

改进多尺度的Retinex红外图像增强

魏然然, 詹伟达, 朱德鹏, 田永

引用本文:

魏然然, 詹伟达, 朱德鹏, 等. 改进多尺度的Retinex红外图像增强[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 465–474.

WEI Ran-ran, ZHAN Wei-da, ZHU De-peng, et al. Improved multi-scale Retinex infrared image enhancement[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 465–474.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0109>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

结合分数阶微分及Retinex的NSCT自适应低照度图像增强

NSCT adaptive low illumination image enhancement combining fractional differential and Retinex

液晶与显示. 2020, 35(4): 360–373 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203504.0360>

尺度变化的Retinex红外图像增强

Infrared image enhancement method based on scale varies Retinex theory

液晶与显示. 2016, 31(1): 104–111 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163101.0104>

基于全局和局部多特征的图像增强算法

Image enhancement algorithm based on global and local multi features

液晶与显示. 2020, 35(5): 508–512 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0508>

基于广义线性系统和非锐化掩膜的图像增强算法

Image enhancement algorithm based on generalized linear system and unsharp masking

液晶与显示. 2016, 31(10): 973–982 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163110.0973>

基于双边滤波的多尺度分层色调映射算法

Bilateral filter based multiscale layer tone mapping algorithm

液晶与显示. 2018, 33(9): 816–822 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0816>

文章编号:1007-2780(2021)03-0465-10

改进多尺度的 Retinex 红外图像增强

魏然然, 詹伟达*, 朱德鹏, 田 永

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为了解决传统的多尺度 Retinex 算法在对红外图像细节增强时产生光晕现象和增强图像噪声等问题,提出一种改进引导滤波器的多尺度 Retinex 的红外图像细节增强算法。首先,采用改进的引导滤波器代替高斯滤波器对红外图像进行入射分量的精确估计,并计算出其反射分量,以减少图像中的噪声,改善光晕现象。其次,对入射分量进行自适应性灰度拉伸处理,对反射分量采用较平缓的非线性曲线进行校正,以达到更好地增强红外图像总体亮度和对比度的目的。实验结果表明:本文算法与其他算法相比信息熵、峰值信噪比、平均梯度、标准差都有一定的改善,同时该算法所得到的红外增强图像的对比度更高,细节信息更丰富,人眼视觉效果更好。

关键词: 红外图像增强; 多尺度 Retinex; 引导滤波; 反射分量

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0109

Improved multi-scale Retinex infrared image enhancement

WEI Ran-ran, ZHAN Wei-da*, ZHU De-peng, TIAN Yong

(*Department of Electronic Information Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: In order to solve the problems of halo phenomenon and image noise enhancement when the traditional multi-scale Retinex algorithm enhances the details of infrared images, an infrared image detail enhancement algorithm based on improved multi-scale Retinex is proposed. Firstly, an improved guided filter is used instead of the Gaussian filter to accurately estimate the incident component of the infrared image and calculate its reflection component to reduce the noise in the image and improve the halo phenomenon. Secondly, an adaptive grayscale stretching process is performed on the incident component, and a smoother non-linear curve is used to correct the reflected component, so as to achieve the purpose of better enhancing the overall brightness and contrast of the infrared image. The experimental results show that compared with other corresponding algorithms, the information entropy, peak signal-to-noise ratio, average gradient, and standard deviation have been improved. At the same time, the infrared enhanced image obtained by this algorithm has higher contrast and clearer details. The human eyes have better visual effects.

Key words: infrared image enhancement; multi-scale Retinex; guided filtering; reflection component

收稿日期:2020-07-28; 修订日期:2020-10-16.

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(No.JJKH20200783KJ)

Supported by “13th Five Year Plan” Scientific Research Program of Jilin Provincial Department of Education(No.JJKH20200783KJ)

* 通信联系人, E-mail: 40946711@qq.com

1 引言

近年来,红外成像系统由于具有良好的隐蔽性、较强的抗干扰能力以及可昼夜工作等特点而被广泛应用在军事和民用领域^[1-3]。红外图像在获取时由于受到红外成像系统器件性能及波长等因素的影响,常常会表现出对比度较低、边缘细节不突出、视觉效果模糊等缺点^[4]。这些缺点将严重影响到后续红外图像的观察、目标识别和目标探测等工作。因此,利用红外图像增强算法增强图像对比度、细节等已成为一种必不可少的图像处理操作。

