

低频重分布与边缘增强的红外图像增强算法

邓春华¹, 周勇²

- (1. 江西应用科技学院软件与区块链学院, 江西 南昌 330100;
2. 江西师范大学计算机信息工程学院, 江西 南昌 330027)

摘要: 针对现有的红外图像增强方法存在欠增强、过增强以及微小细节丢失等缺陷, 提出了低频重分布与边缘增强的红外图像增强算法。用基于改进引导滤波的 Retinex 将红外图像分解为低频和高频图像。为了充分利用像素级的动态空间, 对低频图像进行均匀重分布, 以提升图像的亮度和清晰度; 用提出的方向梯度算子对高频图像进行边缘提取, 再对高频图像进行边缘增强, 进一步提升图像的对比度。将经增强处理的低频和高频图像作 Retinex 反变换, 得到增强效果的红外图像。实验结果显示, 相对于部分现有方法, 本文方法的增强图像的信息熵和 Brenner 指数更高, 而 NIQE 指数更小, 因此本文方法能更有效地提升红外图像的对比度, 在增强图像纹理细节的同时更好地保持图像的自然度。

关键词: 引导滤波; 红外图像增强; 低频重分布; 边缘增强

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.022

Infrared image enhancement algorithm based on low frequency redistribution and edge enhancement

DENG Chun-hua¹, ZHOU Yong²

- (1. School of Software and Blockchain, Jiangxi University of Applied Science, Nanchang 330100, China;
2. School of Computer Information Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China)

Abstract: To address the shortcomings of existing infrared image enhancement algorithms such as under-enhancement, over-enhancement and loss of small details, an infrared image enhancement algorithm based on low frequency redistribution and edge enhancement is proposed. The infrared image is decomposed into low-frequency and high-frequency images by Retinex based on improved guided filtering. In order to take full advantage of the dynamic space of pixel level, the low-frequency image is uniformly redistributed to improve the brightness and clarity of the image; and the proposed directional gradient operator is used to extract the edge of the high-frequency image, with which the edge of the high-frequency image is enhanced, so as to further improve the contrast of the image. The enhanced infrared image is obtained by the Retinex inverse transformation of the enhanced low-frequency and high-frequency images. The experimental results show that compared with some existing methods, the information entropy and Brenner index of the enhanced image are higher, and the NIQE index is smaller, so the method is more effective in improving the contrast of infrared image and better enhancing the texture details of the image while maintaining the naturalness of the image.

Keywords: guided filtering; infrared image enhancement; low frequency redistribution; edge enhancement

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61562063); 江西省教育科学“十四五”规划项目 (No. 21YB286) 资助。

作者简介: 邓春华 (1975 -), 男, 硕士, 副教授, 系统分析师, 研究方向为图像处理与计算机软件技术。

E-mail: hongkongu@163.com

收稿日期: 2022-03-16

1 引言

红外成像具有隐蔽性好和抗干扰性能强等优点,广泛应用于军事、民用和医疗等领域^[1],但是由于平面探测器灵敏度不高、镜头光圈数和镜头景深不够以及物体的温度分布影响,红外成像的清晰度和对比度往往较低,画面较模糊^[2]。因此,红外图像增强对红外图像的分析 and 应用非常重要。直方图均衡化^[3]用变换函数增大图像灰度级的动态范围,以提升图像的对比度,但是会压缩微小细节的灰度级范围,过增强图像的部分背景。双直方图均衡化^[4]根据图像的亮度中值对图像直方图进行划分,再分别进行均衡化处理,以提升图像的信息熵和平均亮度。为了减少微小细节的欠增强和背景的过增强,平台直方图均衡^[5]通过设置阈值,以保护这部分图像信息。但是阈值的设置缺乏鲁棒性,对部分图像未必有效。自适应直方图均衡^[6]对图像的局部直方图进行自适应的均衡化,具有一定的鲁棒性,但是会带来噪声。于是,限制对比度的自适应直方图均衡方法^[7]在均衡化的过程中结合对比度限制,以抑制噪声的放大。文献[8]对红外图像进行自适应的直方图均衡化后,再次用拉普拉斯变换进行细节锐化。

