

基于自适应阈值和局部色调映射的低照度图像处理

曹红燕¹, 刘长明^{1*}, 沈小林¹, 李大威¹, 陈燕²¹ 中北大学电气与控制工程院, 山西 太原 030051;² 陆军装备部驻北京地区军事代表局某军代室, 山西 太原 030051

摘要 为了解决低照度图像的细节信息缺少和清晰度低的问题,在 HSV(Hue, Saturation, Value)色彩空间中,采用非下采样剪切波变换(NSST)与 Retinex 理论的融合算法对低照度图像进行处理。首先对 HSV 空间的 V 分量进行分解,得到多个高通子带与一个低通子带,对高通子带采用改进的基于贝叶斯萎缩的自适应阈值算法完成去噪,对低通子带采用改进的自适应局部色调映射算法提高对比度,然后对两个子带进行 NSST 逆变换以得到新的 V 分量并对其进行白平衡处理,最后将处理后的图像反转到 RGB(Red, Green, Blue)空间中得到结果图像。实验结果表明,所提算法能够改善低照度图像的质量,提高清晰度与对比度。

关键词 图像处理; 非下采样剪切波变换; 图像去噪; HSV 颜色空间; 图像增强; Retinex 理论

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0410017

Low Illumination Image Processing Based on Adaptive Threshold and Local Tone Mapping

Cao Hongyan¹, Liu Changming^{1*}, Shen Xiaolin¹, Li Dawei¹, Chen Yan²¹ School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;² Military Representative Office of Military Equipment Department in Beijing, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In order to solve the problem of lack of detailed information and low definition of low illuminance images, the fusion algorithm of non-undersampled shear wave transform (NSST) and Retinex theory is used to process low illuminance images in the color space of HSV (Hue, Saturation, Value). First, the V component of the HSV space is decomposed to obtain multiple high pass subbands and a low pass subband. The high pass subbands with the improved adaptive threshold algorithm based on Bayesian shrinkage denoising, the low pass subbands with the improved adaptive local color mapping algorithm improve the contrast. Then, the NSST inverse transformation is applied to the two subbands to obtain the new V components and white balance treatment is performed on them. Finally, the processed image is reversed to the RGB (Red, Green, Blue) space to get the result image. Experimental results show that the proposed algorithm can improve the quality of low illuminance images, and improve the definition and contrast.

Key words image processing; non-subsampled shearlet transform; image denoising; HSV color space; image enhancement; Retinex theory

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 280.1310

1 引言

图像是信息的重要载体之一,高可见度图像

能够给人们带来清晰的视觉感受,可以使人们更直观地获取信息^[1]。低照度图像是在环境照度低于规定照度的情况下采集的图像。在图像处理领

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-07-29; 录用日期: 2020-08-06

基金项目: 山西省自然科学基金(201901D111151)

* E-mail: 3104096911@qq.com

域,对于低照度环境没有公认的统一标准。在光照相对较暗的环境中,拍摄的图像存在局部对比度低、整体亮度偏暗、局部细节较模糊以及视觉信息偏弱等问题,使人们无法从拍摄的图像中提取到有效的视觉信息。低照度图像不仅影响人们的日常生活,还严重影响军事侦察目标的判断,干扰战略部署,为此科研学者采用了低照度图像增强算法来改善图像质量,加强对低照度图像的识别。低照度图像增强算法主要在满足人眼视觉特性的前提下,丰富图像的细节信息,从而提高图像的亮度、清晰度和对比度等^[2],但是拍摄过程中光照不足会导致图像的局部灰度像素值低,而且存在很多噪声。增强算法处理图像的过程中,一些干扰因素会将图像的噪声放大,这对细节特征的提取造成干扰,从而影响图像的处理结果。综上所述,图像的去噪与增强融合是当今科研学者研究的热点问题之一,也是获得低照度图像信息的重要处理过程之一。

常见的低照度图像增强算法有 Retinex、同态滤波和直方图均衡化等^[3]。Retinex 算法是由 Land^[4]于 1963 年提出的,该算法可以减小场景的直接视图与捕获图像之间的差距,从而调整图像亮度,减少照明对图像的影响。以此为基础,科研学者还提出了很多有效的增强算法,如单尺度 Retinex(SSR)^[5]、多尺度 Retinex(MSR)^[6]和带有色彩恢复因子的多尺度 Retinex(MSRCR)^[7]等。Retinex 算法的假设前提是光照缓慢变化,但是对于光照变化比较强烈的情况,图像易出现光晕的现象,所以将 Retinex 算法与其他算法结合后对图像进行处理。2005 年, Lam^[8]在 Retinex 算法中引入了灰度世界(Gray-World)算法,这可以保留两种算法的优点,并且对低照度彩色图像的增强具有良好的视觉效果。2005 年,李学明^[9]将图像分解为 R (Red)、 G (Green)和 B (Blue)三个分量,并计算不同波段内像素间的相对明暗关系以确定每个像素的色彩,然后将 Retinex 颜色空间内的色彩线性映射到 RGB 空间中,从而获得增强后的图像。2008 年,刘瑞剑等^[10]将高斯函数的三个尺度参数增加到 4 个,采用改进后的 MSR 算法对低照度图像进行处理,可以获得色彩保真度较好的图像。2012 年,刘钦堂^[11]将 RGB 图像转换到 HSI(Hue, Saturation, Intensity)颜色空间中,采用不同尺度的 Retinex 算法对 I 分量进行增强以避免对 S 分量的影响,该算法能够有效还原图像的色彩信息。2019 年,刘健等^[12]基于 Retinex 理论对