常用的红外图像处理算法包括空域算法和频域算法。空域算法包括直方图均衡化算法和灰度变换等;频域算法包括傅里叶变换、小波变换、Culvelet 变换和 Contourlet 变换等^[5]。虽然这些算法都可以或多或少地对红外图像进行增强,但也存在一些缺点,如直方图均衡化算法和灰度变换在对红外图像增强的同时会放大噪声。Land 等人首次提出 Retinex 理论,Retinex 理论是一种非线性算法,其处理红外图像时可以在保留细节信息的同时降低图像噪声^[6]。在 Land 的理论基础上,Jobson 等人提出了一种单尺度的 Retinex 算法(SSR),因为该方法只有一个参数,故其不能很好地兼顾动态范围压缩和色感一致性^[7]。为了改进 SSR 算法,Rahman 等人随后提出了多尺度 Retinex 算法(MSR)^[8]。在该算法的基础上研究者们提出了一系列的改进算法。刘辉等人改进传统 MSR 算法,将算法中的指数用灰度线性拉伸代替,该算法虽然可以提高图像的对比度,改善图像的视觉效果,但其在操作过程中会扩大图像噪声,同时产生“光晕”现象^[9]。张承泓等人使用自适应引导滤波器代替 MSR 算法中的高斯滤波器,该改进算法可以较好地去除图像中的“光晕”和噪声^[10]。本文在前人研究的基础上,将改进引导滤波器模型使用到传统 MSR 算法中,以提出一种新的红外图像增强算法。

2 基础理论

2.1 多尺度 Retinex 理论

根据多尺度 Retinex 理论,一幅红外图像

$I(x, y)$ 可以由入射分量 $L(x, y)$ 和反射分量 $R(x, y)$ 乘积得到,其数学表达式如下所示:

$$I(x, y) = L(x, y)R(x, y) \quad (1)$$

对式(1)两边同时取对数可得:

$$\begin{aligned} \ln I(x, y) &= \ln(L(x, y)R(x, y)) = \\ &= \ln L(x, y) + \ln R(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

当 $L(x, y) = I(x, y) * G(x, y)$ 时,反射分量可表示为:

$$\begin{aligned} \ln R(x, y) &= \ln I(x, y) - \\ &= \ln(I(x, y) * G(x, y)) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $*$ 表示卷积运算, $G(x, y)$ 为高斯滤波函数,其定义为:

$$G(x, y) = \lambda \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\delta^2}\right) \quad (4)$$

式中, λ 为满足时的归一化常数, δ 为环绕参数。

式(3)又被称为单尺度 Retinex 算法(SSR)。由式(3)和式(4)可以看出,SSR 只有单一的参数 δ ,该算法不能同时兼顾动态范围压缩和色感一致性。为了解决这一问题,研究者们提出了多尺度 Retinex 算法(MSR),其主要思想是对每个尺度的 SSR 结果进行不同权重的加权平均,其数学表达式为:

$$\begin{aligned} \ln R(x, y) &= \sum_{i=1}^N \omega_i (\ln I(x, y) - \\ &= \ln(I(x, y) * G(x, y))) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, N 是环绕尺度数量, ω_i 是不同尺度的权值,且满足 $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$,通常情况下, $N=3$,即 MSR 算法对红外图像采用大、中、小 3 个尺度进行加权平均。

2.2 引导滤波

引导滤波器可以对图像进行线性滤波,其具有一定的边缘保持特性^[11]。其数学模型如下:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (6)$$

式中, q_i 为输出图像; I_i 为引导图像; i, k 表示像素索引; ω_k 为半径为 r 的局部方形窗口; a_k 和 b_k 为 ω_k 对应的线性系数。

对式(6)两边同时求梯度可得:

$$\nabla q_i = a \nabla I_i \quad (7)$$

式中, a 为常数。

由式(7)可以看出 q_i 与 I_i 具有相似的边缘梯度,而 I_i 的边缘平滑程度取决于 a_k 。为了确定其值,需要使 q_i 与 p_i 的差异最小,则其代价函数如

下所示^[10]:

$$E(a_k + b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2), \quad (8)$$

式中, ϵ 为防止 a_k 和 b_k 过大的正则化因子。

利用线性回归法求解式(8)取最小值时, a_k 和 b_k 的值为:

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \sum_{i \in \omega_k} p_i}{\delta_k^2 + \epsilon}, \quad (9)$$

$$b_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i - a_k \mu_k, \quad (10)$$

