

基于动态直方图均衡的暗光图像 增强算法优化

李 晶, 孙 菲, 周恩典

(山东科技大学 电子信息工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 针对传统直方图均衡算法用于暗光图像增强时容易出现过增强、色彩失真以及细节损失严重等问题, 提出了基于动态直方图均衡的暗光图像增强算法优化方法。首先, 通过双边滤波算法滤除图像所含噪声, 并确保图像边缘特征不受损失; 其次, 对去噪后的暗光图像作颜色通道拆分, 计算各通道直方图自适应分割点, 完成直方图的自适应拆分, 在此基础上得到动态直方图均衡化算法, 从而实现图像亮度的调整; 然后, 利用带色彩恢复的多尺度视网膜增强 (MSRCR) 算法对各个通道图像作多尺度 Retinex 处理, 增强图像局部细节信息, 实现图像色彩的恢复; 最后, 应用改进伽马校正算法增强整幅图像的对比度, 实现暗光图像增强。实验结果表明: 该算法可实现暗光图像增强, 增强后图像色彩饱满、层次丰富、细节及边缘信息清晰可辨, 图像质量得到了显著提升。

关键词: 动态直方图; 暗光图像; 双边滤波; 改进伽马校正算法; 多尺度视网膜增强算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)06-1670-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250189

Optimization of dark light image enhancement algorithm based on dynamic histogram equalization

LI Jing, SUN Fei, ZHOU En-dian

(College of Electronic and Information Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Aiming at the problems of over enhancement, color distortion, and severe loss of details that are prone to occur when traditional histogram equalization algorithms are used for dark image enhancement, a dynamic histogram equalization based optimization method for dark image enhancement algorithm is proposed. Firstly, the bilateral filtering algorithm is used to filter out the noise contained in the image and ensure that the edge features of the image are not lost; Secondly, the denoised dark image is subjected to color channel splitting, and adaptive segmentation points for each channel histogram are calculated to achieve adaptive histogram splitting. Based on this, a dynamic histogram equalization algorithm is obtained to adjust the brightness of the image; Then, the Multi-scale Retinex with Color Restoration (MSRCR) algorithm is used to perform multi-scale Retinex processing on each channel image, enhancing local detail

收稿日期: 2025-03-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2806603); 教育部“春晖计划”合作科研项目 (HZKY20220489).

作者简介: 李晶 (1978-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 数字图像处理, 音频信号处理. E-mail: lijing7261@sina.com

information and achieving color restoration of the image; Finally, the improved Gamma correction algorithm is applied to enhance the contrast of the entire image and achieve dark light image enhancement. The experimental results show that the algorithm can enhance dark light images, resulting in full color, rich layers, clear and distinguishable details and edge information, and significantly improved image quality.

Key words: dynamic histogram; dark light image; bilateral filtering; improved Gamma correction algorithm; multi-scale retinex with color restoration algorithm

0 引言

在图像处理领域,暗光图像增强是一项至关重要的任务^[1]。暗光图像具有细节损失严重、色彩饱和度不高等问题,这些问题极大限制了图像在后续应用中的可靠性^[2-4]。因此,开发高效的暗光图像增强算法具有重要的理论和实践意义^[5]。

目前,众多学者致力于探索和开发更为先进和高效的图像增强算法,以应对图像处理领域中的复杂挑战。路陆等^[6]利用自适应机制调整引导滤波参数,在去除噪声的同时保留并增强图像细节。然而,该算法可能导致色彩信息有所损失,使得图像的色彩饱满度不够理想。同时,该方法侧重于平滑处理和细节增强,导致处理后的图像对比度不够高,影响视觉体验。苗作华等^[7]通过对预处理后的图像进行亮暗部分分解,利用Retinex算法处理亮度成分,实现亮度和对比度的调整后,与分解出的反射成分进行合成,实现图像增强。然而,该算法在光照变化剧烈的区域,可能出现色彩失真或关键细节丢失等问题,限制了其在实际应用中的效果。Wang等^[8]利用卷积神经网络学习微光图像到正常光照图像的映射关系,生成高质量图像。但卷积神经网络参数的选择对图像增强效果影响较大,参数选择不合理会造成图像增强效果不佳。徐小来等^[9]利用直觉模糊集处理原始图像后,通过直方图均衡化技术提升图像的辨识度,但是可能导致图像灰度范围的不恰当扩大,造成图像出现锐化现象。