RGB 图像进行了 HSV(Hue, Saturation, Value)色彩空间的变换,对亮度 V 分量采用引导滤波与高斯平滑结合的方式进行估计,使用对数图像处理模型代替传统的对数运算模型,能够有效地丰富阴影区域的细节信息。2020 年,郑敏^[13]在 Retinex 理论的基础上,提出了一种新的去噪模型,该模型可以在动态范围压缩和颜色恒常之间达到平衡。

为了提高低照度图像的清晰度、丰富图像的细节信息以及解决过饱和与光晕的问题,将 RGB 图像转换到 HSV 颜色空间中^[14],保持色调 H 分量和饱和度 S 分量不变,对亮度 V 分量进行去噪和增强处理。首先选用非下采样剪切波变换(NSST)为框架,将 V 分量分解成多个高通子带和一个低通子带,对高通子带采用改进的基于贝叶斯萎缩的自适应阈值算法进行去噪,对低通子带采用改进的自适应局部色调映射算法进行对比度增强;然后对两个子带进行 NSST 逆变换后得到新的 V 分量,并对其进行白平衡处理;最后将处理后的图像反转到 RGB 空间中,得到结果图像。本文对光照不均匀和逆光两种低照度图像采用 MSR 算法^[6]、GLOW(Globally Optimized Linear Windowed)算法^[15]、文献[11]算法及所提算法进行处理并对比结果。实验结果表明,相比于其他三种算法,所提算法处理后的图像在阴影区域的细节信息更丰富,色彩保真度更高,直观评价更好。

2 基础知识

2.1 颜色空间转换

目前,颜色空间有 RGB、HIS、YCbCr、CMKY、LAB 和 HSV 等多种数学模型。RGB 空间中的 R 、 G 和 B 三个分量之间有较强的关联性,采用分通道的处理方式容易导致颜色失真。HIS 空间通常用在色彩特征的检测与分析。YCbCr 空间通常用在影像或数字成像系统中。CMKY 空间一般应用于印刷工业领域。HSV 空间和 LAB 空间相比于其他颜色空间可以更好地数字化处理颜色。LAB 颜色空间是一种基于生理特征的颜色系统,与设备相关性较小,弥补了 RGB 空间和 CMYK 空间中色彩模式的不足。因为 RGB 与设备相关,所以不能直接与 LAB 空间互相转换,转换前须定义一种绝对的颜色空间,如 sRGB 或者 Adobe RGB,但是 LAB 颜色空间的色域比计算机显示器甚至人类视觉都大,即 LAB 的位图需要更多的像素数。HSV 颜色空间是孟塞尔彩色空间的简化形式,是一种基于感知的颜

色模型,其中亮度分量与图像的彩色信息无关,色调和饱和度分量与人感受颜色的方式紧密相连。考虑到 LAB 模型的计算量大以及低照度图像的像素信息不足,对 HSV 颜色空间进行研究,将图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间中并进行一系列处理,再将处理结果转换到 RGB 颜色空间中。

将图像从 RGB 空间映射到 HSV 空间中的计算过程如下。

1) 计算 RGB 空间中三个颜色通道的亮度 V 分量的最大值,表达式为

$$V = \max(R, G, B)。 \quad (1)$$

2) 在最大亮度 V 分量不为零的情况下,计算饱和度和 S 分量,表达式为

$$S = \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V}, & \text{if } V \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}。 \quad (2)$$

3) 计算色调 H 分量,表达式为

$$H = \begin{cases} \frac{60(G - B)}{V - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = R \\ 120 + \frac{60(B - R)}{V - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = G \\ 240 + \frac{60(R - G)}{V - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = B \end{cases}。 \quad (3)$$