式中, $|\omega|$ 为 ω_k 中像素的数量; δ_k 和 μ_k 为 ω_k 中 I_i 的标准差和均值。

假设 $I_i = p_i$, 则式(9)和式(10)可化为:

$$a_k = \frac{\delta_k^2}{\delta_k^2 + \epsilon}, \quad (11)$$

$$b_k = \mu_k (1 - a_k). \quad (12)$$

对式(6)、式(11)、式(12)进行分析可得, 当 $\epsilon = 0$ 时, $a_k = 1$, $b_k = 0$, 故此时图像保持不变; 当 $\epsilon \gg \delta_k$ 时, $a_k \approx 0$, $b_k \approx \mu_k$, $q_i \approx \mu_k$, 故当 ω_k 处于低方差区域时, 原始图像得到了平滑处理; 当 $\epsilon \ll \delta_k$ 时, $a_k \approx 1$, $b_k \approx 0$, $q_i \approx I_i$, 故当 ω_k 处于高方差区域时, 图像可以进行边缘保持操作。由以上操作可以看出, ϵ 大小可以决定图像被平滑的程度, 故 ϵ 又被称为平滑因子, 对比高斯滤波的特点, 引导滤波器也有决定其大小的尺度因子 s 。

3 本文算法

红外图像在获取时由于受到红外成像系统器件性能及波长等因素的影响, 常常会出现对比度较低、边缘细节不突出、视觉效果模糊等缺点。传统的 MSR 在解决这些问题时, 会出现光晕现象和放大噪声等问题。为了解决这些问题, 本文提出一种改进的 MSR 算法对红外图像进行图像增强。设待增强的红外图像为 $F(x, y)$, 增强后的红外图像为 $f(x, y)$, 改进引导滤波器输出的入射分量为 $L(x, y)$, 经过 MSR 计算得到的反射分量为 $R(x, y)$, 增强后的入射和反射分量分别为 $l(x, y)$ 和 $r(x, y)$, 其具体算法实现框图如图 1 所示。

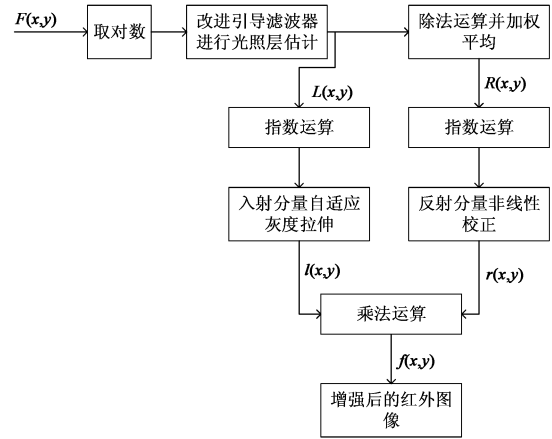


图1 本文算法实现框图

Fig.1 Algorithm block diagram of this paper

3.1 入射分量估计

传统多尺度 Retinex 算法在图像边缘发生跃变处, 不能精确估计光照分量即反射分量, 进而产生“光晕”现象。为了解决这一问题, 本文采用具有保边平滑的改进引导滤波器代替传统的高斯滤波器对光照层进行精确估计。

引导滤波器与高斯滤波器相比, 虽然可以改善图像中的“光晕”现象, 但其每个窗口对权重的取值均相同, 没有考虑每个窗口的灰度差异。针对这一不足, 对引导滤波器进行改进, 具体方法为: 首先计算窗内每个像素点的均值、标准差、平均梯度来作为该点特征, 然后根据第 k 次的该点特征来求得权重值, 最后对输出的引导图像加权平均。

图像像素点的均值、标准差、平均梯度定义如下:

$$\mu_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n I(i, j), \quad (13)$$

$$\delta_k = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (I(i, j) - \mu)^2}, \quad (14)$$

$$\text{grad}_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sqrt{\frac{(\frac{\partial I}{\partial x})^2 + (\frac{\partial I}{\partial y})^2}{2}}, \quad (15)$$

式中, i, j 为像素索引, $m \times n$ 为窗口内像素总数, $I(i, j)$ 为引导图像, μ 为窗内像素均值, $\frac{\partial I}{\partial x}$ 为引导图像的水平梯度, $\frac{\partial I}{\partial y}$ 为引导图像的垂直梯度。

则权重值为:

$$\omega_k = \frac{U_k(i, j)}{\sum_{i=1}^3 U_k(i, j) + \epsilon}, \quad (16)$$

$$U_k(i, j) = \mu_k^\alpha \times \delta_k^\beta \times \text{grad}_k^\gamma, \quad (17)$$

式中, $U_k(i, j)$ 为质量测度, 其由上述均值、标准差、平均梯度的一个或多个组成。对不同图像进行处理时, 其侧重点不同, α, β, γ 取值不同。 α, β, γ 其值可以为 0 或 1。当 α, β, γ 中一个或两个为 0 时, 说明图像的质量测度不采用此特性; 当 α, β, γ 其中一个或全部为 1 时, 表明此特性占有很大权重, 图像的质量测度采取此特性。 ϵ 为一个很小的正数。

