

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于色彩空间变换的电润湿电子纸色彩校正

毛文杰, 林珊玲, 林坚普, 梅婷, 王廷雨, 蔡苾芃, 张建豪, 林志贤

引用本文:

毛文杰, 林珊玲, 林坚普, 等. 基于色彩空间变换的电润湿电子纸色彩校正[J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240226.

Mao W J, Lin S L, Lin J P, et al. Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240226.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.240226>

收稿日期: 2024-09-24; 修改日期: 2025-01-04; 录用日期: 2025-01-06

相关论文

结合色彩校正和结构信息的双路低光照图像增强

林珊玲, 陈燕, 张雪, 林志贤, 林坚普, 吕珊红, 郭太良

光电工程 2024, 51(9): 240142 doi: [10.12086/oe.2024.240142](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240142)

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

光电工程 2024, 51(1): 230309 doi: [10.12086/oe.2024.230309](https://doi.org/10.12086/oe.2024.230309)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

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



 OE_Journal



Website

基于色彩空间变换的电润湿电子纸色彩校正

毛文杰^{1,2}, 林珊玲^{1,2}, 林坚普^{1,2}, 梅 婷^{1,2},
王廷雨^{1,2}, 蔡苾芃^{1,2}, 张建豪^{1,2}, 林志贤^{1,2*}

¹福州大学先进制造学院, 福建 泉州 362252;

²中国福建光电信息科学与技术实验室, 福建 福州 350116



摘要: 电润湿电子纸采用减色混色系统进行色彩显示, 色域较小, 容易发生色彩失真, 且依赖环境光的漫反射, 亮度不足。为解决这些问题, 提出一种基于彩色电润湿的色彩空间转换和图像自适应增强算法。该算法将图像从 RGB 色彩空间转换到 HSV 空间, 并使用 CLAHE 对饱和度进行均匀分布处理, 改善色彩表现。亮度通道通过引导滤波和改进的 Retinex 算法进行增强, 保留细节与边缘信息, 使电润湿电子纸在相同光照下依旧保持真实视觉效果。实验结果表明, 该算法在 PSNR、SSIM、FSIM 和 FSIMc 上分别提高了 19%、10.8%、19.19% 和 19.54%, 显著优化电润湿电子纸的显示效果, 为其市场化应用提供有力支撑。

关键词: 彩色电润湿电子纸; 色彩空间变换; 图像增强; 直方图均衡

中图分类号: TN27

文献标志码: A

毛文杰, 林珊玲, 林坚普, 等. 基于色彩空间变换的电润湿电子纸色彩校正 [J]. 光电工程, 2025, 52(2): 240226

Mao W J, Lin S L, Lin J P, et al. Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240226

Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation

Mao Wenjie^{1,2}, Lin Shanling^{1,2}, Lin Jianpu^{1,2}, Mei Ting^{1,2}, Wang Tingyu^{1,2}, Cai Bipeng^{1,2},
Zhang Jianhao^{1,2}, Lin Zhixian^{1,2*}

¹School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou, Fujian 362252, China;

²Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Photoelectric Information, Fuzhou, Fujian 350116, China

Abstract: Electrowetting electronic paper employs a subtractive color mixing system for color display, which results in a smaller color gamut and potential color distortion. Additionally, it relies on ambient light's diffuse reflection, leading to insufficient brightness. To address these issues, this paper proposes a color space transformation and image adaptive enhancement algorithm for color electrowetting. The algorithm converts the image from the RGB color space to the HSV space, using CLAHE to evenly distribute saturation and improve color performance. The luminance channel is enhanced through guided filtering combined with an improved Retinex algorithm, preserving detail and edge information, and ensuring the electrowetting display maintains realistic visual effects under the same lighting conditions. Experimental results show that the algorithm improves PSNR, SSIM, FSIM, and FSIMc by

收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2025-01-04; 录用日期: 2025-01-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB3600603)

*通信作者: 林志贤, lzx2005000@163.com。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

19%, 10.8%, 19.19%, and 19.54%, respectively. This algorithm significantly enhances the display performance of electrowetting electronic paper, laying a solid foundation for its commercialization.

Keywords: color electrowetting electronic paper; color space transformation; image enhancement; histogram equalization

1 引言

随着新型显示技术的发展,电润湿电子纸正成为主要的发展方向,全球主流显示厂商和优势科研机构正在积极研发这种显示器件^[1-2]。电子纸显示技术因其超低功耗和在户外光环境下提供舒适阅读体验的特点,成为便携显示终端的理想选择之一。彩色电润湿电子纸利用电润湿技术,通过调节三色油墨的驱动电压,借助 TFT 电路控制每个电润湿单元格内的油墨收缩和展开,从而调节三色油墨对外部光源的反应,实现不同颜色的显示效果^[3]。然而,由于大多数图像和视频是基于 RGB 色域的,在转换到电润湿显示下的 CMY 色域时,不可避免地会出现色域变窄引起的色彩信息丢失,以及对比度和亮度下降等问题。因此,如何在 RGB 色域转换到电润湿 CMY 色域时尽可能保留图像的细节和色彩信息成为当前研究的重点^[4-8]。

在图像增强领域中,目前主要有三种主流的图像质量改善方法:第一种是直方图均衡法;第二种是基于 Retinex 理论的图像增强算法;第三种是基于色调映射的图像增强算法^[9]。Kim^[10]首先提出了改进的 BBHE 算法,解决了增强后图像亮度不均匀的问题但在色彩精确性方面仍然存在问题;Wang 等^[11]提出了 DSIHE 算法,解决了 HE 容易造成的图像信息丢失问题,但并未优化色彩的自然表现。Chen 等^[12]提出了 MMBEBHE 算法,使得亮度均值和原始图像的亮度均值最小,但在显示高饱和度图像时,细节和对比度仍存在不足;Nikolova 等^[13]提出了保留色调和动态范围的 FHRPHS 算法,较好地处理和增强色彩图像的视觉效果,但是对深色或者饱和度较低的图像的处理效果不好;Hellwig 等^[14]提出了 CIECAM02 和 CAM16 模型,通过对亮度、色度、饱和度等色彩特征的精确描述,推动了色彩感知和色适应理论在显示技术中的应用;郭媛媛等^[1]指出电润湿可采用 RGB 子像素并排排列的方式实现全彩显示,但是这会造成近 2/3 的光损失;Kuo 等^[15]在 2009 年提出了基于彩色滤光片的电润湿显示,拓展了电润湿显示器在彩色显示中的潜力,但是受到传统电润湿技术色域范围较

低的限制其色彩还原度与传统 RGB 显示器相比存在差距,而且在室内低光环境下亮度不足;随后,他们在 2010 年提出了 RGB 三色油墨的方案,成功地实现了全彩,但是在造价和色彩饱和度上仍有不足^[16];You 等^[17]随后提出了 CMY 三色油墨垂直叠加方法,实现了全彩,此时可通过控制开口率大小提升色域和提高亮度;林珊玲等^[18]提出了基于人眼视觉响应的电润湿显示亮度校正,使得图像同时符合人眼视觉特性和电润湿显示特性,但该方法依然难以解决色彩空间转换和亮度不足问题;熊铃铃等^[19]提出了改进非锐化掩模的电润湿电子纸图像自适应增强,但容易产生过度锐化的现象;万俊霞等^[20]提出了图像分割直方图均衡的图像增强,在保持亮度的同时提高对比度,但该方法处理的是灰度图像;林珊玲等^[21]在 2024 年提出了电泳电子纸的饱和度误差扩散优化,让图像细节和颜色接近原图,不过该方法仅校正了 RGB 空间下的饱和度,而且和电润湿电子纸的 CMY 油墨驱动色彩校正仍有差异;同年,他们提出了结合色彩校正和结构信息的双路低光照图像增强,使用生成对抗网络有效地恢复了图像的对比度和亮度,但是计算开销花费较大,对于电润湿电子纸这种低功耗设备来说是一个挑战^[22]。