基于直方图的红外图像增强方法通过灰度级的重分布来改善图像的质量,但是忽略了图像在空间分布上的几何特征。为了有效地保持和增强红外图像的几何特征,基于 Retinex 的图像增强方法将红外图像分解为基础层和细节层,然后分别进行增强处理^[9-10]。文献[11]对基础图像进行自适应拉伸,而对细节图像进行非线性曲线校正,以提升红外图像的对比度。文献[12]用主特征提取法获得红外图像的基础层和细节层,分别增强它们的对比度。但是对基础层的对比度增强处理会破坏图像的亮度分布,使得增强图像出现伪影。为了消除因图像增强而产生的光晕和伪影,Umoh 等人^[13]提出一种基于邻域小波阈值系数的红外图像增强技术,通过小波阈值滤波和多尺度小波重构实现红外图像的细节增强。文献[14]提出多尺度卷积和自适应双区间的直方图均衡化,对红外图像的细节和对比度进行拉伸,并使用均方差和平均灰度均衡以提高图像的亮度。

为了克服现有红外图像增强方法存在的欠增

强、过增强以及光晕和伪影等缺陷,提出了低频重分布与边缘增强的红外图像增强算法。用改进的引导滤波提取红外图像低频和高频部分,对低频图像的像素进行均匀重分布,而用提出的方向梯度算子对高频图像进行边缘增强,实验证明了本文方法的增强效果优于部分最新提出的增强方法。

2 改进引导滤波的图像分解

Retinex 理论认为,当光照条件产生变化时,人眼视觉对物体颜色的感知保持不变,即颜色恒常性,另外,人眼视觉感知的图像,是由外界的光照分量和物体本身的反射分量的乘积组成,即:

$$I = L \times R \quad (1)$$

其中, I 为图像; L 为光照分量; R 为反射分量。光照分量 L 的强度变化缓慢,为图像的低频成分,而反射分量 R 决定于成像物体表面固有的特性,表现为图像的高频成分。为了计算和处理上的方便,将式(1)转换到对数域,得:

$$\ln I = \ln L + \ln R \quad (2)$$

将式(2)进一步等价变换,可得反射分量 R 的表达式:

$$R = \exp(\ln I - \ln L) \quad (3)$$

因此,只要得到图像的光照分量 L ,就可以由式(3)得到图像的反射分量。由于高斯滤波具有良好的低通滤波能力,一般选取高斯滤波器对图像 I 进行滤波获得图像的光照部分,也即低频成分:

$$L = G * I \quad (4)$$

其中, $*$ 为卷积运算; G 为高斯滤波核:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中, σ 为空间标准差。

对 L 和 R 分别进行增强处理后,根据式(2)作变换,得到增强的红外图像:

$$I = \exp(\ln L + \ln R) \quad (6)$$

根据高斯滤波核的定义式(5),明显可以看出,高斯滤波核是基于空间距离的高斯分布,且具有各向同性,忽略了像素域的边缘纹理,边缘保持能力较差。相对地,引导滤波具有良好的边缘保持能力,因此本文提出改进的引导滤波以提取图像的低频成分。

引导滤波基于引导图像,将图像的每一像素与其邻域像素定义为线性关系而进行局部线性滤波,

再将局部线性滤波结果累加得到滤波图像。引导滤波定义为^[15]：

$$r_i = a_k g_i + b_k, i \in N_k \quad (7)$$

其中, N_k 为引导图像中以像素 k 为中心的邻域; a_k 和 b_k 为 N_k 的线性系数。滤波图像 r 应尽可能保持图像的边缘和纹理, 与输入的原图像 I 接近, 用最小二乘法进行拟合, 代价函数为:

$$C(a_k, b_k) = \sum_{i \in N_k} [(a_k g_i + b_k - I_i)^2 + \varepsilon a_k] \quad (8)$$