改进引导滤波输出图像为:

$$L(i, j) = \sum_{k=1}^3 [\omega_k \times L_k(i, j)], \quad (18)$$

式中, $L_k(i, j)$ 为 3 次引导滤波对应的输出图像。

将原始图像 F 和引导图像 I 通过改进引导滤波器处理后得到输出图像即入射图像 L 为:

$$L = L(F, I), \quad (19)$$

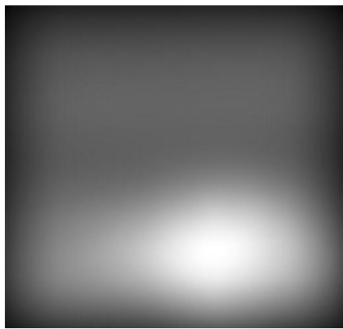
式中, $L(\cdot)$ 为改进引导滤波器操作。

为了验证本文改进引导滤波器的优越性, 使用本文改进引导滤波器与传统高斯滤波器处理估计得到的入射分量图像, 如图 2 所示(高斯滤波



(a) 原图

(a) Origin image



(b) 传统高斯滤波器估计

(b) Traditional Gaussian filter estimation



(c) 改进的引导滤波器估计

(c) Improved guide filter estimation

图 2 入射分量估计结果对比图

Fig.2 Comparison of estimated results of incident components

器参数选择: 尺度因子取值为 80; 引导滤波参数选择: 尺度因子为 80, 平滑因子取值为 0.002)。根据图 2 可以看出, 本文改进的引导滤波器可以更准确地对入射分量进行估计。

3.2 入射分量自适应灰度拉伸

为了更好地提高入射分量的全局对比度, 本文使用全局直方图均衡化来实现对入射分量的自适应灰度拉伸。对入射图像进行归一化处理后的分布函数为:

$$P(L_k) = \frac{n_k}{n}, k=0, 1, \dots, N-1, \quad (20)$$

式中, L_k 为第 k 级像素的像素值, n_k 为第 k 级像素的个数, n 为像素总数, N 为最大像素级。

若原入射分量的像素值为 L , 直方图均衡化后的像素值为 l , 则其灰度变换公式为:

$$l_k = \sum_{i=0}^k p(L_i) = \sum_{i=0}^k \frac{n_i}{n}, k=0, 1, \dots, N-1, \quad (21)$$

式中, L_i 表示第 i 级像素的原像素值, $p(L_i)$ 表示 L_i 的概率。

根据以上理论, 用 MATLAB 对图 2(c) 进行入射分量自适应灰度拉伸, 结果如图 3 所示。

3.3 反射分量非线性校正

反射分量中包含丰富的细节信息, 但在其输出时, 总体的亮度偏暗, 对比度较低。为了调节反射分量的对比度, 增强人眼视觉效果, 大多数学者选择使用 gamma 曲线进行校正, 但该校正方法容易产生过增强的现象。为了解决这一问题, 本文使用以下非线性公式对其进行校正, 具体公式

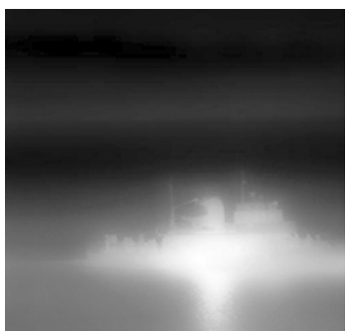


图3 图2(c)入射分量自适应灰度拉伸结果图

Fig.3 Result of adaptive grayscale stretching of incident component of Fig.2(c)

如下:

$$r = \frac{\ln(R_N + t) - \ln(t)}{\ln(t + 1) - \ln(t)}, \quad (22)$$

$$R_N = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, \quad (23)$$

式中, r 为校正后的反射分量, R_N 为归一化后的反射分量, R 为原始反射分量, $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 分别为 R 中像素最小值和最大值, t 为调整参数。

在本次实验中,当 t 取值为 0.1, gamma 曲线参数取值为 0.3。如图 4 所示,本文非线性校正曲线与 gamma 曲线校正相比, gamma 曲线在低像素区域会出现拉伸过大的情况,进而导致细节信息出现过增强。本文校正曲线相对比较缓和,既可以很好地对图像中的细节信息进行图像增强,又可以避免图像失真。