基于以上研究,本文算法结合了传统图像增强算法和彩色电润湿电子纸的特性,提出了基于 HSV 色彩空间变换的限制对比度直方图均衡融合改进的 Retinex 图像增强算法,使得图像处理后的细节更加丰富,轮廓更加清晰,在色域不足的情况下具有较好的显示效果。

2 基于 HSV 色彩空间的色域转化和图像增强算法

本文提出了基于 HSV 色彩空间的色域转换算法,其算法流程图如图 1 所示。由于电润湿显示器显示图像的灰度与其电压控制的油墨收缩引起的电润湿像素孔径比有关,三色油墨的特性是电润湿显示不可避免需要考虑的因素。由于电润湿电子纸在色域表现上的

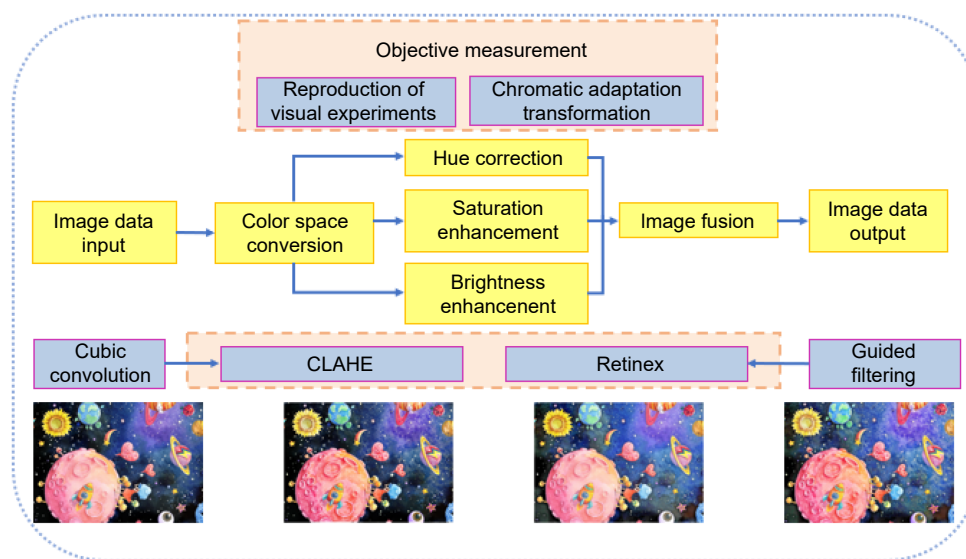


图 1 总体流程图

Fig. 1 Overall flow chart

局限性, 以及因 CMY 三色油墨带来的色彩失真问题, 本文采用了从 RGB 到 HSV 的色彩空间转换, 其中色相 H (hue) 保持不变, 提取图像的饱和度特征信息 S (saturation) 和亮度特征信息 V (value) 并分别进行处理, 以增强图像。对于饱和度特征信息 S , 根据实验获得的电压与开口率数据得到电压与色彩饱和度的非线性模型, 对图像进行基于立方卷积方法的限制对比度的直方图均衡处理; 对亮度特征信息 V 进行基于引导滤波的映射增强处理, 并对新亮度通道信息进行平滑处理, 然后对增强后的图像进行映射。这种转换使得电润湿显示图像更精准地控制颜色表现, 色彩调整过程更加灵活有效, 并且能够更好地恢复电润湿电子纸在显示真实色彩时的能力, 解决了电润湿电子纸在色彩还原和视觉表现上的主要问题。

2.1 基于电压-饱和度多项式拟合以及立方卷积的 CLAHE 算法

直方图均衡作为一种常见的全局图像增强方法, 通常通过调整全局亮度来提升图像质量。然而, 在某些场景中, 尤其是图像的局部区域中, 饱和度的分布不均会导致增强效果不理想, 出现色彩分层、色调偏移和噪声增大的问题。为了应对这些局限性, 本文引入了对比度受限自适应直方图均衡化 (CLAHE)^[23] 方法, 并针对电润湿显示器的图像特性进行了改进, 重点增强图像的饱和度表现, 如图 2 所示。具体而言, 为了使饱和度增益在图像中更加均匀地分布, 本文通过实验获得的电压与开口率关系曲线搭建电压-饱和

度多项式拟合和立方卷积的 CLAHE 算法来优化增强效果, 避免单一颜色饱和度的突发增加。这种方法通过局部对比度调节, 实现了对图像细节的保留和增强, 优化了整体的视觉效果, 特别是对于色彩再现精度要求较高的电润湿显示器而言, 能够有效改善传统直方图均衡化在局部处理上的不足。具体步骤如下:

1) 根据电压与开口率的具体关系曲线调节饱和度特征信息 S , 实现饱和度与电压的调整, 然后对图像进行限制对比度的直方图均衡处理。

2) 通过实验数据测量电润湿显示器在不同电压下的显示器的开口率 and 对应颜色饱和度值。利用这些数据, 使用多项式拟合建立一个非线性关系模型, 公式为

$$S(V_c) = a_n V_c^n + a_{n-1} V_c^{n-1} + \dots + a_1 V_c + a_0, \quad (1)$$

式中: $S(V_c)$ 表示饱和度; V_c 表示电压; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 是多项式的系数。为避免非线性转换导致的饱和度过高或过低的问题, 对转换后的饱和度进行适当的限制和平滑处理, 所选限制对比度的直方图均衡能解决局部区域过亮或者过暗的不足, 使亮度增益相对均匀地散布到所有像素上。经过计算 $S(V_c) = -0.0555 V_c^4 + 4.7886 V_c^3 - 154.2708 V_c^2 + 2201.5036 V_c - 11701.0612$ 。

3) 由于限制对比度的直方图均衡将图像划分为 64 个小块, 每一个小块是独立进行直方图统计和归一化处理的, 这可能导致小块之间的边界出现块效应。为此, 需要通过插值技术来平滑这些边界。在过去, 线性插值被广泛使用, 为了进一步提升图像的平滑性, 人们提出了双线性插值的方法。然而, 这仍然