将处理结果从 HSV 空间映射到 RGB 空间中的计算过程如下。

1) 使用乘法单元计算色调 H 分量的规范化值 H_o 及对应的频率 f ,表达式为

$$H = \left\lfloor \frac{H_o}{60} \right\rfloor, \quad o = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \quad (4)$$

$$f = \frac{H_o}{60} - H。 \quad (5)$$

2) 计算表示颜色的中间变量 p, q 和 t ,表达式为

$$p = V \times (1 - S), \quad (6)$$

$$q = V \times (1 - f \times S), \quad (7)$$

$$t = V \times [1 - (1 - f) \times S]。 \quad (8)$$

3) 使用(6)~(8)式计算 H_o 对应的每个颜色分量 (R, G, B) ,表达式为

$$(R, G, B) = \begin{cases} (V, t, p), & \text{if } H_o = 0 \\ (q, V, p), & \text{if } H_o = 1 \\ (p, V, t), & \text{if } H_o = 2 \\ (p, q, V), & \text{if } H_o = 3 \\ (t, p, V), & \text{if } H_o = 4 \\ (V, p, q), & \text{if } H_o = 5 \end{cases}。 \quad (9)$$

2.2 NSST

剪切波变换和小波变换均不具备平移不变性,处理后的图像均会出现失真的现象。剪切波变换和小波变换均具有多方向性,但是前者的分解数量受限制。实验采用的 NSST 是由剪切波变换衍生的,其可以克服小波变换无法实现最优逼近的缺点并具有平移不变性,能够消除伪吉布斯现象以弥补轮廓波变换的不足。NSST 的处理过程主要由多尺度分解和方向局部化两步组成。首先主要使用非下采样金字塔滤波器(NSP)来分解原始 V 分量,可以获得一个低通子带和一个高通子带,将得到的低通子带进行方向局部化处理,使用标准的剪切波滤波器(SF)将其从伪极化网络系统映射到笛卡尔坐标系中,利用窗函数对图像进行多尺度分解,可以获得不同方向的子带系数并对其进行卷积,分解 k 次后,最终得到 k 个高通子带,1 个低通子带。分解过程如图 1 所示。

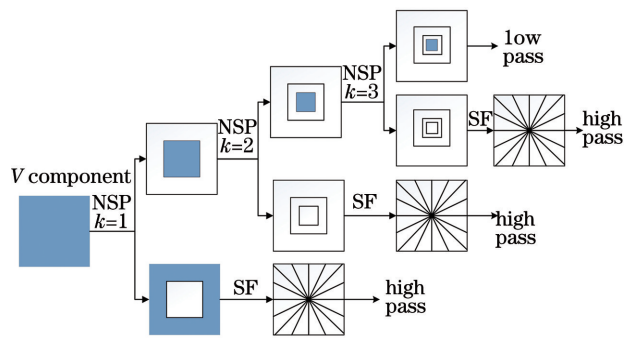


图 1 $k=3$ 的 NSST 分解流程

Fig. 1 NSST decomposition process of $k=3$

2.3 Retinex 理论

Retinex 理论模型是以人类视网膜成像及颜色恒常性为基础来弥补照明对图像的影响,平衡图像的动态参数。Retinex 理论主要假设真实世界是无色的,人类看到的颜色是光在物体上反射后的结果,看到的颜色由红、黄和蓝三种颜色构成,对应于长波、中波和短波。Retinex 理论的模型如图 2 所示,模型中包含入射光与反射光,入射光主要描述光源

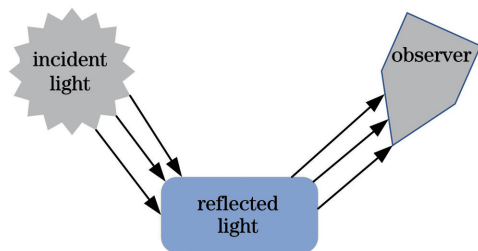


图 2 Retinex 理论的模型

Fig. 2 Model of Retinex theory

及环境的特性,反射光不依赖于光源与环境,而是与物体本身的属性有关。当反射光传递给观察者时,该过程与人类的视觉系统紧密相关,除去环境与光源的干扰信息,将物体本身的信息传给大脑皮层后形成人的视觉。

3 所提算法

所提算法的处理流程如图 3 所示。首先将低照度图像转换到 HSV 颜色空间中,保持 H 分量和 S 分量不变,获取 V 分量;然后使用 NSST 得到多个高通子带与一个低通子带,由于高通子带中含有大量噪声,采用改进的基于贝叶斯萎缩的自适应阈值算法对其进行去噪,在低通子带中采用改进后的自适应局部色调映射算法进行对比度增强,对两个子带进行 NSST 逆变换以得到新的 V 分量,并对其进