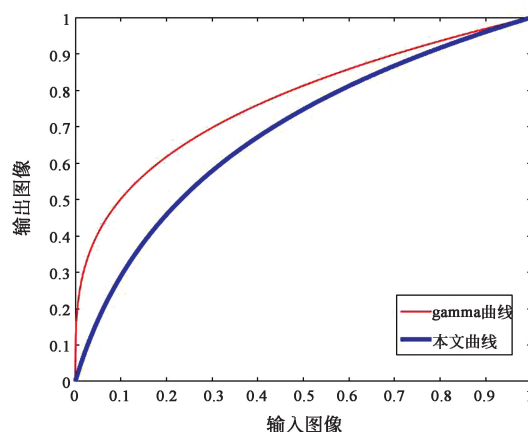


图4 本文曲线与 gamma 曲线对比图

Fig.4 Comparison between the curve in this paper and gamma curve

4 实验结果与分析

为了验证本文算法,选取 4 个红外图像场景进行对比实验(红外图像取自 OTCBVS 数据集)。首先,分别对这 3 个场景(如图 5 所示)使用直方图均衡化算法(HE)、单尺度 Retinex 算法(SSR)、多尺度 Retinex 算法(MSR)、基于引导滤波器的多尺度 Retinex 算法(未改进引导滤波 + MSR)、文献[10]、本文算法来进行红外图像的增强;然后,通过对增强后的红外图像进行客观和主观评价来验证本文算法的优越性和可行性。本文所有算法均使用 Matlab R2016b 编译环境进行



图5 用于测试的 4 个不同场景的红外图像

Fig.5 Infrared images of 4 different scenes for testing

编程实现(DELL 系列电脑,操作系统为 Windows7,CPU 为 3.1 GHz,内存为 4 GB)。本文算法的改进引导滤波器选用 3 个尺度,其相应窗口大小分别为 20、70、115;SSR 选择的参数 $\sigma = 80$;MSR 选取 3 个尺度,每个尺度的高斯滤波参数为 $\sigma_1 = 20$, $\sigma_2 = 80$, $\sigma_3 = 110$,且本文中所有的多尺度 MSR 均采用相同的 3 个尺度。

4.1 主观评价

本文对选取的 3 幅场景进行不同算法比较,结果如图 6~8 所示。

由图 6~8 可以看出,HE 算法对红外图像的对比度、亮度、边缘都有一定的增强。但图 6、7 中后面的背景细节信息严重丢失,图 8 中的船和人细节信息丢失。同时,图 6~8 中的噪声也很严重。SSR 算法对红外图像中的亮度的到明显增强,但其增强图像的对比度较差,且有些地方产生了“光晕”现象,人眼视觉效果较差。图 6 中的左边飞机场窗口出现“光晕”。MSR 算法增强的红外图像亮度有一定提高,“光晕”现象有所改善,但其对比度较低,部分背景信息丢失,红外图像整体