对此,本文针对现有方法增强后存在图像对比度不够高、色彩失真或关键细节丢失、图像出现过锐化等增强效果不佳的问题,提出基于动态直方图均衡的暗光图像增强算法优化方法,旨在解决传统图像增强方法在处理暗光图像时容易出现的过增强、颜色偏差等缺陷,大幅提升暗光图像的整体视觉表现。

1 暗光图像增强算法优化方法设计

1.1 基于双边滤波的暗光图像去噪

暗光图像中含有的大量噪声是影响图像质量的关键因素,双边滤波算法结合了高斯滤波器和边缘保持滤波器的特性,能在平滑图像的同时最大程度地保留边缘信息^[10-13]。因此,本文通过双边滤波算法对暗光图像展开去噪处理,避免边缘细节模糊。

利用双边滤波器对暗光图像进行处理时,不仅权衡了像素之间的空间关系,还充分考量了像素之间的颜色接近度,计算公式为:

$$J_s = \frac{\sum_{p \in \Omega} f(p-s)g(T_p-T_s)T_p}{\mu(s)} \quad (1)$$

$$\mu(s) = \sum_{p \in \Omega} f(p-s)g(T_p-T_s) \quad (2)$$

$$f(p-s) = e^{-(p-s)^2/2\sigma_d^2} \quad (3)$$

$$g(T_p-T_s) = e^{-(T_p-T_s)^2/2\sigma_r^2} \quad (4)$$

式中: s, p 为图像上的像素点,对应的像素值分别为 T_s, T_p ; s 像素点经过去噪后的像素值为 J_s ; s 的邻近区域表示为 Ω ; s 像素点的标准化因子表示为 $\mu(s)$; s, p 像素点的空间邻近度的权重函数表示为 $f(p-s)$; 颜色接近度的权重函数表示为 $g(T_p-T_s)$; σ_d, σ_r 分别为调节空间邻近度因子、颜色相似度因子衰减大小的参数。

1.2 基于动态直方图均衡化的暗光图像亮度调整

暗光图像直方图通常集中分布在亮度范围的低端,导致图像动态范围受限且视觉效果偏暗^[14]。对暗光图像亮度进行动态直方图均衡化处理是实现图像亮度信息调整的关键。本文基于全局直方图中平均亮度值的位置确定分割点,完成整个直方图的拆分,得到两个独立的子直方图区域,通过为其定制各自的亮度值映射范围,实现暗光图像亮度的调整,确保暗光图像亮度分布更加合理,达到提升暗光图像视觉效果的目的^[15]。

具体步骤为:

(1) 确定全局直方图的亮度分布区间, 直方图 h 的亮度分布区间 $[a, b]$ 通过下式进行表示:

$$\text{Range}(h) = \begin{cases} a = \min(n_q \geq 1) \\ b = \max(n_q \geq 1) \end{cases}, q \in [0, L-1] \quad (5)$$

式中: $\min(\)$ 函数用于确定 $n_q \geq 1$ 条件下的最小亮度值 q ; $\max(\)$ 函数用于确定 $n_q \geq 1$ 条件下的最大亮度值 q ; L 为暗光图像的总灰度级数。

暗光图像所含噪声会对亮度分布区间的精确确定带来不利影响, 因此, 对式(5)进行调整, 即:

$$\text{Range}(h) = \begin{cases} a = \min(n_q \geq m) \\ b = \max(n_q \geq m) \end{cases}, q \in [0, L-1] \quad (6)$$