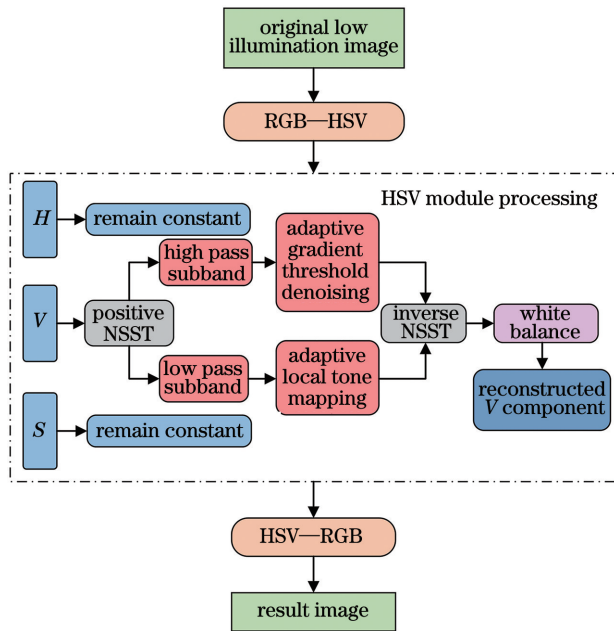


图 3 所提算法的处理流程

Fig. 3 Processing flow of proposed algorithm

行白平衡处理;最后将其转换到 RGB 颜色空间中。

3.1 高通子带改进算法

V 分量经过 NSST 处理后可以得到 k 个高通子带并对其进行去噪处理,常见的阈值去噪函数有硬阈值、软阈值、半软阈值和自适应阈值等。硬阈值函数不能保证处理后信号的连续性和光滑度,容易导致信号失真。软阈值函数可以克服硬阈值函数的缺点,但是对于特殊情况还会出现过扼杀的现象,不能完整地保留信号的细节信息。半软阈值函数和自适应阈值函数得到的效果比前两者好,但是半软阈值函数需要人为设定参数,而且没有明确准则,对结果的影响太大,所以自适应阈值函数更适合。采用基于贝叶斯萎缩的自适应阈值算法对图像进行去噪,引入调节因子 μ 与加权因子 α 来提高去噪的效率,高通子带改进算法的具体计算过程如下。

1) 自定义的阈值函数 T_x 可表示为

$$T_x = \lambda \sigma^2 / \sigma_x^2, \quad (10)$$

式中: λ 为自定义参数,用来调整阈值的大小, λ 值取 0.9; σ 为信号的噪声值; σ_x^2 为信号的方差值; σ_x 为信号的标准差值。 σ 和 σ_x 可分别表示为

$$\sigma = (f_{\text{median}} |d_{i,j}|) \div 0.6745, \quad (11)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\max \left[\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{i,j}^2(l,k) - \sigma^2, 0 \right]}, \quad (12)$$

式中: $f_{\text{median}}(\cdot)$ 为鲁棒中值估算函数; $d_{i,j}(l,k)$ 为第 i 层第 j 个像素点 (l,k) 经过 NSST 分解后的高通系数,其中 $i \in [1, m], j \in [1, n]$ 。

2) 引入调节因子 μ , 表达式为

$$\mu = -\frac{1}{6}(m-1)(m-2)(m-3) + 1. \quad (13)$$

3) 使用(3)式计算 $d_{i,j}$ 的共轭 $\hat{d}_{i,j}$, 表达式为

$$\hat{d}_{i,j} = \begin{cases} \mu \times \text{sgn}(d_{i,j}) \times |d_{i,j} - \lambda_{d_{i,j}}| + (1 - \mu) \times \lambda_{d_{i,j}} \times \frac{\lg(|\lambda_{d_{i,j}}/d_{i,j}|)}{\lg 20}, & |d_{i,j}| \geq \lambda_{d_{i,j}}, \\ 0, & d_{i,j} < \lambda_{d_{i,j}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为阶跃函数; $\lambda_{d_{i,j}}$ 为 $d_{i,j}$ 的自定义参数。

4) 经过 NSST 分解后,不同层不同个数的高通系数的均值 $\hat{Y}_{i,j}$ 可表示为

$$\hat{Y}_{i,j} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{i,j}. \quad (15)$$

5) 经过 NSST 分解后,同一层上不同个数的高通系数的均值 \hat{Y}_i 可表示为

$$\hat{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n \hat{Y}_{i,j}}{n}, \quad n = 2^i + 2. \quad (16)$$

6) 经过 NSST 分解后,每个尺度的系数权重 α

可表示为

$$\alpha = \hat{Y}_{i,j} / \hat{Y}_i. \quad (17)$$

7) 融合 α 与 T_x , 计算自适应阈值 T 和 $d_{i,j}$, 表达式为

$$T = \alpha T_x, \quad (18)$$

$$d_{i,j} = \begin{cases} \hat{d}_{i,j}, & |d_{i,j}| \geq T \\ 0, & |d_{i,j}| < T \end{cases}. \quad (19)$$