其中, ε 为正则化系数, ε 越大, 平滑效果越明显, ε 越小, 边缘保持越好。通过线性回归求解代价函数 C , 可得系数 a_k 和 b_k 分别为:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|N_k|} \sum_{i \in N_k} g_i I_i - u_k \bar{I}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (9)$$

$$b_k = \bar{I}_k - a_k u_k \quad (10)$$

其中, u_k 和 σ_k^2 分别为引导图像 g 在 N_k 内的均值和方差, $|N_k|$ 统计 N_k 中的像素总数, $\bar{I}_k = \frac{1}{|N_k|} \sum_{i \in N_k} I_i$ 。每一像素 i 会被 $|N_k|$ 个邻域覆盖, 而每一邻域的系数 a_k 和 b_k 不同, 因此对 r_i 取均值, 得引导滤波的最终定义为:

$$r_i = \frac{1}{|N_k|} \sum_{i \in N_k} (a_k g_i + b_k) = \bar{a}_k \bar{g}_i + \bar{b}_k \quad (11)$$

其中, $\bar{a}_k = \frac{1}{|N_k|} \sum_{i \in N_k} a_i$, $\bar{b}_k = \frac{1}{|N_k|} \sum_{i \in N_k} b_i$ 。

一般地, 选取输入图像 I 作为引导图像 g , 于是根据式(9)和(10), a_k 和 b_k 简化为:

$$a_k = \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (12)$$

$$b_k = (1 - a_k) u_k \quad (13)$$

根据式(11)和(12), 当 N_k 为细节区域时, $\sigma_k > \varepsilon$, 于是 $a_k \approx 1$, $b_k \approx 0$, 因此 $r \approx I$, 有效保持了图像纹理细节; 而当 N_k 为平滑区域时, $\sigma_k < \varepsilon$, 于是 $a_k \approx 0$, $b_k \approx 1$, 因此 $r \approx \bar{I}_k$, 平滑效果较明显, 且噪声被滤除。

虽然引导滤波具有良好的边缘保持能力, 但是用统一的正则化系数 ε 处理所有的图像区域, 滤波图像容易产生光晕现象。因为除了图像区域的方差外, 正则化系数 ε 在较大程度上左右滤波处理的平滑和细节保持效果, 而固定不变的正则化系数 ε 缺乏区域特性的敏感性, 容易产生光晕现象。因此, 本

文对引导滤波进行改进, 提出了基于自适应正则化系数的引导滤波, 以更准确地提取红外图像的低频和低频部分。

根据邻域的信息熵区分当前邻域的平滑和细节的特性, 自适应的正则化系数为:

$$\varepsilon = \frac{\text{Entropy}(I)}{\text{Entropy}(N)} \quad (14)$$

正则化系数 ε 自适应于当前邻域 N 的信息熵, 而分子的原图像的信息熵 $\text{Entropy}(I)$ 起到归一化的作用。当前邻域 N 处于细节区域时, N 的信息熵较大, 而 ε 的值偏小, 进一步保持了图像的纹理细节; 而当前邻域 N 处于平滑区域时, N 的信息熵较小, 而 ε 的值偏大, 进一步提升平滑的效果。

3 低频图像的均匀重分布

决定图像效果的因素为亮度和对比度, 亮度过小或过大, 以及像素分布不均都会影响图像效果。理想的图像效果为充分利用整个像素级空间和像素在整个像素级空间中相对均匀分布。一般地, 图像效果可以通过图像的直方图予以体现, 如图 1 所示。图 1(a) 的直方图分布过于集中且偏左, 对应的图像较暗且对比度低; 图 1(b) 的直方图分布位置适宜但过于集中, 对应的图像亮度适宜, 但是对比度低; 图 1(c) 的直方图过于集中且偏右, 对应的图像亮度过大, 且对比度低; 图 1(d) 的直方图相对均匀地分布于整个像素级空间, 且分布的主峰处于像素级范围的中间, 对应的图像亮度较适宜, 对比度较高。