式中: m 为设定的阈值, 其作用是抑制图像噪声对亮度分布区间准确确定所产生的干扰。

(2) 确定全局直方图分割点。在全局直方图的亮度分布区间中, 确定平均亮度值所在位置 l , 并将其作为分割点 SP , 将全局直方图划分为左、右两个子区域, 分别对应两个子直方图, 如下所示:

$$l = l'^{-1} \left[\left(\sum n_q q / \sum n_q \right) - a \right] \quad (7)$$

$$SP = l' \times (1 - l) + a \quad (8)$$

式中: l' 为全局直方图亮度分布区间长度。

(3) 亮度映射范围的调整。为了优化暗光图像的亮度调整效果, 对每个子直方图的亮度映射范围进行调整, 确保其能获得适当的扩展空间。本文通过精确分析子直方图在全局分布中的比重, 调整子直方图的亮度映射范围实现该目标。亮度映射范围分割点 MP 通过下式确定:

$$MP = (L - 1) \times [(SP - a) / l'] \quad (9)$$

通过上述分析可知, 先确定全局直方图亮度分布区间, 再以全局直方图平均亮度值所在位置为分割点将其划分为两个子区域, 最后精确分析子直方图在全局分布中的比重来调整亮度映射范围, 实现暗光图像亮度调整。

1.3 基于 MSRCR 与改进伽马校正的暗光图像增强

(1) 基于 MSRCR 的暗光图像细节增强

带色彩恢复的多尺度视网膜增强 (Multi-scale retinex with color restoration, MSRCR) 算法通过模拟人眼对光线的处理机制, 对图像进行多

尺度的 Retinex 滤波处理, 并在此基础上引入颜色恢复功能, 以保持图像色彩的自然性。本文利用 MSRCR 算法处理去噪以及亮度调整后的暗光图像, 达到图像细节增强以及色彩恢复的目的。MSRCR 算法的处理公式为:

$$R_{\text{MSRCR}}(x, y) = C_i(x, y) R_{\text{MSR}}(x, y) \quad (10)$$

式中: 对第 i 个通道的暗光图像像素点进行多尺度 Retinex 滤波处理, 处理结果表示为 $R_{\text{MSR}}(x, y)$; 该通道下暗光图像增强结果表示为 $R_{\text{MSRCR}}(x, y)$, 色彩恢复系数表示为 $C_i(x, y)$ 。

$C_i(x, y)$ 通过下式计算得到:

$$C_i(x, y) = \beta \left\{ \log_2 [\alpha \cdot I_i(x, y)] - \log_2 \left[\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \right] \right\} \quad (11)$$

式中: α 为控制系数; β 为增益系数表示, 其值为固定常数; $I_i(x, y)$ 为亮度调整以及去噪后的暗光图像; N 为 RGB 通道, $N = 3$ 。

(2) 基于改进伽马校正的暗光图像对比度增强

在完成图像细节信息增强后, 采用改进伽马校正算法对其作进一步处理, 以平衡暗光图像对比度, 有效缩小暗区域以及亮区域之间的亮度差异。

全局伽马校正函数处理后的图像像素值 $O(x, y)$ 通过下式进行描述:

$$O(x, y) = 255 \times \left(\frac{R(x, y)}{255} \right)^{\frac{1}{1 + \phi \cos \left(\frac{\pi v(x, y)}{2R_\xi} \right)}} \quad (12)$$

式中: $R(x, y)$ 、 R_ξ 分别为细节增强后的图像像素值以及像素平均值; ϕ 为伽马校正系数, 取值范围为 $[0, 1]$; $v(x, y)$ 为像素点的光照分量。