高通子带的计算过程中首先使用 μ 对每个系数进行处理, 获取大于设定阈值的系数, 舍弃不满足要求的系数, 然后分别计算同层和不同层的系数均值, 使用 α 计算得到设定阈值, 最后采用改进后的自适应阈值算法对 V 分量的高通子带进行去噪处理。

3.2 低通子带改进算法

V 分量经过 NSST 处理后可以得到一个低通子带并对其进行对比度增强处理。文献[16]以 Retinex 理论为基础, 使用引导滤波器代替高斯滤波器可以减少光晕和伪影, 使图像看起来更自然, 并且能够保留更多的边缘信息, 但是图像的全局对比度低, 整体外观还有待提高。在文献[16]的框架中, 引入对比度增强因子 ξ 和自适应非线性偏移因子 β 并对其进行改进。低通子带改进算法的具体计算过程如下。

1) 计算局部适应输出值 $L_l(x, y)$, 表达式为

$$L_l(x, y) = \lg L_g(x, y) - \lg H_g(x, y), \quad (20)$$

式中: $L_g(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的全局适应输出值; $H_g(x, y)$ 为像素点 (x, y) 经过引导滤波后的输出值, 表达式为

$$H_g(x, y) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{(x,y) \in \omega} [aL_g(x, y) + b], \quad (21)$$

式中: ω 为以像素点 (x, y) 为中心, 半径为 r 的方形窗口; $|\omega|$ 为 $\omega(x, y)$ 的像素数; a 和 b 为线性系数。

2) 对比度增强因子 ξ 可表示为

$$\xi(x, y) = 1 + \gamma \frac{L_g(x, y)}{L_{g, \max}}, \quad (22)$$

式中: γ 为对比度控制参数; $L_{g, \max}$ 为 $L_g(x, y)$ 的最大亮度值。

3) 自适应非线性偏移因子 β 可表示为

$$\beta = \theta \bar{L}_g, \quad (23)$$

式中: θ 为非线性控制参数; \bar{L}_g 为 $L_g(x, y)$ 的对数平均亮度。

4) 引入因子后, 得到的局部自适应输出值为

$$L_{\text{out}}(x, y) = \xi(x, y) \lg \left[\frac{L_g(x, y)}{H_g(x, y)} + \beta \right]. \quad (24)$$

3.3 白平衡校正

处理完 V 分量的高通子带和低通子带后, 对其进行 NSST 逆变换可以得到重构的 V 分量, 利用白平衡对其进行校正优化可以提高图像的通透性, 表达式为

$$f(x) = \frac{(x - V_{\min}) \times 255}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad (25)$$

式中: V_{\min} 为最小亮度像素值; V_{\max} 为最大亮度像素值。尽可能地将 V 分量的像素映射到 $[0, 255]$ 区间中, 可以自动调整图像的对比度, 最后将图像转换到 RGB 空间中, 实验结束。

4 实验结果与分析

4.1 结果及主观评价

所提算法的改进主要体现在 V 分量经过 NSST 处理后的高通子带和低通子带上, 为了对算法进行验证, 采用三幅低照度图像进行测试, 对比分析 MSR 算法^[12]、GLOW 算法^[13]、文献[11]算法及所提算法的图像处理结果。为了客观地分析实验结果, 选择峰值信噪比 (PSNR)、特征相似度 (FSIM)、平均亮度 (L_{ave}) 和信息熵 (H) 4 种评判依据。PSNR 值越大则说明去噪效果越好; FSIM 表示图像的结构信息, 值越接近于 1 则增强算法越有效; L_{ave} 值越大, 说明图像越亮; H 表示图像中包含的信息量, 值越大则图像整体细节信息越多, 效果越好。

使用的实验平台为 3.6 GHz CPU, Win10 操作系统, 32 G RAM 的 PHILIPS 台式计算机, 主要仿真软件为 MATLAB 2019a。图 4 为不同算法处理后的结果, 图 5 为对应算法处理后的局部放大图。

从图 4 和图 5 可以看到, 经过 MSR 算法处理后的图像直观上比正常图像偏白, 阴影部分基本能够恢复, 但是细节部分复原的不够明显, 没有层次, 结果不自然; 经过 GLOW 算法处理后, 图像的亮度和色彩度都有所提高, 但是对于图像 3, 图像亮度分布不均, 去噪效果不明显; 经过文献[11]处理后, 图像整体比原图效果明显, 但是算法只是对色彩和饱和度进行增强, 并未对噪声进行处理, 导致带有噪声的图像经过复杂的算法处理后噪声被扩大; 所提算法结合去噪和增强算法的优点, 图像的整体效果更好。

4.2 客观评价

不同算法对不同图像的客观评价结果如表 1 所示, 评价指标曲线如图 6 所示。从表 1 和图 6 可以看到, 经过 MSR 算法处理后, L_{ave} 值大于其他三种