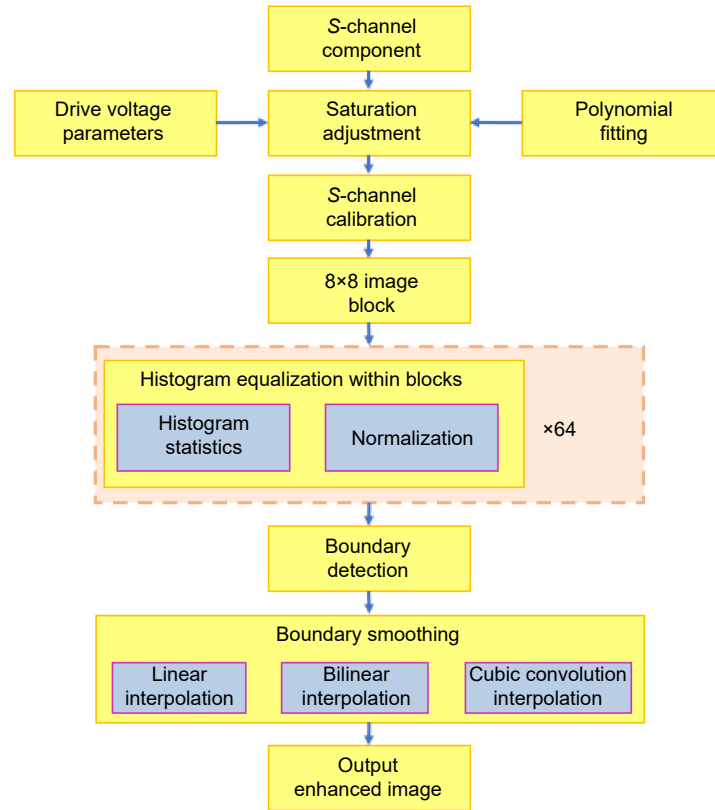


图 2 S 通道处理流程

Fig. 2 S-channel processing flow

可能导致图像边界出现灰度不一致的问题。因此, 本文使用立方卷积插值法^[24]改进均衡效果, 这种方法利用分数像素点周围 4×4 的整型点像素值来计算新像素值, 通过判断每一个小块所处的位置是最外围边界 28 个块还是中间区域的 36 个块进行不同的插值算法, 从而实现更加平滑的图像过渡并且保留更好的边缘信息。具体算法如下:

利用插值函数 $\text{sinc}(x)$ 三次逼近结果, 对图像的像素点进行插值, 三次逼近结果为

$$S(x) = \begin{cases} 1 - 2 \times |x|^2 + |x|^3, & |x| \leq 1 \\ 4 - 8 \times |x| + 5 \times |x|^2 - |x|^3, & 1 < |x| < 2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

目标像素的灰度值由窗口中心临近 16 个像素点的加权值得到:

$$g(x', y') = ABC, \quad (3)$$

$$A = [S(1+b) S(b) S(1-b) S(2-b)], \quad (4)$$

$$C = [S(1+a) S(a) S(1-a) S(2-a)]^T, \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} f_{-1,-1} & f_{-1,0} & f_{-1,1} & f_{-1,2} \\ f_{0,-1} & f_{0,0} & f_{0,1} & f_{0,2} \\ f_{1,-1} & f_{1,0} & f_{1,1} & f_{1,2} \\ f_{2,-1} & f_{2,0} & f_{2,1} & f_{2,2} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $g(x', y')$ 是通过立方卷积得到的目标插值点的像素值; x' 和 y' 是卷积处理的浮点坐标; A 和 C 是对插值点的水平和垂直方向进行权重计算的结果; a 和 b 是目标插值点在 x 轴和 y 轴上离其邻域像素点的相对距离; B 是包含 16 个像数值的邻域矩阵; $f_{i,j}$ 表示以插值点为中心的相邻像素值; i 和 j 表示图像中的像素坐标。最后, 合并所有小块得到增强后的图像。

2.2 基于引导滤波的改进 Retinex 图像增强

在印刷纺织等人眼观察非自发光事物的图像处理中, Retinex 理论在图像增强技术中得到了广泛应用^[13,25]。如下图 3 所示, 观察者所看到的物体的图像是由物体表面对入射光 L 反射得到的, 反射分量 R 由物体本身决定, 不受入射光 L 变化。而电润湿电子纸的色彩表现主要依赖于油墨材料的反射特性, 而非环境光的绝对强度。因此, 在不同光照条件下, 电润湿电子纸可以保持较为稳定的显示效果, 避免了光照变化对色彩呈现的影响, 符合颜色恒常性的原则。

为了改进电润湿电子纸的显示效果, 本文对传统 Retinex 算法进行了优化, 如图 4 所示。鉴于电润

湿电子纸对图像边缘细节有较高要求且功耗限制较严, 本文选择了引导滤波^[26]作为改进方案。引导滤波相比双边滤波具有更高的计算效率, 其适用于电润湿电子纸这种低功耗、对细节要求严格的应用场景。在实验设计中, 本文通过引导图中提取的标准色度信息, 采用引导滤波精确调整图像的色彩表现。具体实验步骤包括: 首先, 通过色度计获取标准色卡信息; 接着针对液晶显示器色彩特性进行色彩映射和微调, 从而生成标准色卡三刺激值的引导图; 之后获取引导图的窗口均值、方差从而进行光照分量估计; 最后, 计算反射成分并对数反变换来实现图像增强。

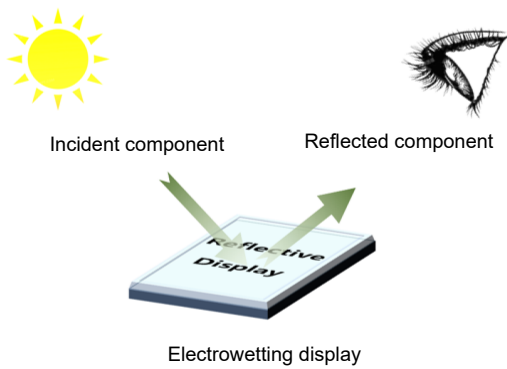


图3 Retinex 算法在电润湿显示屏上的反射原理
Fig. 3 Reflection principle of Retinex algorithm on electrowetting display

为实现不同色域图像在跨媒体设备间的精确传输^[27-30], 同时为上文提到的引导滤波提供符合人眼视觉特性的引导图, 本文根据 IEC 标准^[31], 所有显示和测量操作在暗室内进行, 测量设备 CS-200 的物镜需水平且垂直对准液晶显示屏的中央显示区域, 测量距离设定为 $d=60$ cm (即大于屏幕高度的两倍)。所使用的样本数据来源于德塔公司生产的 ColorChecker 标准 24 色卡和标准白板 (ColorChecker white balance)。操作示意图如图 5 所示。

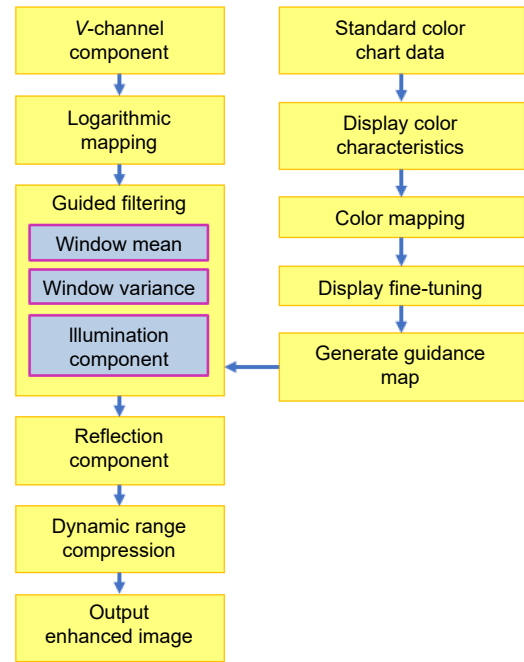
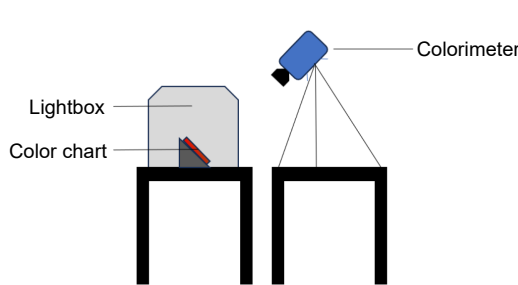