如果 ϕ 参数取值过低, 在缩减图像中暗区域与亮区域之间的亮度差异方面展现出的效果不够显著, 难以充分平衡整个图像的光照对比度。因此, 本文改进伽马校正系数, 将图像的平均像素值 ζ 作为调控基准, 旨在更有效地校正图像对比度。改进后的伽马校正公式通过下式进行描述:

$$O(x, y) = 255 \times \left(\frac{R(x, y)}{255} \right)^\gamma \quad (13)$$

式中: γ 为指数因子, 决定了图像增强程度。

2 实验分析

从互联网平台收集包含夜景、室内低光环境、阴天等多个场景的暗光图像,选取5 000张构建实验数据集,数据集中的图像统一剪裁为1 024×1 024尺寸。实验中不仅配置了Intel Xeon Gold系列可提供多核多线程处理能力的CPU,加速图像处理流程的NVIDIA Tesla系列GPU,还使用了2 TB容量的NVMe SSD硬盘,实现超高速的数据读写。应用算法对暗光图像进行增强,通过对暗光图像增强结果进行分析,验证算法在图像增强上的性能优势。

2.1 图像去噪效果

噪声处理是实现暗光图像增强的必要步骤,选取一张含噪暗光图像,如图1所示,应用本文算法对其作去噪处理。基于暗光图像噪声分布较广且边缘细节较弱的特点,设置高斯滤波器的方差为10,边缘保持滤波器的方差为30,前者表示在10像素范围内进行空间平滑,既能有效去除噪声,又不会过度模糊边缘;后者表示允许像素灰度值差异在30以内时保留边缘信息,避免将噪声与边缘混淆。去噪后的暗光图像如图2所示。



图1 原始暗光图像

Fig. 1 Original dark light image



图2 双边滤波去噪效果

Fig. 2 Image after bilateral filtering

由图2可见,去噪后的暗光图像质量显著提高,不仅噪声得以有效去除,而且图像中的微小特征和边缘细节得以清晰呈现,整体画面变得更加清晰和自然。说明本文算法在暗光图像去噪方面具有显著成效,能够提升暗光图像质量。

2.2 图像亮度调整效果

以图1原始暗光图像的R通道为例,给出原始图像的直方图,如图3所示。

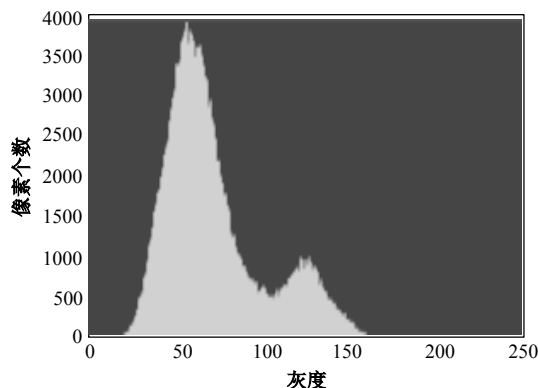


图3 原始暗光图像R通道直方图

Fig. 3 R-channel histogram of original dark light image

针对图3,利用式(14)计算其平均亮度值:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} i \times n_i}{\sum_{i=0}^{L-1} n_i} \quad (14)$$

式中: $\bar{I}$ 为平均亮度值; i 为灰度级; n_i 为灰度级为 i 的像素数量。

以平均亮度值所在位置为分割点,分割点的具体数值约为51。分割后的直方图如图4所示。

针对图1展开亮度调整,得到调整后的R通道直方图,如图5所示。调整前的直方图灰度值分布相对集中,主要集中在50~100的灰度区间,形成较为明显的波峰,说明图像大部分像素的灰度值处于该范围,整体偏暗且对比度较低。而调整后的直方图灰度值分布更为分散,覆盖了更宽的灰度范围,从低灰度到高灰度都有较多像素分布,原本集中的波峰变得平缓,并且在多个灰度区间出现峰值,这表明图像经过调整后,对比度显著增强,像素灰度值的分布更加均匀,能够展现出更多的细节,整体视觉效果可能会更加清晰和生动。继续应用本文算法对去噪后的暗光图像作进一步增强处理,结果如图6所示。