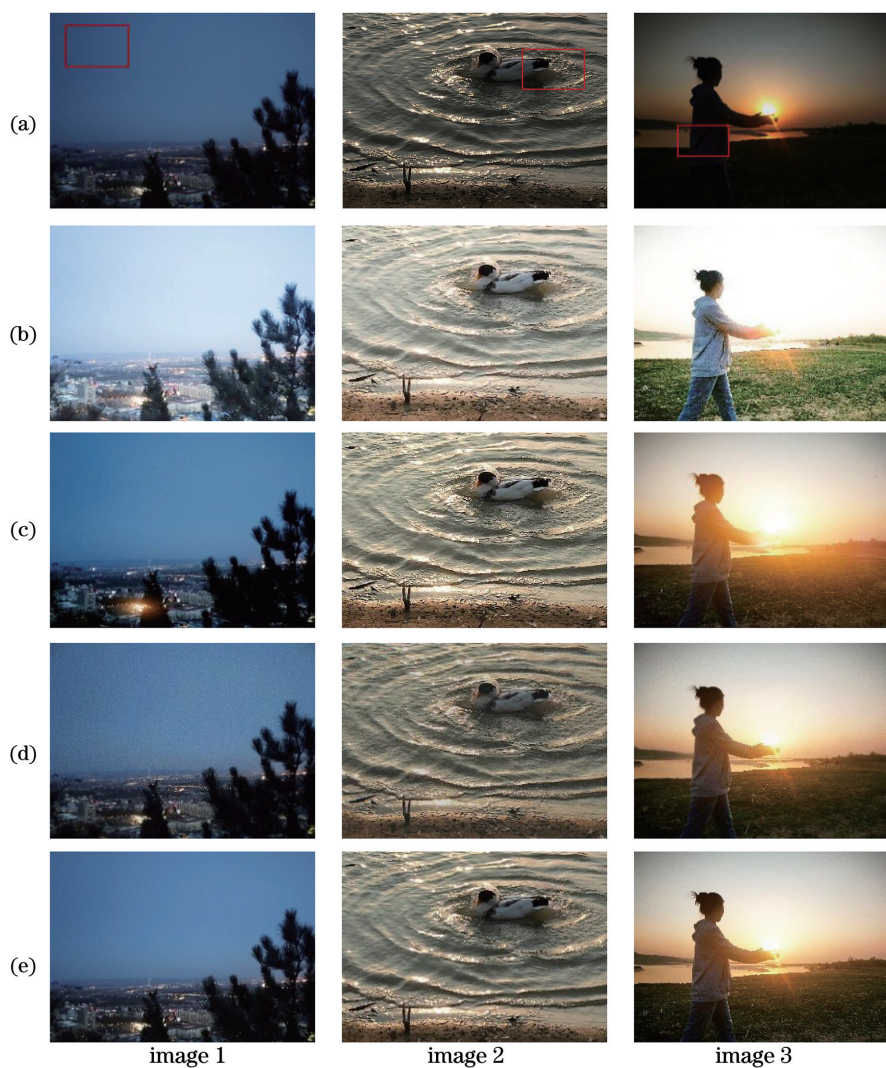


图 4 不同算法处理后的结果。(a)原始图像;(b) MSR 算法;(c) GLOW 算法;(d)文献[11];(e)所提算法

Fig. 4 Results after processing by different algorithms. (a) Original images; (b) MSR algorithm; (c) GLOW algorithm; (d) Ref. [11]; (e) proposed algorithm