图4 V通道处理流程
Fig. 4 V-channel processing flow

根据拍摄的色卡数据, 使用 CalMAN 对显示器的 RGB 输出进行逐色调整, 并将其加载至系统中以自动调整显示器输出; 由于拍摄显示器显示的图像参考了真实的色彩和亮度分布, 实现更自然和准确的图像效果, 获得真实的色彩反映。这些色彩反映将作为引导滤波的引导图。其中引导滤波的公式如下:

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I) p_j, \quad (7)$$

$$q_i = a_k I_k + b_k, \quad \forall i \in W_k, \quad (8)$$

$$a_k = \frac{\frac{1}{|W|} \sum_{i \in W_k} I_i p_i - \mu_k p_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (9)$$

$$b_k = \overline{p_k} - a_k \mu_k, \quad (10)$$

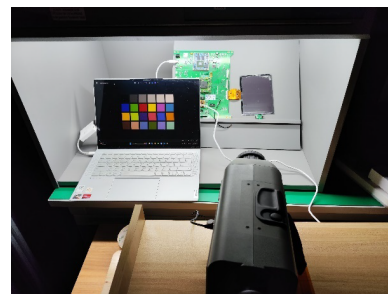


图5 色卡拍摄环境示意图与实际环境

Fig. 5 Color chart shooting environment diagram and actual environment

式中: p 为原始图; 引导图为 I ; 输出图为 q ; i 和 j 为图像中像素点的索引; ϵ 为 L2 范数正则化系数; μ_k 和 σ_k 分别为 I_k 在窗口 W_k 的均值和标准差; $|w|$ 为窗口像素块总数, 此处为 256; $\bar{p}_k$ 为窗口内输入图像 p 的均值。

3 结果与分析

3.1 主观评价

比较 MEMBHE、MMBEBHE 和 FHRPHS 算法, 得到如图 6 所示的处理结果。第 1 张图 (Planet) 选择了色域变换过程中容易色彩失真严重的复杂彩色图, 第 2 张图 (Dog) 和第 3 张图选择了环境较暗的真实图, 第 4 张图和第 5 张图 (Street) 选择了对比度相似的图

像, 第 6 张图片选择了边缘细节信息较难看出来的风景图。对比图 6(a) 和图 6(b), 可以看到图像的色彩出现了明显的失真, 诸如 Planet 中左下粉色星球和左上黄色星球出现了明显的颜色变化, 其放大图可以看到图像出现大量的噪声点。对比图 6(b) 和图 6(c), 后者的噪声点信息有明显的降低, 但是颜色仍然失真较为严重。对比图 6(a) 和图 6(d), 亮度有明显的增强, 但是代价是整体的对比度信息不变引起的图像整体过饱和。对比图 6(a) 和图 6(e), 可以看出主要的色彩信息保留不变, 并且显示了更多的图像细节, 如 Planet 陨石坑的边缘信息更加具体, 图 6(e) 的 Dog 相比于图 6(b) 和图 6(c), 没有过亮的色彩信息, 且相比于图 6(d) 对眼睛和毛色的细节信息保留更好。

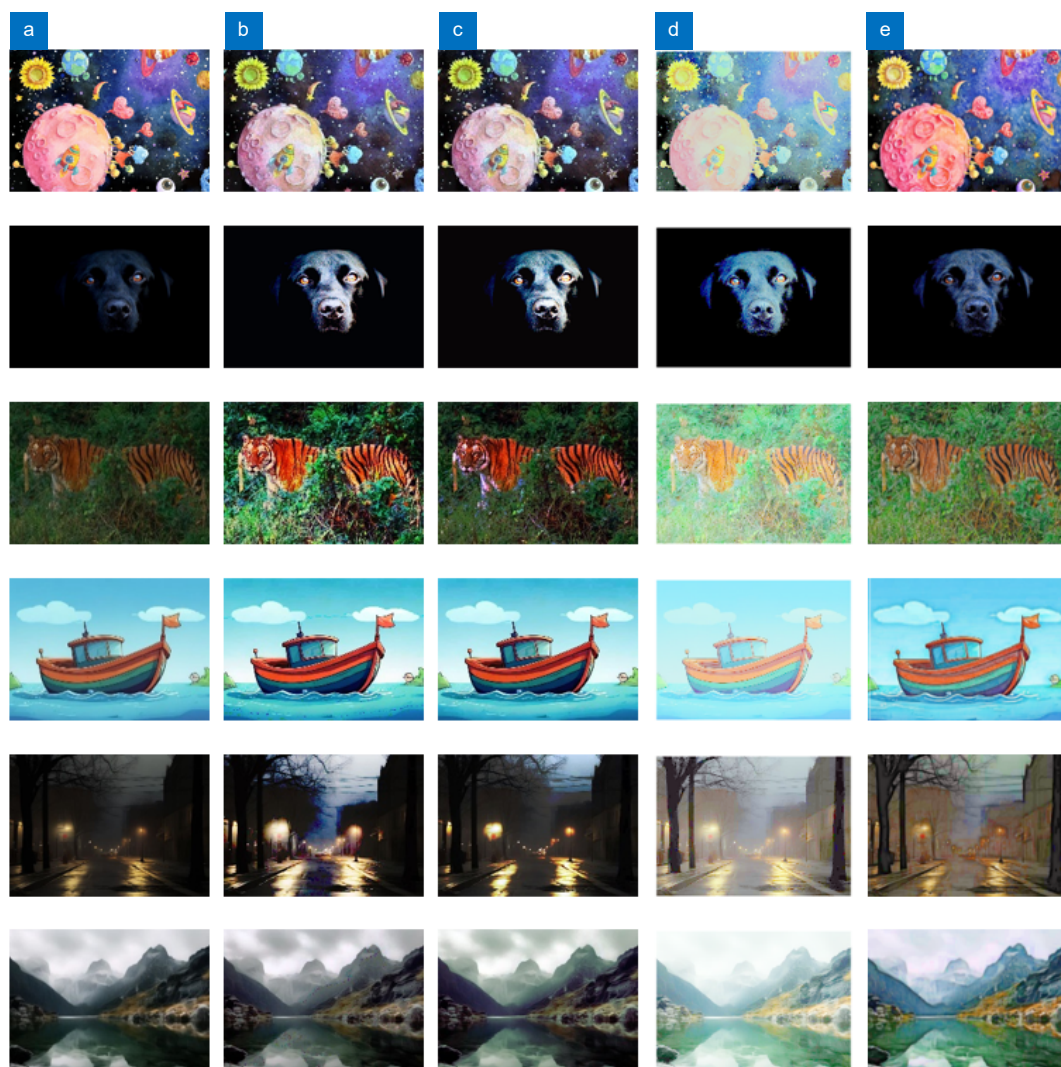


图 6 比较不同算法处理前后的图像效果。(a) 原始 RGB 图像; (b) MEMBHE 算法; (c) MMBEBHE 算法; (d) FHRPHS 算法; (e) 本文算法

Fig. 6 Compares the image effects before and after processing by different algorithms. (a) Original RGB image; (b) MEMBHE algorithm; (c) MMBEBHE algorithm; (d) FHRPHS algorithm; (e) Ours