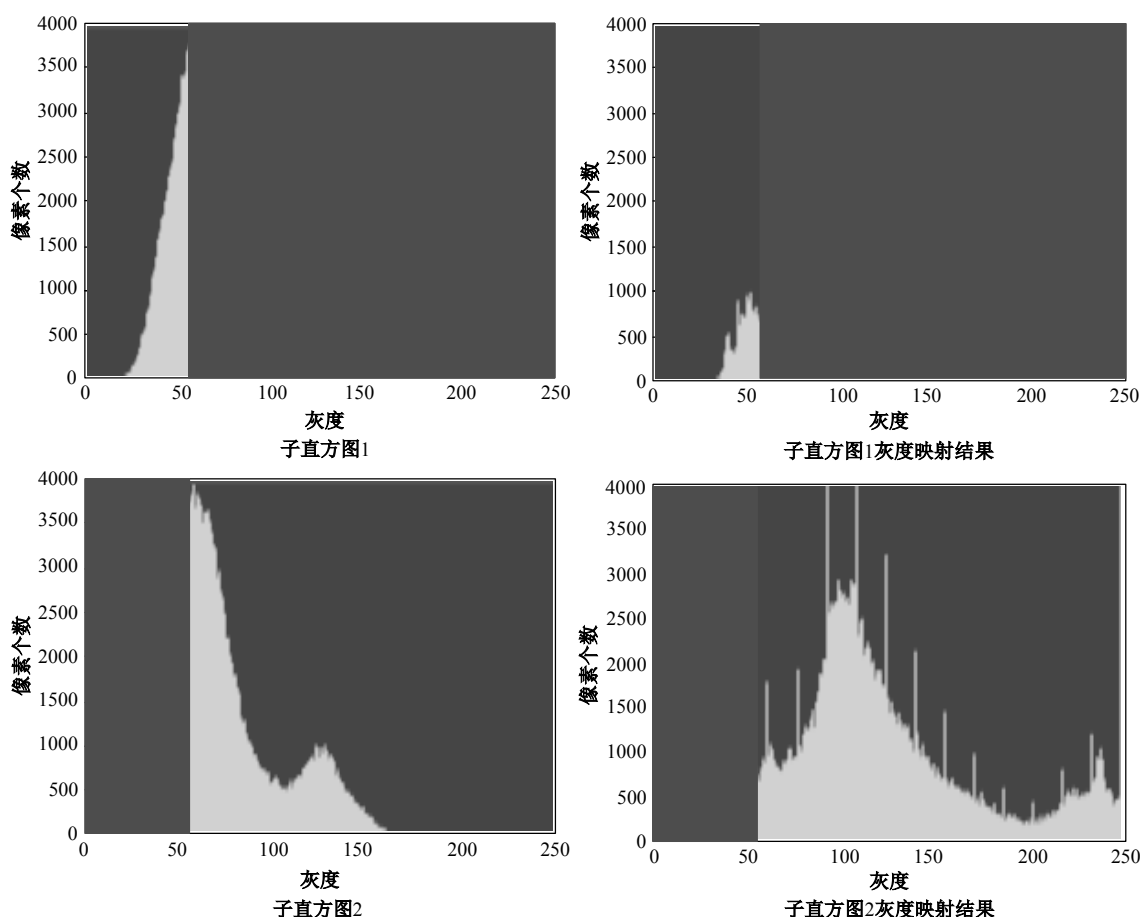


图 4 子区域直方图及灰度范围映射结果

Fig. 4 Sub-histogram and grayscale range mapping results

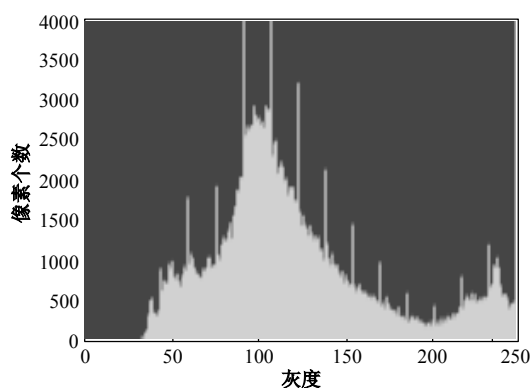


图 5 暗光图像亮度调整后直方图

Fig. 5 Histogram of dark light image after brightness adjustment

由图 6 可见,通过 MSRCR 算法能够实现暗光图像纹理细节增强,增强后图像中的微小特征和边缘信息更加清晰可辨,色彩饱满且层次丰富,显著提升了图像的视觉表现力。然而,也存在过增强的问题,导致明暗区域的亮度差异过于悬殊,不满足人眼对舒适视觉效果追求。而经过改进伽马校正算法进行对比度校正后,这一问题得到

了有效缓解,明暗区域过渡更加自然,整体亮度分布更加均衡,画面质量明显改善。

将本文算法与基于深度学习的图像增强算法^[1]、基于直觉模糊集和直方图的图像增强算法^[9]进行对比,通过对比分析各个算法在不同指标上的性能差异,验证本文算法在图像增强上的突出表现,实验结果如表 1 所示。

由表 1 可得,本文算法在 4 个指标上的表现均优于对比算法,全局亮度误差指标反映了图像亮度均匀性,本文算法的平均亮度误差指标值为 0.032,明显低于对比算法,说明本文算法在提升图像亮度均匀性方面表现更佳,减少了图像中的亮度不均现象;信息熵反映了图像的信息丰富度,本文算法的信息熵值为 7.85,高于对比算法,表明本文算法处理后的图像包含更多细节信息。峰值信噪比指标反映了图像的清晰度和噪声水平,其值达到 32.46 dB,远高于对比算法,说明本文算法在保持图像清晰度、减少噪声方面表现出色。结构相似度指标反映了图像结构保持性的好坏,