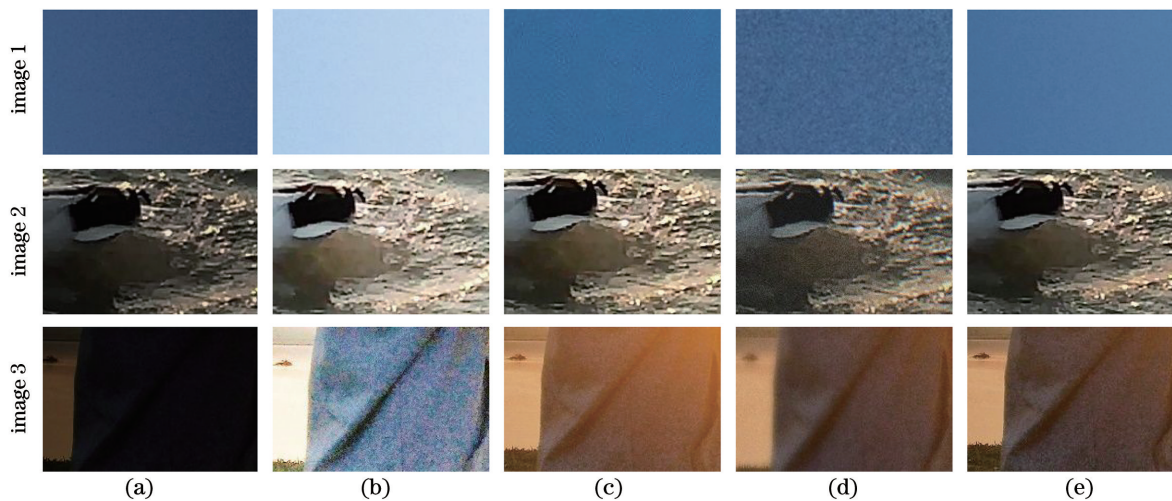


图 5 不同算法处理后的局部放大图。(a)原始图像;(b) MSR 算法;(c) GLOW 算法;(d)文献[11];(e)所提算法

Fig. 5 Local enlarged images after processing by different algorithms. (a) Original images; (b) MSR algorithm; (c) GLOW algorithm; (d) Ref. [11]; (e) proposed algorithm

表 1 不同算法对不同图像的客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results of different algorithms for different images

Image	Index	MSR	GLOW	Ref. [11]	Proposed algorithm
1	PSNR /dB	21.4962	21.8454	22.3981	27.5023
	FSIM	0.8675	0.7236	0.7103	0.8861
	$L_{ave}/(cd \cdot m^{-2})$	175.4940	109.9548	105.4461	112.6073
	H /bit	7.7613	7.8546	7.9542	8.0365
2	PSNR /dB	27.2697	28.0264	28.7148	30.0109
	FSIM	0.7720	0.7538	0.7505	0.8974
	$L_{ave}/(cd \cdot m^{-2})$	160.3239	105.9814	103.5840	103.9541
	H /bit	7.0844	7.1022	7.1549	7.6950
3	PSNR /dB	25.2992	25.6418	29.7791	33.8536
	FSIM	0.8366	0.8019	0.8227	0.9152
	$L_{ave}/(cd \cdot m^{-2})$	166.5690	120.4608	115.3352	110.5210
	H /bit	6.9632	7.2569	7.4351	7.8852