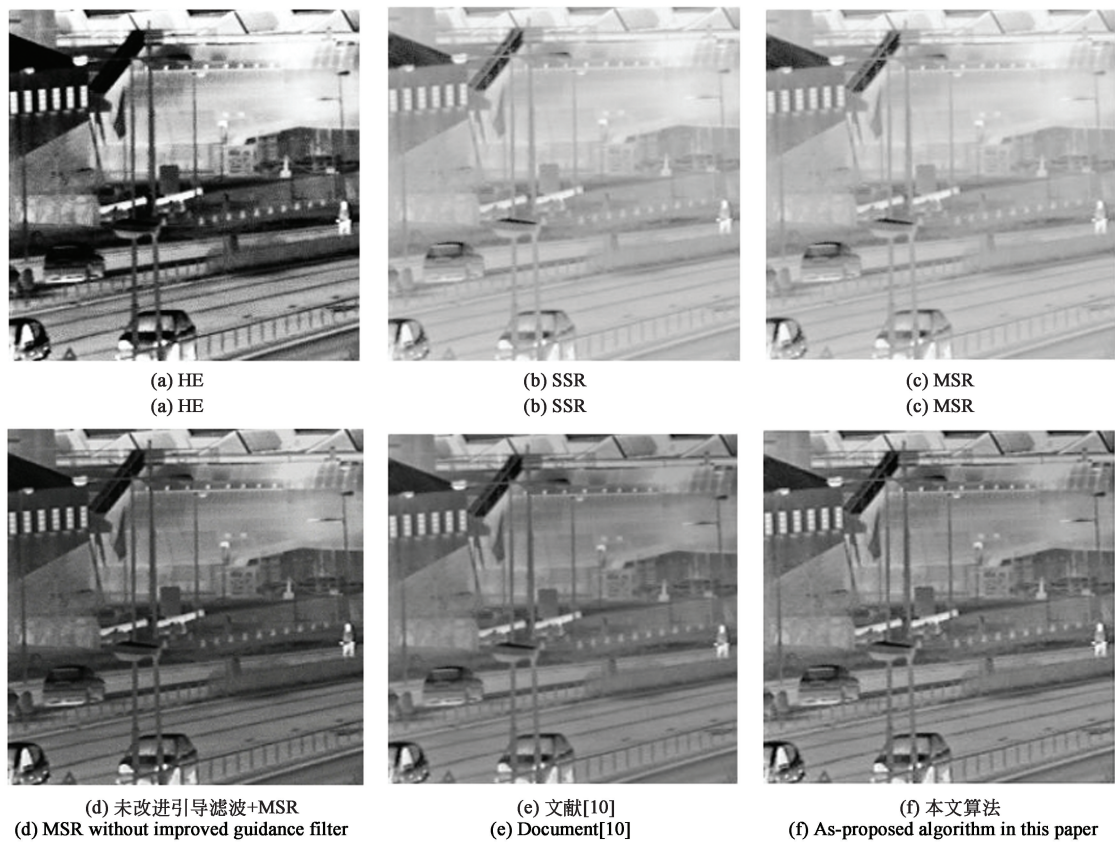


图 6 场景 1 的各个算法比较实验结果

Fig.6 Comparison experimental results of various algorithms in scene 1.



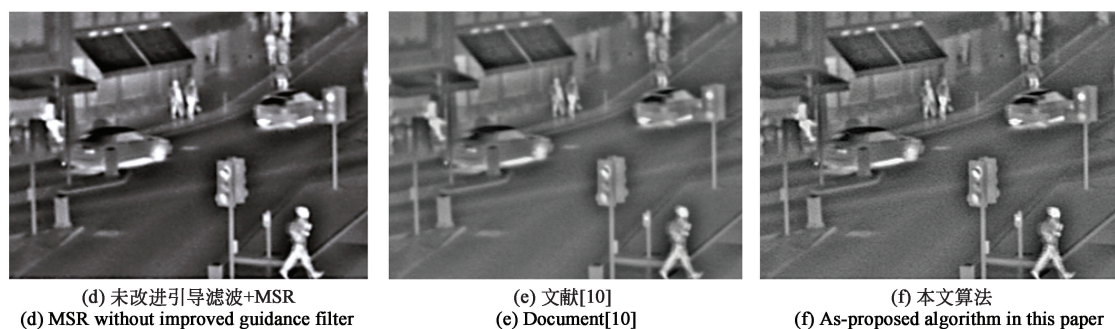


图7 场景2的各个算法比较实验结果

Fig.7 Comparison experimental results of various algorithms in scene 2.

