main forces involved in electrophoresis particles: the interaction force between particles, the viscous resistance of the solvent, and the electric field force. The time delay of the particles reaching the common electrode is caused by the uneven force between the three factors. The low color saturation of the image and the blurred loss of edge details affect the feelings of the EPD users.

In order to solve the above problems, this paper proposes a color e-paper edge enhancement error diffusion algorithm based on HSL space to improve the display quality. This algorithm first uses an edge detection operator to obtain edge-enhanced images from denoised images. It combines edge-enhanced image pixel neighborhood average gray level, pixel and neighborhood gray level difference, and pixel neighborhood similarity to obtain new RGB image pixel value. Then, the new RGB image is processed by a threshold process to obtain a 16-level RGB image. Finally, the 16-level RGB image is converted to HSL space, and a conversion model between HSL and RGB color spaces is established. According to the brightness and saturation of the pixel, the adjustment factor is calculated to enhance the saturation of the RGB image.

The results show that compared with other algorithms, the proposed algorithm improves the PSNR by 3.9%~26.7%, the saturation by 10.1%~48.2%, and the SSIM by 13.2%~25.4%. The edges and details of the image displayed by EPD are enhanced; the clarity and visibility of the image are improved. Better preserve the information and color of the original image. The EPD shows more parts of the image detail, which are fully enhanced. The colors of the image are closer to the original and more saturated. All these have brought a better visual experience to the users of EPD.

LIN S L, XIE X X, LIN J P, et al. Error diffusion optimization to enhance the saturation of colored e-paper[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(1): 230309; DOI: [10.12086/oe.2024.230309](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230309)

Foundation item: Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFB3603705), National Natural Science Foundation of China (62101132), and Natural Science Foundation of Fujian Province (2020J01468)

¹School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou, Fujian 362251, China; ²Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou, Fujian 350116, China; ³College of Physics and Telecommunication Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China

* E-mail: ljp@fzu.edu.cn