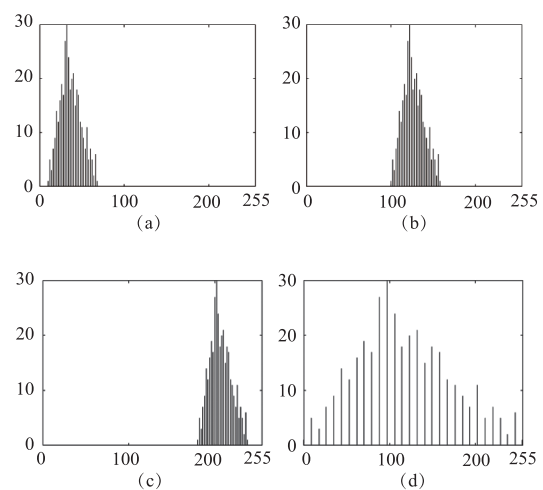


图 1 直方图的例析

Fig. 1 Example analysis of histogram

红外图像的成像机理决定了红外图像总体亮度较暗, 对比度较低。为了提升红外图像的亮度和清

晰度,使得隐藏于暗区的图像细节正常显示,同时为了
避免图像的过增强,基于以上分析,本文提出了一
种低频图像的相对均匀重分布方法,用数学模型表
示为:

$$Le = \text{MaxIntensity} * (L - \min(L)) / (\max(L) - \min(L)) \quad (15)$$

其中, L 和 Le 分别为归一化后的低频图像和像素
相对均匀重分布后的低频图像, MaxIntensity 为最

大像素值, \max 和 \min 分别为最大、最小函数。式
(15)将低频图像的直方图分布,在整个像素级空
间中按照像素值的大小顺序,相对均匀地重分布,
实现了整个像素级空间的充分利用、直方图相对
均匀分布以及直方图的主峰处于像素级空间的中间。
因此,重分布提升了低频图像的亮度和清晰度。以下
为像素相对均匀重分布的一个例析,如表1所示。

表1 像素相对均匀重分布例析

Tab. 1 Example analysis of relatively uniform redistribution of pixels

直方图	5	7	11	14	17	20	21	25	28	26	16	13	9	8	4
原图像像素值	4	7	9	12	18	21	23	25	31	32	37	40	42	47	55
变换后的像素值	0	15	25	40	70	85	95	105	135	140	165	180	190	215	255

表1中对应于原图像和像素相对均匀重分布后的
直方图如图2所示。很明显,相对于原图像的直
方图,像素相对均匀重分布后的直方图,近似均匀
分布于整个像素级空间,主峰处于空间范围的中间。
因此图像的亮度较适宜,对比度较高。

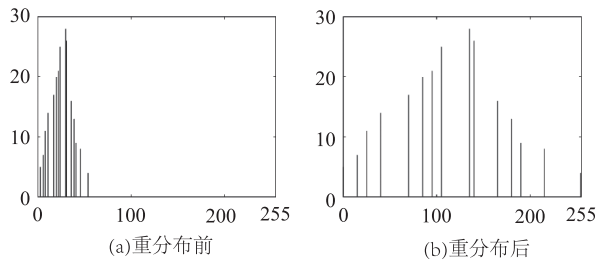


图2 直方图相对均匀重分布前后的对比
Fig. 2 Comparison of histogram before and after
relatively uniform redistribution

4 高频图像的边缘增强

红外成像机理导致红外图像的对比度较低,对
低频图像的直方图进行相对均匀重分布,是为了
提升亮度以将隐藏于暗区的图像细节清晰显示,或者
使得亮度较暗的图像细节更加清晰。为进一步提升
红外图像的对比度,本文提出了基于方向梯度算子
的高频图像边缘增强方法。

根据图像的边缘走向以及邻域像素基于空间距
离的相关性,本文提出了一种方向梯度算子,如图3
所示。方向梯度算子包括水平、垂直和正、反对角
线四个方向的梯度,基本上能够获取图像的所有纹
理方向。梯度算子用反比于空间距离的梯度系数体
现邻域像素对中心像素的梯度相关性,能更准确地
提取图像各方向的边缘信息。