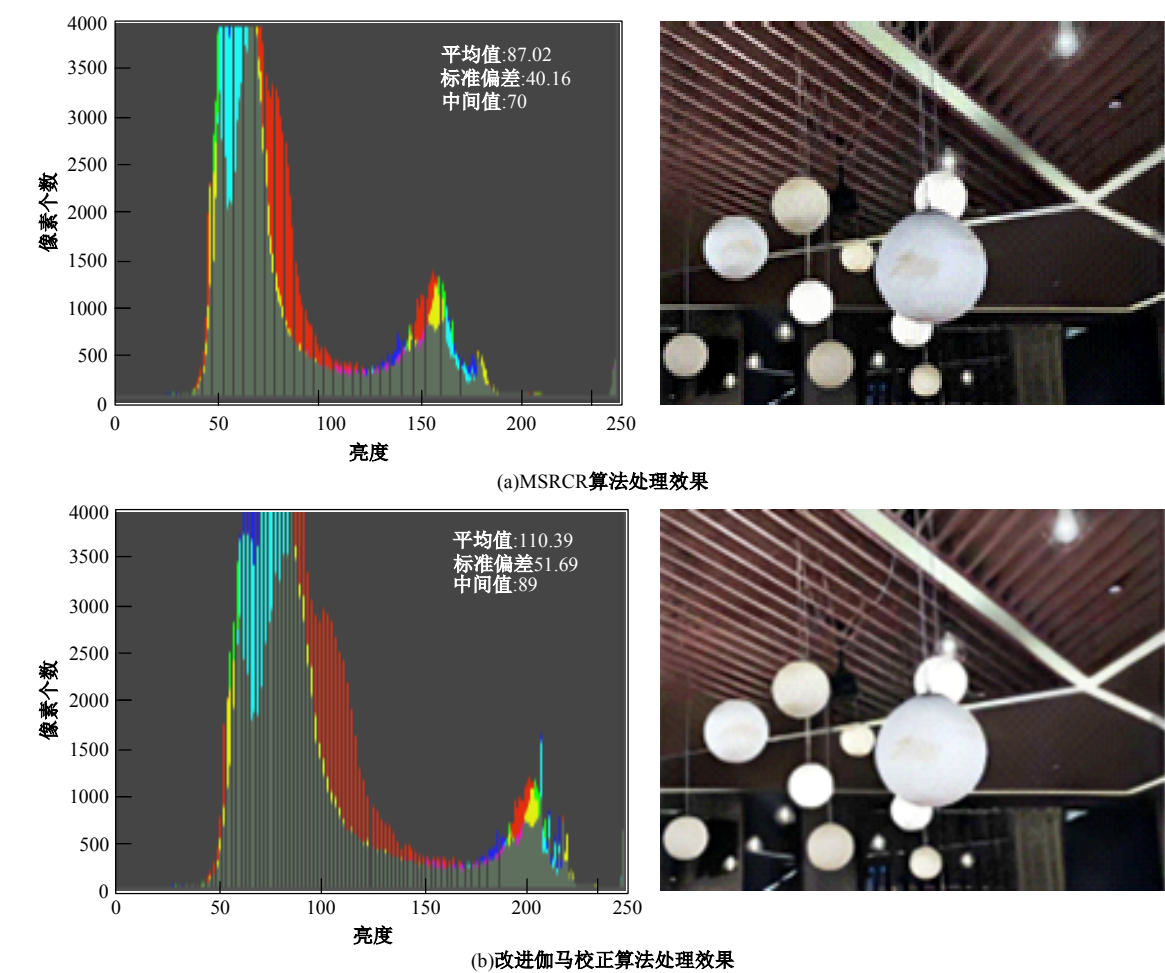


图 6 暗光图像增强结果分析

Fig. 6 Dark light image enhancement results

表 1 各方法在图像增强上的性能差异比较
Table 1 Comparison of performance differences of various methods in image enhancement

方 法	平均亮 度误差	信息 熵	峰值信噪 比/dB	结构相 似度
本文	0.032	7.85	32.46	0.92
基于视觉模糊集和直方图 的图像增强算法	0.054	7.2	29.83	0.87
基于深度学习的图像增强算法	0.041	7.51	30.98	0.89

其值为 0.92,证明了本文算法在保持图像结构完整性方面的优势。

3 结束语

基于动态直方图均衡的暗光图像增强算法优化,通过将动态直方图均衡化算法与双边滤波、MSRCR算法、改进伽马校正算法进行结合,不仅实现了图像亮度的调整,还确保了边缘细节等重要信息的精细保留,从而大幅提高了图像清晰度。同时,该算法还显著增强了图像色彩饱和度和整

体对比度,使得图像细节更加清晰鲜明,有望进一步拓展应用于更多复杂场景,推动图像处理技术的发展。

参考文献:

[1] 梁礼明,朱晨锟,阳渊,等. 跨级特征自适应融合的暗光图像增强算法[J]. 液晶与显示, 2024, 39(6): 856-866.
Liang Li-ming, Zhu Chen-kun, Yang Yuan, et al. Cross-level feature adaptive fusion network for low-light image enhancement[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2024, 39(6): 856-866.

[2] 冯欣,王思平,张智先,等. 一种面向机器视觉感知的暗光图像增强网络[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(6): 1910-1915.
Feng Xin, Wang Si-ping, Zhang Zhi-xian, et al. Dark light image enhancement network for machine vision perception[J]. Application Research of Computers, 2024, 41(6): 1910-1915.