3.2 统计实验

本文采用视觉匹配法进行主观评价, 在制定电润湿电子纸显示质量评价的过程中有如下几条选取建议: 1) 高、中、低亮度的图像; 2) 高、中、低饱和度的图像; 3) 高、中、低对比度的图像。为了保证所选图案在电润湿显示的 CMY 色域范围内, 本文测试了 11 个由 CIE 推荐用于色差评估的色块图像。首先将匹配显示器校准到 6500 K, 并完成校准操作; 选取 10 名色觉正常、视力均在 1.0 以上的观察者, 男女各 5 名且具有一定的色度学知识。通过双目观察匹配实验评价 11 幅图像在灯箱光源照明下颜色的视觉匹配程度。基于成对比较的心理物理学视觉评估方法得到的原始实验数据不属于等距量表, 采用 Thurstone 比较判断法, 将这些数据转换为符合标准正态分布的等距量表 Z-score^[20]。这些 Z-score 数值体现了修改图像色彩参数的复现与电润湿显示的接近程度, 数值越大表示其颜色的复现性能越优。根据表 1 的得分情况, 可以看出本文算法的有效性。

表 1 不同显示效果图的 Z-score
Table 1 Z-scores for different display renderings

Images	Z-scores	
	Before	After
Image 1	-0.53	0.53
Image 2	-0.72	0.72
Image 3	-1.74	1.74
Image 4	-0.84	0.84
Image 5	-0.36	0.36
Image 6	-0.51	0.51

为了分析数据的有效性, 本文采用数据拟合度的卡方检验。根据频率矩阵 p_{ij} 通过标准正态分布函数转化为 Z-score 矩阵本实验中显著性水平 $\alpha=0.05$, 若 χ^2 小于卡方检验量 χ^2_{α} , 则认为数据与理论预期没有明显差异。

由表 2 可见, 所有卡方值 χ^2 均小于临界值 $\chi^2_{0.05}=7.814$, 因此都通过了卡方拟合度检验, 可知本实验的数据结果是有效的。置信区间为

$$CI_{95\%} = \pm 1.96 \times \frac{1}{\sqrt{2m}}, \quad (11)$$

式中: m 是观察者人数, 计算得到为本实验结果置信区间为 0.438。

3.3 客观评价

本文除了使用常规图像处理的熵 (H)、峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 来评估图像的质量外, 还引入了交叉熵 (cross entropy, CE) 和特征相似性 (feature similarity index, FSIM) 及其颜色版本 FSIMc 作为补充评价指标。

3.3.1 交叉熵 CE

交叉熵用来衡量像素级或类别级预测与真实标签之间差异的损失函数。具体表现为反映两幅图像的差异, 如果交叉熵越小, 则融合图像和原图像的差别越小, 交叉熵的损失可以表示为

$$Loss = -\frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^K y_{u,v} \log(\hat{y}_{u,v}), \quad (12)$$

式中: N 是图像中所有像素的总数; K 是类别的数量; u 表示图像中第 u 个像素的索引; v 表示第 v 个类别的索引; $y_{u,v}$ 是像素 u 属于类别 v 的真实分布; $\hat{y}_{u,v}$ 是模型对像素 u 属于类别 v 的预测概率。

3.3.2 特征相似性 FSIM 和 FSIMc

该指标考虑人类视觉系统的特征, 特别是对边缘和纹理等显著特征的敏感性。主要利用图像的相位一致性和梯度幅度来评估相似性, 这与人类感知图像的方式相符, 这两指标主要基于两个关键特征: 相位一致性和梯度幅度。相位一致性是一个局部图像特征度量, 表示图像局部频率分量的相位一致程度。相较于幅度信息, 相位信息在人类视觉系统中更为重要, 因为它对视觉感知中的边缘和纹理有很大的贡献。梯度幅度反映了图像中的强度变化情况, 是边缘检测的重要工具。公式为

$$PCSim = \frac{2 \times PC_1 \times PC_2 + T_1}{PC_1^2 + PC_2^2 + T_1}, \quad (13)$$

$$GMSim = \frac{2 \times GM_1 \times GM_2 + T_2}{GM_1^2 + GM_2^2 + T_2}, \quad (14)$$

$$FSIM = \frac{\sum (PCSim \times GMSim \times W)}{\sum W}, \quad (15)$$

$$S_c(x) = \frac{2 \times C_1(x) \times C_2(x) + T_3}{C_1^2(x) + C_2^2(x) + T_3}, \quad (16)$$

$$FSIMc = \frac{\sum_x (PCSim(x) \times GMSim(x) \times S_c(x) \times W)}{\sum_x W(x)}, \quad (17)$$

式中: PC_1 和 PC_2 是两幅图像的相位一致性值; GM_1 和 GM_2 是它们的梯度幅度; T_1 和 T_2 是用于稳定计算的小常数; W 是相位一致性用于加权的因子; $C_1(x)$ 和

$C_2(x)$ 分别表示两幅图像在位置 x 处的色度值; T_3 是一个用于避免分母为零的小常数; $S_c(x)$ 是色彩相似性; $W(x)$ 是基于相位一致性的权重。

本文采用上述 6 个评价指标对不同类别的 50 副图像进行评估, 评估结果如表 3 所示。

通过对 50 张图片进行客观指标评价对比, 从表 3 可以看出, 本文提出的色彩增强算法的图像信息熵相比于其他三种算法分别增强了 27.4%、31.4%、4.0%。虽然与 FHRPHS 的信息熵相比, 其提升幅度不大, 但是从与原图的交叉熵来看, 本文算法的交叉熵仅为 0.1161, 而 FHRPHS 算法的交叉熵为 0.700, 降低了 83.4%。说明本文算法的图像信息熵的有效信息远比 FHRPHS 的有效信息多。后者的信息熵增量有可能部分是算法带来的冗余噪声引起的。同时可以看出, 在 PSNR 与 SSIM 评价指标中是本文算法最优, 其中本文算法的 PSNR 相比于其他算法 (MEMBHE、MMBEBHE 和 FHRPHS 算法) 提高了 17.2%、17.7%、19.0%; 从结构相似性 SSIM 来看, 本文算法相比于

其他三种算法分别提升了 67.7%、72.1%、10.8%, 本文算法增强后的图像与原始图像相似度最高; FSIM 和 FSIMc 是本文相比于其他反射式电子纸新引入的评价指标, 更能体现本文算法对人眼视觉的优异之处, 可以看出本文算法的 FSIM 和 FSIMc 比其余算法表现好, 验证了本文算法尽可能的还原了人眼对图像信息的感知。

3.4 消融实验

在本节中, 本文对算法中的 S 通道处理和 V 通道处理进行消融实验, 并对每一步的实验结果进行验证。以 Planet 为例, 消融实验后的对比图如图 7 所示。可以看出, 直接将 RGB 转为 CMY 后, 出现了因为色域变窄带来的部分区域对比度降低, 以及颜色整体亮度有略微下降的问题。在图 7(c) 中进行了仅 V 通道的改良 Retinex 图像增强, 可以看到主星球的颜色不变的前提下, 背景星空明显变亮, 可以看见一些暗淡的星星。但是在电润湿显示上, 由于灰阶的限制, 一

表 2 不同图像视觉信息的 χ^2 检验结果
Table 2 χ^2 test results of visual information from different images