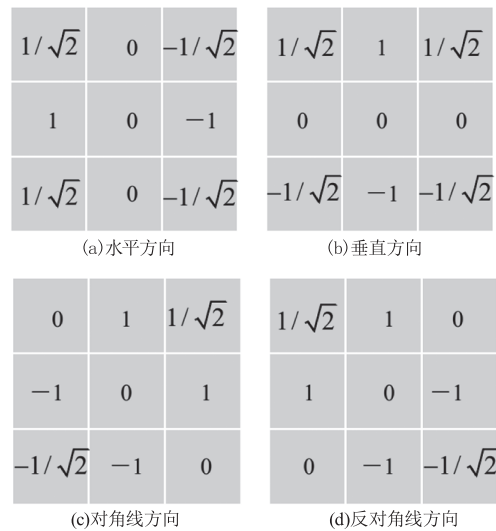


图3 多向梯度算子
Fig. 3 Multi-directional gradient operator

如果高频图像的对比度较高,用梯度算子对其
进行卷积运算将会获得边缘较粗的边缘图像,但是
为了避免过增强,对比度较高的图像只需较小程度
的边缘增强。如果高频图像的对比度较低,用梯度
算子对其进行卷积运算将会获得边缘较微弱的边
缘图像,但是为了进一步提高图像的对比度,对比度
较低的图像需要较大程度的边缘增强。根据以上分
析和实验验证,本文对高频图像采用自适应于局
部信息熵的非线性边缘增强:

$$R_e(k) = R(k) + E(k) / \text{Entropy}(N_k) \quad (16)$$

其中, $R(k)$ 为高频图像 R 中像素 k 的像素值; E
为用上述方向梯度算子提取的边缘图像; N_k 为高
频图像中以像素 k 为中心的邻域, Entropy 为信息
熵函数,图像邻域的信息越丰富,其信息熵越大。从

的定义式(16)可以看出,对高频图像的像素 k 的增强自适应地反比于其邻域 N_k 的信息熵。如果像素 k 对应的邻域 N_k 较清晰,则其信息熵较大,对像素 k 进行较小程度的边缘增强;如果像素 k 对应的邻域 N_k 较模糊,则其信息熵较小,对像素 k 进行较大程度的边缘增强。

5 实验与结果分析

在安装有 Win11 系统和 Matlab 2021a 软件、处理器为 i7 CPU 和内存为 8 GB 的计算机上部署实验。用三个场景红外图像,根据视觉效果和图像质量指标信息熵、Brenner 梯度函数和无参考图像质量指标 NIQE,将本文方法与部分最新提出的方法进行实验比较分析,这些方法分别为文献[7]、[8]、[13]和[14]提出的方法。信息熵 H 、Brenner 梯度和 NIQE 定义为^[16-18]

$$H = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} P_{ij} \ln P_{ij}, \left(\sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} P_{ij} = 1 \right) \quad (17)$$

$$\text{Brenner} = \frac{1}{HW} \sum_x \sum_y [I(x+2, y) - I(x, y)]^2 \quad (18)$$

$$\text{NIQE} = \sqrt{(v_1 - v_2)^T \left(\frac{\sum_1 + \sum_2}{2} \right)^{-1} (v_1 - v_2)} \quad (19)$$

其中, H 和 W 分别为图像的高和宽; v_1 、 v_2 、 \sum_1 和 \sum_2 分别为自然图像和失真图像的多变量高斯模型的均值和方差矩阵。信息熵 H 值越大,表示图像信息越丰富; Brenner 值越大,图像越清晰; NIQE 值越小,图像质量越高。

各算法对场景一图像的增强效果如图 4 所示。各算法对图像的亮度和对比度均有不同程度的提升,但文献[7]和[8]在亮度上仍然偏暗,对比度的提升不明显;文献[13]、[14]和本文方法的亮度较适宜,但文献[13]的图像效果稍显模糊,文献[14]的对比度较高,但是图像的边缘产生明显的光晕现象,而本文方法在保持图像自然效果的同时,较大地提升了图像的对比度。

图 5 显示了各算法对场景二的增强效果图像。原图像的细节丰富,但亮度较暗,对比度也较低。文献[7]显著提升了图像的对比度,但是同时存在背景的欠增强和前景目标的过增强,部分微小的图像细节未能正常显示,且整体图像偏暗,文献[8]适宜

地提升了图像的亮度,但是对比度欠佳,类似地,文献[13]和[14]的图像效果整体泛白,对比度的提升并不显著。相对地,本文方法在适宜地提升图像整体亮度的同时,能够增强原本模糊的微小细节,使其得以清晰显示,图像的整体对比度较高。