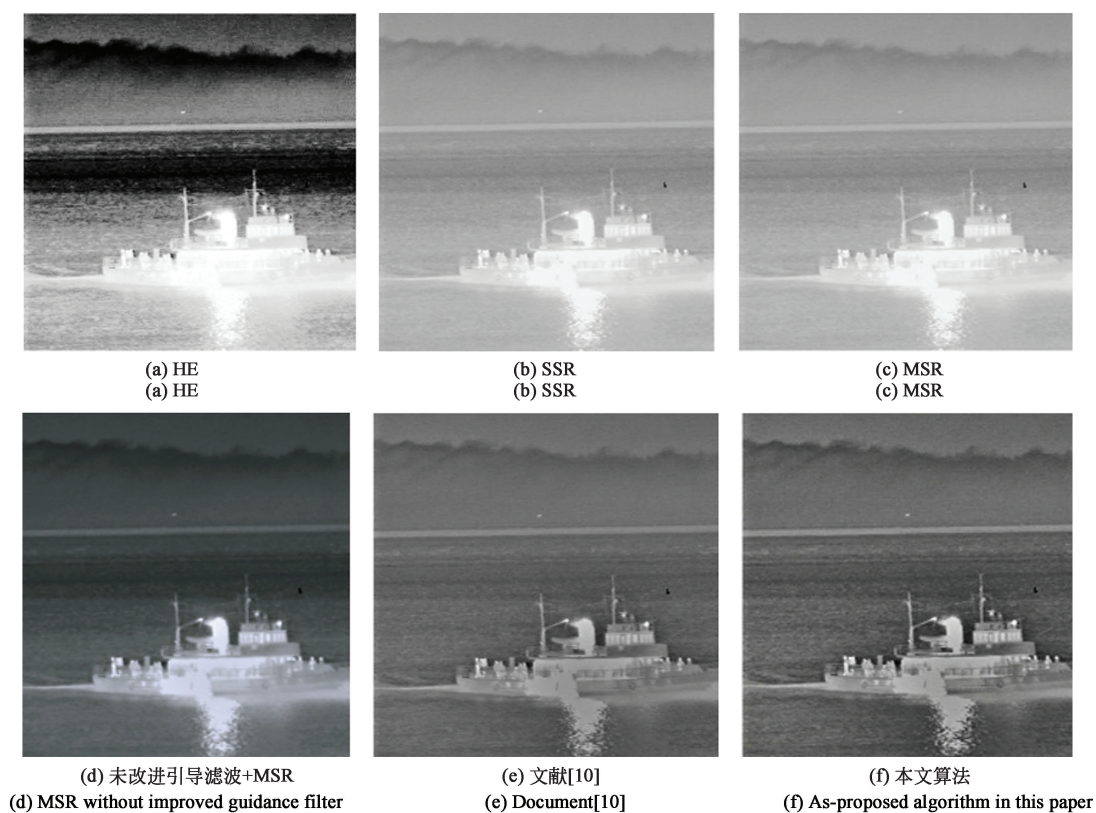


图8 场景3的各个算法比较实验结果

Fig.8 Comparison experimental results of various algorithms in scene 3.

视觉较差。图6和图7背景模糊,部分细节信息丢失。未改进的引导滤波器+MSR算法增强的红外图像边缘清晰度高,亮度有所增强,但其整体图像效果比较模糊,如图6和图8所示。文献[10]所得图像效果相对前面几种算法亮度有一定提升,有效改善了图像中的“光晕”现象,但其主要细节信息有所丢失。本文算法在有效去除“光晕”现象的同时,很好地提升了图像的对比度、细节和

清晰度等,人眼整体视觉效果较好。

4.2 客观评价

为了进一步验证本文算法的有效性,本文选用图像标准差(SD)^[12]、平均梯度(AVG)^[13]、峰值信噪比(PSNR)^[14]、信息熵(IE)^[15]客观指标对增强的红外图像进行定量评价。

对以上3个场景分别进行客观指标评价,结果如表1~3所示。

表 1 场景 1 不同算法所得红外增强图像的客观评价指标

Tab.1 Objective evaluation indicators of infrared enhanced images obtained by different algorithms in scene 1

算法	SD	AVG	PSNR	IE
HE	74.798 0	0.051 0	11.007 8	5.899 3
SSR	43.633 6	0.037 8	6.846 5	5.944 9
MSR	43.612 6	0.037 8	6.844 9	5.945 7
未改进引导滤波+MSR	20.463 6	0.021 3	15.560 4	6.187 4
文献[10]	70.291 8	0.078 1	29.192 8	6.982 3
本文算法	80.723 9	0.093 7	38.327 9	7.177 1

表 2 场景 2 不同算法所得红外增强图像的客观评价指标

Tab.2 Objective evaluation indicators of infrared enhanced images obtained by different algorithms in scene 2

算法	SD	AVG	PSNR	IE
HE	74.779 6	0.024 5	11.491 8	5.821 2
SSR	17.642 2	0.006 8	6.560 7	5.941 9
MSR	17.631 6	0.006 8	6.560 0	5.940 7
未改进引导滤波+MSR	27.444 8	0.010 5	19.722 2	6.603 9
文献[10]	56.328 2	0.057 8	37.283 0	7.028 3
本文算法	60.263 7	0.086 8	43.237 4	7.254 6

表 3 场景 3 不同算法所得红外增强图像的客观评价指标

Tab.3 Objective evaluation indicators of infrared enhanced images obtained by different algorithms in scene 3

算法	SD	AVG	PSNR	IE
HE	75.047 5	0.021 7	12.562 7	5.693 3
SSR	26.835 6	0.007 0	10.259 0	6.352 4
MSR	26.783 6	0.007 1	10.257 4	6.329 5
未改进引导滤波+MSR	18.573 0	0.012 2	18.720 9	6.603 9
文献[10]	56.289 3	0.046 7	30.283 1	6.787 8
本文算法	69.134 7	0.077 8	37.382 9	7.011 9

由表 1~3 可以看出:本文算法并不能同时兼顾 SD、AVG、PSNR、IE,但本文算法相对其他算法相对占优。HE 算法所得红外增强图像的标准差较高,但其得到的增强图像细节信息丢失,边缘模糊。本文算法处理得到的红外图像与 SSR、MSR、未改进引导滤波器+MSR 算法、文献[10]相比平均梯度(AVG)、信息熵(IE)较高,表明本文算法增强后的红外图像有更加丰富的信息量,图像更清晰。同时本文算法处理后的图像峰值信