χ^2 test results	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4	Image 5	Image 6
HB	1.1579	0.7869	0.0382	0.9542	0.1428	0.6567
MB	0.1891	0.0429	0.3323	0.2242	0.5980	0.1663
LB	1.1647	1.0190	0.0554	0.5877	1.1517	0.1792
HS	1.1486	1.1208	0.1166	0.5347	0.4085	0.3090
MS	0.5825	0.8145	0.9881	0.7756	0.7023	1.0089
LS	0.9603	0.9093	0.8338	0.8512	0.2686	0.3051
HC	0.1703	0.8918	0.3805	0.9056	0.9015	0.9771
MC	0.5061	0.4707	1.1403	0.3312	0.3061	0.2922
LC	1.0989	0.7866	0.0413	0.8156	0.6071	1.1151
OR	0.9506	0.2054	0.5265	0.7861	0.8389	0.4200
PR	1.1514	0.8473	0.4579	0.1951	1.0691	0.2359

表 3 不同算法处理后图像的 H、CE、PSNR、SSIM、FSIM 和 FSIMc 值
Table 3 H, CE, PSNR, SSIM, FSIM, and FSIMc values of images processed by different algorithms

Algorithm	H	CE	PSNR	SSIM	FSIM	FSIMc
Original	1.7981	—	—	—	—	—
MEMBHE	1.9607	12.2554	60.1529	0.4997	0.7908	0.7896
MMBEBHE	1.9004	16.9650	59.9130	0.4867	0.7903	0.7890
FHRPHS	2.3987	0.7000	59.2433	0.7559	0.7055	0.7027
Ours	2.4978	0.1161	70.5047	0.8378	0.8409	0.8400



图 7 不同消融实验前后图像效果的比较。(a) RGB 原始图像; (b) 直接映射的 CMY 图像; (c) 仅进行 V 通道处理的图像; (d) 仅进行 S 通道处理的图像; (e) 本文处理算法

Fig. 7 Comparison of image effects before and after different ablation experiments. (a) RGB original image; (b) Directly mapped CMY image; (c) V -channel processed image only; (d) S -channel processed image only; (e) Ours

些细节边缘被视为同灰阶而被抹除。在图 7(d) 中, 仅进行了 S 通道的改良 CLAHE 处理, 可以看到星球的陨石坑细节被强调出来, 但是整体背景偏暗在电润湿显示不明显。图 7(e) 是采用本文算法得到的结果, 可以看出经过二者的图像融合后, 有效结合了两种算法在电润湿显示的优异之处, 使得图像信息虽然在 RGB 显示与原图有出入, 但是在色域较小亮度较低的电润湿电子纸上能够有效的保留图像的细节和色彩信息。

4 样机实验结果分析

为了验证算法的可行性, 本文搭建了如图 8 所示的实验环境, 显示器面板为 648×480 , 灰度为 64, 暗室环境中选择 D65 光源, 使用固定机位拍摄显示电润湿显示面板。图 9 为色温 6500 K 下的电润湿电子纸的原始图和算法对图像改良之后的结果对比, 可以看见原图像整体偏暗, 这是由于电润湿电子纸反射式显示以及其外部的玻璃屏幕降低了部分的反射光。

4.1 实验结果分析

采用本文算法处理图像, 可以看出图 9(b) 中图像的色彩信息相比较于原始在液晶显示屏上亮度有明显的降低, 同时色彩的饱和度也相对下降了。如图 9(c) 和图 9(d) 中第一幅图 Planet 是看不见周边的星辰以及岛左边的彩虹的。但经过本文算法 (V 通道的改良 Retinex 算法) 处理后, 能十分清楚地看见星辰 (如图 9(d) 所示)。同时, 由于对图像的饱和度进行了限制对比度的直方图均衡, 边缘也得到了很好的保留。彩虹细节在原本的液晶显示屏上就属于微小的细节, 在电润湿显示中被忽略掉了, 但是经过本文图像增强算法处理后, 它的彩虹纹理清晰再现。图 9(a) Dog 图像为一张低亮度且低对比度的图像, 原本肉眼看上去是将近全黑的, 在相机拍摄下才可见的狗的轮廓, 但是

在图 9(d) 中可以看到, 经 CLAHE 算法处理后 Dog 的脸部整体和背景可以清楚的分离出来耳朵和眼眶细节也能清楚的看到, 并且由于采用了引导滤波, 能较好地保留 Dog 眼睛原本的色彩, 整体看过去更符合人眼视觉对 Dog 的主观印象。图 9(a) Street 图像同样也是较暗的环境, 可以看出在电润湿电子纸本身反射特性引起的颜色偏暗情况下几乎是灰暗的一个整体。通过本文图像增强算法改良后得到图 9(b), 其远处的建筑清晰可见, 也能看到原图中与背景几乎融为一体的远处的路灯, 同时经过限制对比度算法处理后最上边的树枝也清晰的显示了出来。综合来看, 本文算法通过色彩空间变换和对比度以及亮度的增强, 有效还原了电润湿显示的色彩和图像细节。

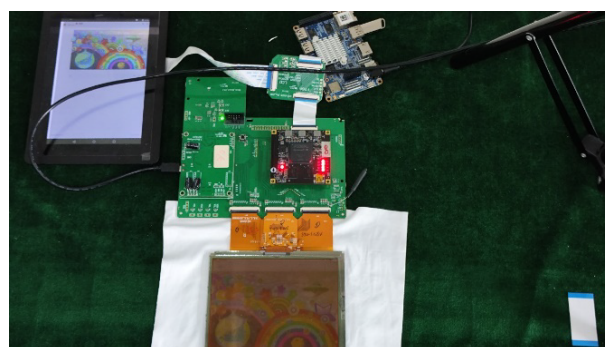


图 8 实验环境

Fig. 8 Experimental environment

4.2 资源消耗和运行速度

在 Vivado 环境中对该算法进行了硬件实现^[32], 并得到了系统的硬件资源消耗情况 (如表 4 所示), 设置分辨率为 648×480 , 帧率为 60 f/s, 原本的 Matlab 算法运算速度为 5.604 s, 其他三种算法运行时间分别为 4.6713 s、2.8522 s、3.1637 s。可以看出本文的系统相比于其他算法运算量略大。为了符合轻量化和低功耗的设计要求, 转化为硬件资源后消耗较少, 用