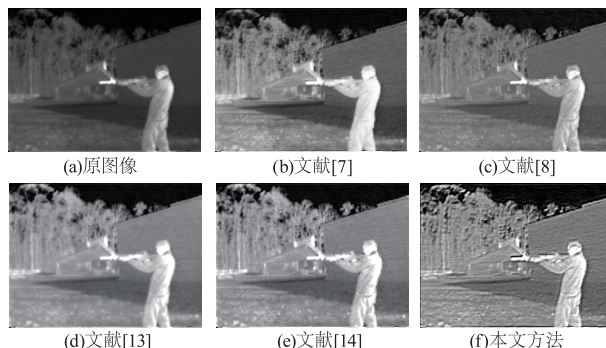


图 4 各算法对场景一的增强图像

Fig. 4 Enhanced images by each algorithm on scene one

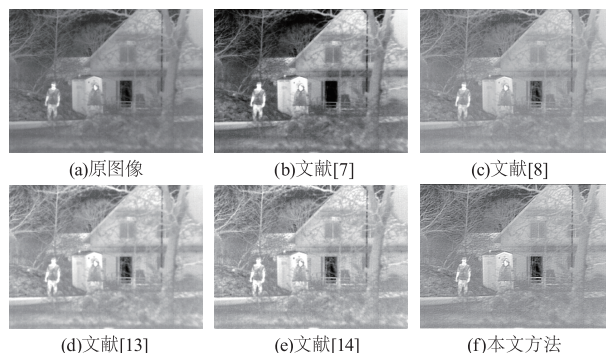


图 5 各算法对场景二的增强图像

Fig. 5 Enhanced images by each algorithm on scene two

各算法对场景三图像进行增强的效果如图 6 所示。原图像存在大量的亮区方格边缘,图像的整体亮度不足。文献[7]的图像亮度较暗,以致其对比度提升不明显,文献[13]和[14]存在明显的过增强,部分前景细节丢失,而文献[8]和本文均有效地提升了图像的亮度和对比度,且本文对方格边缘的增强尤为明显。

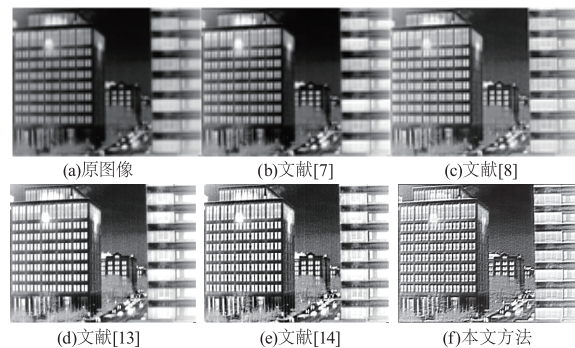


图 6 各算法对场景三的增强图像

Fig. 6 Enhanced images by each algorithm on scene three

对增强图像的主观视觉感知难免有偏差,为了更准确地比较各算法的增强效果,将各算法对应于增强三个场景图像的信息熵、Brenner 梯度以及 NIQE 指数值列于表 2,信息熵和 Brenner 梯度值越大越好,而 NIQE 指数值越小越好。

对于场景一,文献[7]和[8]的信息熵和 Brenner 梯度值较小,NIQE 指数较大,而文献[14]和本文方法的信息熵和 Brenner 梯度值较大,NIQE 指数较小。其中,本文方法的三个指标值稍微优于文献[14]。

对于场景二,本文方法的信息熵略高于其他算法,而 Brenner 梯度明显高于其他算法,比指数值较高的文献[7]还高出 50 左右。对于 NIQE 指数值,本文方法明显比其他方法小,比指数值较低的文献[8]还小 1.8 左右。

对于场景三,相对地,本文方法和文献[8]的三个图像质量指标值较高,其中本文方法稍微优于文献[8],其信息熵和 Brenner 梯度值分别比文献[8]高出大约 0.28 和 500,而 NIQE 指数值比文献[8]低约 0.14。

表 2 各算法对三个场景图像增强的质量指数值

Tab. 2 Quality index values of each algorithm for three scenes image enhancement

方法	原图像	文献[7]	文献[8]	文献[13]	文献[14]	本文方法
场景 1						
信息熵	6.701	6.785	7.053	7.214	7.325	7.395
Brenner	101.6	256.7	269.9	265.3	434.8	598.2
NIQE	7.523	5.276	5.302	5.195	4.585	4.335
场景 2						
信息熵	6.056	7.020	6.851	6.957	7.015	7.236
Brenner	40.39	198.4	81.03	80.47	157.3	257.1
NIQE	11.81	7.403	7.012	8.805	7.304	5.213
场景 3						
信息熵	6.006	7.204	7.441	7.439	7.228	7.705
Brenner	749.8	1283	2019	1331	1874	2594
NIQE	8.203	7.572	5.806	7.286	7.535	5.661