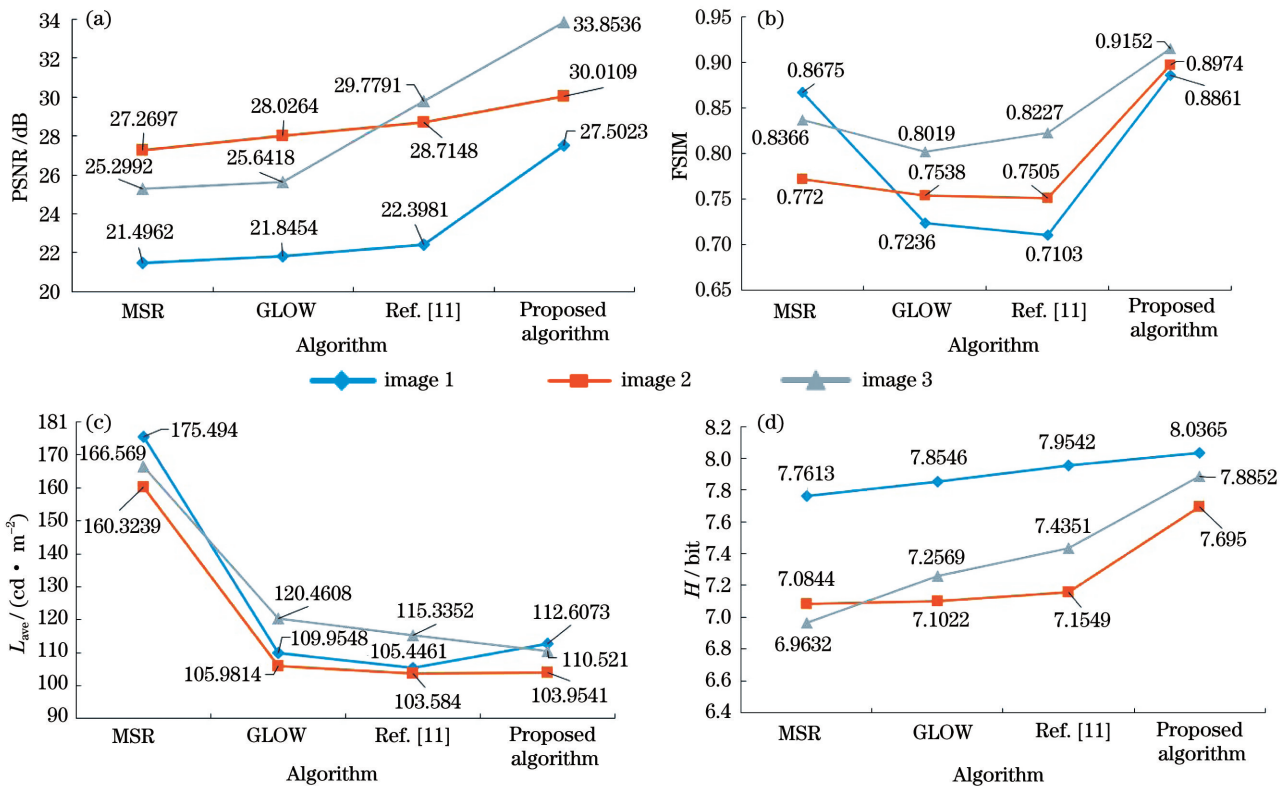


图 6 不同指标的评价统计曲线。(a)PSNR;(b)FSIM;(c) L_{ave} ;(d) H

Fig. 6 Evaluation statistical curves of different indexes. (a) PSNR; (b) FSIM; (c) L_{ave} ; (d) H

算法,所以图像整体显白色;相比于其他三种算法,所提算法的 PSNR 值明显提高,说明图像的去噪效果明显,可以增强亮度、色度和饱和度,FSIM 值更大,说明图像具有更全的细节信息。综上所述

述,相比于其他算法,所提算法可以更好地提高图像保真度,能够去除一定的噪声,保留并凸显图像的局部细节信息,从而提高图像质量,具有一定的实用价值。

5 结 论

传统的 NSST 算法存在一定的细节缺陷,不适用于直接处理低照度图像。针对这个问题,在 NSST 的框架中改进算法,对 HSV 空间的 V 分量进行分解,采用自适应阈值算法对高通子带进行去噪,这在一定程度上可以抑制噪声的干扰,采用自适应局部色调映射算法对低通子带进行对比度增强,这可以提高图像的细节特征信息,改善图像质量。实验结果表明,所提算法能够达到预期的效果,但是改进算法的处理过程相对复杂,未来在运算时间和效率上还有待优化。

参 考 文 献

- [1] Li L F, Sun R Y. Bridge crack detection algorithm based on image processing under complex background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 061002.
李良福, 孙瑞赞. 复杂背景下基于图像处理的桥梁裂缝检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 061002.
- [2] Ning R, Li C G, Lou Y L, et al. Matlab fast algorithm of computer generated holograms based on multi-graphic processing unit [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 050901.
宁冉, 李重光, 楼宇丽, 等. 基于多图像处理单元的 Matlab 计算全息图快速算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 050901.
- [3] Chen L, Yang F B, Wang Z S, et al. Research on fusion algorithm of infrared and visible imagery based on variational enhanced model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041003.
陈磊, 杨风暴, 王志社, 等. 红外与可见光图像的变分增强融合算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041003.
- [4] Land E H. The retinex theory of color vision [J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108-128.
- [5] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [6] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.
- [7] Rahman Z U, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4662: 390-401.
- [8] Lam E Y. Combining gray world and retinex theory for automatic white balance in digital photography [C]// *Proceedings of the Ninth International Symposium on Consumer Electronics*, 2005. (ISCE 2005), June 14-16, 2005, Macao, Macao, China. New York: IEEE, 2005: 134-139.
- [9] Li X M. Image enhancement algorithm based on retinex theory [J]. *Application Research of Computers*, 2005, 22(2): 235-237.
李学明. 基于 Retinex 理论的图像增强算法[J]. *计算机应用研究*, 2005, 22(2): 235-237.
- [10] Liu R J, Chen S Y, Zhang J J. The application of enhanced technology of infrared image based on retinex [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(4): 193-195.
刘瑞剑, 陈树越, 张甲杰. 多尺度 Retinex 算法在红外图像增强中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(4): 193-195.
- [11] Liu Q T. Research of the color image enhancement based on retinex algorithms [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
刘钦堂. 基于 Retinex 算法的彩色图像增强研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [12] Liu J, Guo X, Xu X L, et al. Low illumination image enhancement technique based on retinex theory [J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(9): 139-143.
刘健, 郭潇, 徐鑫龙, 等. 基于 Retinex 理论的低照度图像增强技术[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(9): 139-143.
- [13] Zheng M. Image dehazing and detuning algorithm based on Retinex theory [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2020, 10(2): 93-96.
郑敏. 基于 Retinex 理论的图像去雾去噪算法[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(2): 93-96.
- [14] Hu J F, Zhang X Z, Yang C J. Cloud detection of RGB color remote sensing images based on improved M-net [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 162804.
胡敬锋, 张秀再, 杨昌军. 基于改进 M 型卷积网络的 RGB 彩色遥感图像云检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(16): 162804.
- [15] Xu P. Study on image enhancement based on retinex theory [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
胥培. 基于 Retinex 理论图像增强研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
- [16] Shan Q, Jia J Y, Brown M S. Globally optimized linear windowed tone mapping [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2010, 16(4): 663-675.