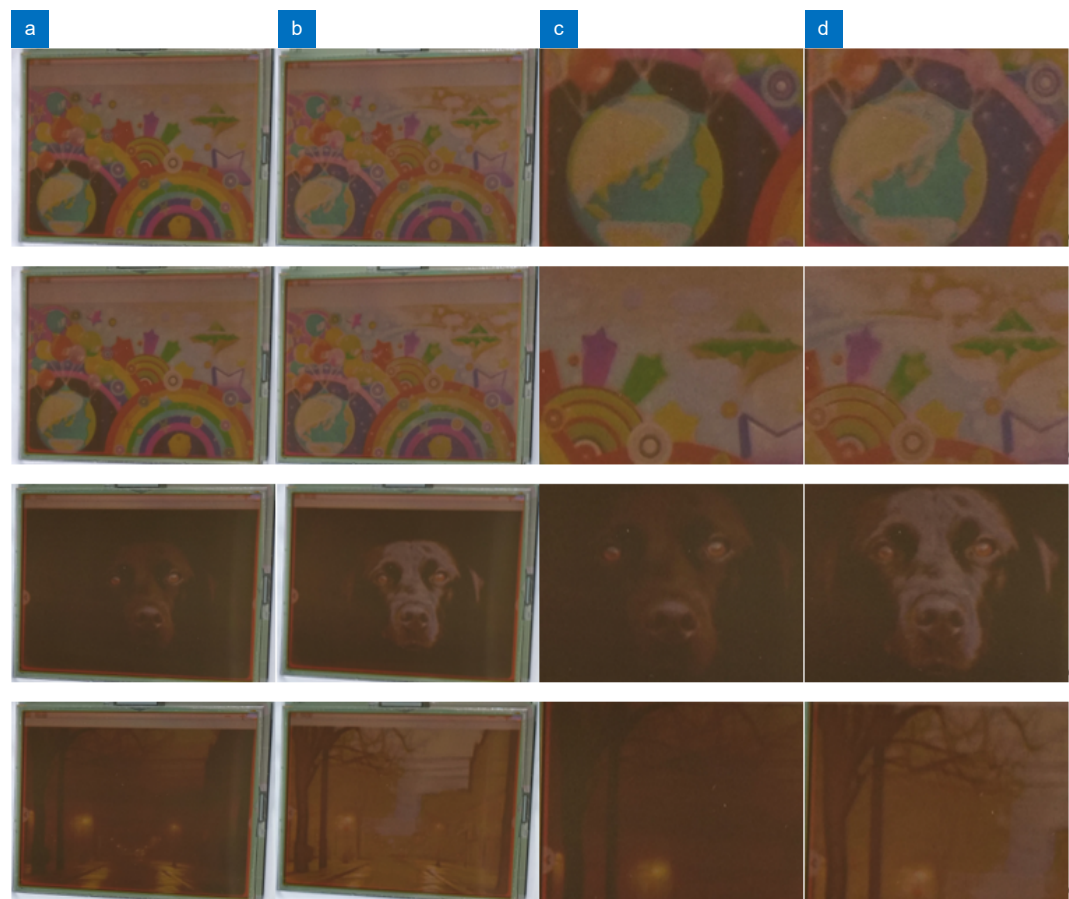


图 9 彩色电润湿显示器显示效果对比图。(a) 原始图; (b) 所提算法处理后的图; (c) 局部放大原始图; (d) 局部放大处理后的图

Fig. 9 Comparison of the display effect on the color electrowetting display. (a) Original image; (b) Image processed by the proposed algorithm; (c) Local magnification of the original image; (d) Local magnification of the processed image

表 4 系统资源消耗对比

Table 4 Comparison of system resource consumption

	LUT	LUTRAM	FF	BRAM	DSP	BUFG
Software to HLS	208650	12787	129549	43	77	1
Hardware	57252	11442	43729	32	19	2

Modelsim 进行仿真测试后, 在 25 MHz 的时钟频率下, 可以实现每帧 16.2 ms 的处理速度, 满足 60 f/s 的图像传输。且从表 4 可以看出, 如果先将模型和方法在软件平台实现, 再通过 HLS 工具转化为硬件描述语言, 虽然这种方法易于验证, 但在效率优化方面存在一定局限性。相比之下, 直接将算法用硬件描述语言实现, 可以将资源消耗降低到原来的 27.4%, 此外直接使用硬件描述语言进行优化, 能够通过设计流水线、提高并行度、资源共享和内存访问等方式, 进一步提升系统效率。

5 结 论

电润湿电子纸由于其油墨收缩的阈值限制以及电荷捕获带来的接触角滞后问题, 引起显示图像色域变窄、颜色融合以及边界信息不明显, 这一直是电润湿显示的主要问题。针对这些问题, 本文提出了通过色彩空间转换提取图像的饱和度和亮度信息, 并结合人眼对图像的感知判断, 有效地解决了在色域转换过程中可能导致的色彩失真及细节丢失问题。实验结果表明, 该方法不仅改善了图像的整体对比度, 还在保持边缘和细节的同时, 提升了色彩的饱和度和自然性。

在与传统增强算法的比较中, 本方法显示出更优的视觉效果和细节保留能力, 特别适用于电润湿电子纸反射式显示技术下的图像处理。此外, 这种改进还有助于减少视觉疲劳, 提高阅读和观看的持久性, 尤其是在较长时间的使用过程中, 视觉舒适度的提升显著增强了设备的实用性和用户的满意度。但是本算法的参数选择与优化仍依赖于实验测试数据以及主观经验, 未来可以探索更加智能化和自适应的参数调节方法。