噪比(PSNR)较高,表明增强后的图像去除噪声更彻底,整体处理效果更好,对比度更强,人眼整体视觉效果更好。综上可以看出本文算法红外图像增强效果较好,且具有可行性和优化性。

5 结 论

本文提出一种基于改进多尺度 Retinex 的红外图像细节增强算法。该算法实验结果表明:利用

改进引导滤波器代替高斯滤波器对入射分量进行精确估计,解决了原始算法放大噪声及产生“光晕”等问题;对反射分量进行校正时,使用一种平缓的非线性曲线代替常用的 gamma 曲线进行校正,解

决了图像过增强问题,进一步提高了反射图像细节信息。同时,本文算法与 HE、SSR、MSR、引导滤波+MSR 算法相比,对红外图像的对比度、细节信息、人眼视觉效果都有很好的增强效果。

参 考 文 献:

- [1] CAO Y P, YANG M Y, TISSE C L. Effective strip noise removal for low-textured infrared images based on 1-D guided filtering [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, 26(12): 2176-2188.
- [2] LIU C W, SUI X B, LIU Y, *et al.* FPN estimation based nonuniformity correction for infrared imaging system [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96(8): 22-29.
- [3] 占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法 [J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2788-2793.
ZHAN B C, WU Y Q, JI S X. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2788-2793. (in Chinese)
- [4] WANG A B, CHEN L L, LIU Y Z. New results on contrast enhancement for infrared images [J]. *Optik*, 2019, 178: 1264-1269.
- [5] 郝宇, 王新赛, 张彦波, 等. 基于自适应尺度因子的 Retinex 红外图像增强算法 [J]. *红外技术*, 2016, 38(10): 855-859.
HAO Y, WANG X S, ZHANG Y B, *et al.* The infrared image enhancement algorithm based on adapted scale factor Retinex [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(10): 855-859. (in Chinese)
- [6] LAND E H, MCCANN J J. Lightness and retinex theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [7] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [8] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL 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.
- [9] 刘洋, 余建华, 顾志芹, 等. 一种改进型增强图像处理算法研究与应用 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(3): 381-384.
LIU Y, YU J H, GU Z Q, *et al.* Research and application of an improved enhanced image processing algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(3): 381-384. (in Chinese)
- [10] 张承泓, 李范鸣, 吴滢跃. 基于自适应引导滤波的子带分解多尺度 Retinex 红外图像增强 [J]. *红外技术*, 2019, 41(4): 323-328.
ZHANG C H, LI F M, WU Y Y. Infrared image enhancement based on adaptive guided filter and sub-band decomposed multi-scale Retinex [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(4): 323-328. (in Chinese)
- [11] 栾孟杰. 一种多分辨多尺度的红外图像增强算法 [J]. *激光杂志*, 2019, 40(8): 81-84.
LUAN M J. A multiresolution and multiscale infrared image enhancement algorithm [J]. *Laser Journal*, 2019, 40(8): 81-84. (in Chinese)
- [12] 宋玉, 夏振平, 胡伏原, 等. 基于人因的液晶显示动态图像质量研究 [J]. *液晶与显示*, 2020, 35(10): 1051-1058.
SONG Y, XIA Z P, HU F Y, *et al.* Moving image quality of liquid crystal display based on human factor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1051-1058. (in Chinese)
- [13] ASHIBAM I, TOLBA M S, EL-FISHAWY A S, *et al.* Gamma correction enhancement of infrared night vision images using histogram processing [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(19): 27771-27783.
- [14] 赵晨, 吕国强, 吴磊, 等. 基于图像局部亮度的液晶显示器动态调光算法 [J]. *液晶与显示*, 2020, 35(3): 234-241.
ZHAO C, LV G Q, WU L, *et al.* Dynamic dimming algorithm for liquid crystal display based on local brightness of image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(3): 234-241. (in Chinese)
- [15] 程亚亚, 于化东, 于占江, 等. 微铣刀同轴全息图像增强方法 [J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 705-712.
CHENG Y Y, YU H D, YU Z J, *et al.* Method of enhancing the quality of in-line holographic images for micro-

milling tool [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 705-712. (in Chinese)

作者简介:



魏然然(1995—),女,河南商丘人,硕士研究生,2018 年于长春理工大学获得学士学位,主要从事红外图像增强方面的研究。E-mail:1603409002@qq.com



詹伟达(1979—),男,吉林长春人,博士,教授,2011 年于长春理工大学获得博士学位,主要从事红外成像技术方面的研究。E-mail:40946711@qq.com