- [3] 王以涵, 郝世杰, 韩徐, 等. 基于低秩矩阵估计的暗光图像增强模型[J]. 计算机科学, 2022, 49(1): 187-193.
Wang Yi-han, Hao Shi-jie, Han Xu, et al. Low-light image enhancement model with low rank approximation[J]. Computer Science, 2022, 49(1): 187-193.
- [4] 王登飞, 苏宏升, 陈光武, 等. 基于聚焦线性注意力 Retinexformer 的 TEDS 图像实时暗光增强方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(11): 4840-4850.
Wang Deng-fei, Su Hong-sheng, Chen Guang-wu, et al. Real time low light enhancement method of TEDS images based on focused linear attention Retinexformer[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(11): 4840-4850.
- [5] 王春智, 牛宏侠. 基于直方图均衡化与 MSRCR 的沙尘降质图像增强算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(9): 223-229.
Wang Chun-zhi, Niu Hong-xia. Sand-dust degraded image enhancement algorithm based on histogram equalization and MSRCR[J]. Computer Engineering, 2022, 48(9): 223-229.
- [6] 路陆, 姜鑫, 杨锦程, 等. 基于自适应引导滤波的红外图像细节增强[J]. 液晶与显示, 2022, 37(9): 1182-1189.
Lu Lu, Jiang Xin, Yang Jin-cheng, et al. Adaptive guided filtering based infrared image detail enhancement[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(9): 1182-1189.
- [7] 苗作华, 朱良建, 赵成诚, 等. 基于 Retinex 的低光照车位图像增强[J]. 汽车工程, 2023, 45(6): 989-996.
Miao Zuo-hua, Zhu Liang-jian, Zhao Cheng-cheng, et al. Image enhancement of low-light parking space based on Retinex[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(6): 989-996.
- [8] Wang Y, Xie W, Liu H. Low-light image enhancement based on deep learning: a survey[J]. Optical Engineering, 2022, 61(4): 1-20.
- [9] 徐小来, 彭晖, 邹书跃. 基于直觉模糊集和直方图均衡的图像增强方法[J]. 电光与控制, 2021, 28(4): 70-72, 86.
Xu Xiao-lai, Peng Hui, Wu Shu-yue. Image enhancement based on intuitionistic fuzzy sets and histogram equalization[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(4): 70-72, 86.
- [10] 江巨浪, 刘国明, 朱柱, 等. 基于快速模糊聚类的动态多直方图均衡化算法[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 167-176.
Jiang Ju-lang, Liu Guo-ming, Zhu Zhu, et al. Dynamic multi-histogram equalization based on fast fuzzy clustering[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 167-176.
- [11] 何智博, 曾祥进, 邓晨, 等. 基于局部熵-局部对比度和双区域直方图均衡化的红外图像增强[J]. 红外技术, 2023, 45(6): 598-604.
He Zhi-bo, Zeng Xiang-jin, Deng Chen, et al. Infrared image enhancement based on local entropy-local contrast and dual-area histogram equalization[J]. Infrared Technology, 2023, 45(6): 598-604.
- [12] 王潇, 于炯, 杨嘉能, 等. 优化动态直方图均衡的水下图像增强方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(10): 259-264, 439.
Wang Xiao, Yu Jiong, Yang Jia-neng, et al. Optimized dynamic histogram equalization for underwater image enhancement[J]. Computer Simulation, 2022, 39(10): 259-264, 439.
- [13] 顾文娟, 丁灿, 魏金, 等. 基于双边滤波 MSR 与 AutoMSRCR 融合的低光照图像增强[J]. 光学精密工程, 2023, 31(24): 3606-3617.
Gu Wen-juan, Deng Can, Wei Jin, et al. Low-light image enhancement based on the fusion of Bilateral filter MSR and AutoMSRCR[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(24): 3606-3617.
- [14] 郭成, 胡小平, 彭向前, 等. 改进 MSRCR 的透明物体逆光图像增强算法[J]. 传感技术学报, 2024, 37(4): 645-651.
Guo Cheng, Hu Xiao-ping, Peng Xiang-qian, et al. Improved MSRCR algorithm for backlight image enhancement of transparent objects[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(4): 645-651.
- [15] 云海蛟, 夏洋. 结合自适应 Gamma 变换和 MSRCR 算法的低光照图像增强方法[J]. 中国科技论文, 2022, 17(11): 1245-1253.
Yun Hai-jiao, Xia Yang. Low-light image enhancement method combined with adaptive Gamma transformation and MSRCR algorithm[J]. China Science-paper, 2022, 17(11): 1245-1253.