参考文献

- [1] Guo Y Y, Jiang H W, Yuan D, et al. Progress in electrowetting display materials and device technology[J]. *Chin J Liq Cryst Disp*, 2022, **37**(8): 925–941.
郭媛媛, 蒋洪伟, 袁冬, 等. 电润湿显示材料与器件技术研究进展[J]. *液晶与显示*, 2022, **37**(8): 925–941.
- [2] Bu Q Q, Wang D, Qiu Y, et al. Progress of reflective display technology[J]. *Chin J Liq Cryst Disp*, 2019, **34**(2): 169–176.
卜倩倩, 王丹, 邱云, 等. 反射显示技术的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2019, **34**(2): 169–176.
- [3] Qian M Y, Lin S L, Zeng S Y, et al. Real-time dynamic driving system implementation of electrowetting display[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(6): 180623.
钱明勇, 林珊玲, 曾素云, 等. 电润湿电子纸的实时动态显示驱动系统实现[J]. *光电工程*, 2019, **46**(6): 180623.
- [4] Chen M Z, Lin S L, Mei T, et al. Research on hydrodynamic characteristics of electronic paper pixels based on electrowetting[J]. *Micromachines*, 2023, **14**(10): 1918.
- [5] Ma X, Yu C Y, Chen G, et al. Adaptive gamma correction of subregion for non-uniform illumination image enhancement[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2024, **61**(14): 1437006.
马鑫, 喻春雨, 陈刚, 等. 分区自适应伽马校正的非均匀光照图像增强[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, **61**(14): 1437006.
- [6] You D Z, Tao J T, Zhang Y P, et al. Low-light image enhancement based on gray scale transformation and improved retinex[J]. *Infrared Technol*, 2023, **45**(2): 161–170.
游达章, 陶加涛, 张业鹏, 等. 基于灰度变换及改进 Retinex 的低照度图像增强[J]. *红外技术*, 2023, **45**(2): 161–170.
- [7] 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]. *Chin J Liq Cryst Disp*, 2024, **39**(1): 32–39.
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.
- [8] Chen M Z, Lin S L, Lin J P, et al. Adaptive enhancement display of chromatic electrowetting based on color conversion[J]. *IEEE Access*, 2024, **12**: 2389–2397.
- [9] Wang H, Zhang Y, Shen H H, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. *Chin Opt*, 2017, **10**(4): 438–448.
王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. *中国光学*, 2017, **10**(4): 438–448.
- [10] Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization[J]. *IEEE Trans Consumer Electron*, 1997, **43**(1): 1–8.
- [11] Wang Y, Chen Q, Zhang B. Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method[J]. *IEEE Trans Consumer Electron*, 1999, **45**(1): 68–75.
- [12] Chen S D, Ramli A R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement[J]. *IEEE Trans Consumer Electron*, 2003, **49**(4): 1310–1319.
- [13] Nikolova M, Steidl G. Fast hue and range preserving histogram specification: theory and new algorithms for color image enhancement[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2014, **23**(9): 4087–4100.
- [14] Hellwig L, Fairchild M D. Brightness, lightness, colorfulness, and Chroma in CIECAM02 and CAM16[J]. *Color Res Appl*, 2022, **47**(5): 1083–1095.
- [15] Kuo S W, Chang Y P, Cheng W Y, et al. Novel development of multi-color electrowetting display[J]. *SID Symp Dig Tech Pap*, 2009, **40**(1): 483–486.
- [16] Kuo S W, Lo K L, Cheng W Y, et al. Single layer multi-color electrowetting display by using ink jet printing technology and fluid motion prediction with simulation[J]. *SID Symp Dig Tech Pap*, 2010, **41**(1): 939–942.
- [17] You H, Steckl A J. Three-color electrowetting display device for electronic paper[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, **97**(2): 023514.
- [18] Lin S L, Li T T, Zeng S Y, et al. Nonlinear correction method of electrowetting display brightness based on human visual system[J]. *Acta Photonica Sin*, 2019, **48**(8): 0812004.
林珊玲, 李甜甜, 曾素云, 等. 基于人眼视觉的电润湿电子纸显示器亮度非线性校正方法[J]. *光子学报*, 2019, **48**(8): 0812004.
- [19] Xiong L L, Lin S L, Lin Z X, et al. Improved image adaptive enhancement algorithm for electrowetting electronic paper[J]. *Appl Electron Tech*, 2021, **47**(11): 76–80.
熊铃铃, 林珊玲, 林志贤, 等. 改进电润湿电子纸图像自适应增强算法[J]. *电子技术应用*, 2021, **47**(11): 76–80.
- [20] Wan J X, Lin S L, Mei T, et al. Image enhancement algorithm of electrowetting display based on image segmentation and dynamic histogram equalization[J]. *Acta Photonica Sin*, 2022, **51**(2): 0210005.
万俊霞, 林珊玲, 梅婷, 等. 基于图像分割和动态直方图均衡的电润湿显示器图像增强算法[J]. *光子学报*, 2022, **51**(2): 0210005.
- [21] 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.
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.
- [22] Lin S L, Chen Y, Zhang X, et al. Dual low-light images combining color correction and structural information enhance[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(9): 240142.
林珊玲, 陈燕, 张雪, 等. 结合色彩校正和结构信息的双路低光照图像增强[J]. *光电工程*, 2024, **51**(9): 240142.
- [23] Fahnestock J D, Schowengerdt R A. Spatially variant contrast enhancement using local range modification[J]. *Opt Eng*, 1983, **22**(3): 223378.
- [24] Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. *IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Process*, 1981, **29**(6): 1153–1160.
- [25] Luo H, Zhong J J, Li X. Single color image enhancement algorithm based on improved multi-scale retinex[J]. *J Jilin Univ (Sci Ed)*, 2019, **57**(2): 369–374.
罗浩, 仲佳嘉, 李祥. 基于改进多尺度 Retinex 的单幅彩色图像增强算法[J]. *吉林大学学报 (理学版)*, 2019, **57**(2): 369–374.
- [26] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2013, **35**(6): 1397–1409.
- [27] Yang G S, Wang B Y, Chang Z Q, et al. Design, fabrication and measurement of full-color reflective electrowetting displays[J]. *Micromachines*, 2022, **13**(11): 2034.
- [28] Guo J. A comparative study of color reproduction cross-media based on color management system[D]. Anshan: Liaoning

University of Science and Technology, 2019: 34–44.

<https://doi.org/10.26923/d.cnki.gasgc.2019.000180>.

果佳. 基于颜色管理系统的跨媒体颜色复现比较研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2019: 34–44.

<https://doi.org/10.26923/d.cnki.gasgc.2019.000180>.

- [29] Xu X Y. A research of image color appearance modeling based on cognition processing of human vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 79–97.

许向阳. 与视觉认知过程相关的图像色貌建模的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 79–97.

- [30] Lu C L. Study of cross-media color reproduction assessment based on CIECAM02[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013:

37–39.

卢沧龙. 基于 CIECAM02 的跨媒体颜色复现评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 37–39.

- [31] IEC. Multimedia systems and equipment-colour measurement and management-part 4: equipment using liquid crystal display panels: IEC 61966–4[S]. Geneva: IEC, 2000: 7–8.

- [32] Chen Z L, Lin S L, Lin Z X, et al. Design of video display driving system for low-power electrowetting display[J]. *Acta Photonica Sin*, 2020, 49(2): 0222002.

陈哲亮, 林珊玲, 林志贤, 等. 低功耗电润湿显示器视频显示驱动系统设计[J]. *光子学报*, 2020, 49(2): 0222002.

作者简介



毛文杰 (1997-), 男, 甘肃天水人, 2019 年于湖南大学获得学士学位, 主要从事电子纸显示和图像处理技术研究。

E-mail: mwj_ts213@163.com



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



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



【通信作者】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



扫描二维码, 获取PDF全文

Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation

Mao Wenjie^{1,2}, Lin Shanling^{1,2}, Lin Jianpu^{1,2}, Mei Ting^{1,2}, Wang Tingyu^{1,2},
Cai Bipeng^{1,2}, Zhang Jianhao^{1,2}, Lin Zhixian^{1,2*}



Algorithm-processed results for electrowetting display enhancement

Overview: Electrowetting electronic paper uses a subtractive color-mixing system with three primary inks (cyan, magenta, and yellow), which results in a reduced color gamut and colorimetric distortion. These issues arise from the difference between subtractive color mixing and traditional additive RGB systems. Electrowetting displays also depend on ambient light, but diffuse reflection from the display surface often leads to insufficient brightness. This negatively impacts the display quality and visual clarity, especially in low-light conditions.

To address these issues, a color space conversion and image self-adaptive enhancement algorithm is proposed for electrowetting color displays. The objective is to improve color accuracy, increase brightness, and maintain image clarity while overcoming the challenges posed by the reflective nature of the display. The algorithm converts RGB images into the HSV color space, enabling more effective manipulation of color and brightness components. CLAHE (contrast limited adaptive histogram equalization) is applied to the saturation channel (S channel), redistributing saturation more evenly and avoiding over-saturation in specific hues, resulting in a more balanced and vivid color presentation. The brightness channel (V channel) is enhanced by using an improved Retinex algorithm combined with a guidance filter. This method improves brightness and contrast while preserving details and edges, addressing the issue of insufficient brightness caused by the reflective display surface. The algorithm ensures that the electrowetting display maintains realistic and stable visual performance under different lighting conditions.

Experimental results show significant improvements in image quality, with PSNR of 70.5047 dB and SSIM of 0.8378. FSIM and FSIMc, which are used to measure human visual perception, reach 0.8409 and 0.84, respectively. Compared to the FHRPHS algorithm, the proposed method improves PSNR by 19%, SSIM by 10.8%, and FSIM and FSIMc by 19.19% and 19.54%, respectively. These improvements highlight the effectiveness of the approach in enhancing color performance and image clarity, especially in scenarios with limited color gamut, making it suitable for improving electrowetting electronic paper display quality.

Mao W J, Lin S L, Lin J P, et al. Color correction of electrowetting electronic paper based on color space transformation[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(2): 240226; DOI: [10.12086/oe.2025.240226](https://doi.org/10.12086/oe.2025.240226)

Foundation item: National Key R&D Program of China (2021YFB3600603)

¹School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou, Fujian 362252, China; ²Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Photoelectric Information, Fuzhou, Fujian 350116, China

* E-mail: lxz2005000@163.com