6 结 论

为了在有效增强图像的亮度和对比度的同时,保持图像的自然效果,提出了低频重分布与边缘增强的红外图像增强算法。基于改进的引导滤波,对红外图像的低频部分进行相对均匀重分布,而对高

频图像进行方向边缘增强,实验结果证明了本文方法的有效性,相对于部分现有的增强算法,本文方法具有优越的增强性能,其增强图像的亮度和对比度较高,同时具有更好的自然效果。

参考文献:

- [1] Song R, Li Y. Infrared image enhancement based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(11):1531-1537. (in Chinese)
宋蕊,李宇新. 基于改进量子粒子群的红外图像增强算法[J]. 激光与红外, 2021, 51(11):1531-1537.
- [2] Wang Y, Wang X, Li B, et al. Infrared image enhancement method for color transfer and contrast equalization in image registration [J]. Proceedings of the SPIE, 2017, 10462:1046258.
- [3] Ashiba H, Mansour H, El-Kordy M. Enhancement of infrared images using histogram equalization [J]. Journal of Scientific Research and Advances, 2015, 2(4):151-153.
- [4] Tang J, Mat Isa N. Bi-histogram equalization using modified histogram bins [J]. Applied Soft Computing, 2017, 55:31-43.
- [5] Liang K, Ma Y, Xie Y. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization [J]. Infrared Physics and Technology, 2012, 55(4):309-315.
- [6] Du Y, Zhou H, Ma Z, et al. Self-adaptive histogram equalization image enhancement based on canny operator [J]. Proceedings of the SPIE, 2017, 10462:1046240.
- [7] Faraj N, Abood L. Contrast enhancement of infrared images using adaptive histogram equalization with contrast limited adaptive histogram equalization [J]. Iraqi Journal of Physics, 2018, 16(37):127-135.
- [8] Lv K, Zhang D. Infrared image enhancement algorithm based on adaptive histogram equalization coupled with Laplace transform [J]. Optical Technique, 2021, 47(6):747-753. (in Chinese)
吕侃徽, 张大兴. 基于自适应直方图均衡化耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法[J]. 光学技术, 2021, 47(6):747-753.
- [9] 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.
- [10] Yun L, Chen T, Chen Z, et al. A multi-target detection al-

- gorithm for infrared image based on Retinex and LeNet5 neural network[J]. International Journal of Performability Engineering, 2018, 14(11): 2702 – 2710.
- [11] Wei R, Zhan W, Zhu D, et al. Improved multi-scale Retinex infrared image enhancement[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(3): 465 – 474. (in Chinese)
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.
- [12] Cheng T, Lu X, Yi Q, et al. Research on infrared image enhancement method combined with single-scale Retinex and Guided image filter[J]. Infrared Technology, 2021, 43(11): 1081 – 1088. (in Chinese)
程铁栋, 卢晓亮, 易其文, 等. 一种结合单尺度 Retinex 与引导滤波的红外图像增强方法[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1081 – 1088.
- [13] Umoh I, Onuh G, Sikiru T, et al. An infrared image enhancement technique based on neighborhood wavelet thresholding coefficient for multi-level discrete wavelet transform[J]. Applications of Modelling and Simulation, 2020, 4: 202 – 209.
- [14] Lu H, Liu Z, Pan X. An adaptive detail equalization for infrared image enhancement based on multi-scale convolution[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156763 – 156773.
- [15] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397 – 1409.
- [16] Chen J, Zhan Y, Cao H. Adaptive sequentially weighted median filter for image highly corrupted by impulse noise[J]. IEEE Access, 2019, 7: 158545 – 158556.
- [17] Wu Ling, Chen Niannian, Liao Xiaohua. Infrared image enhancement based on regional adaptive multiscale intense light fusion [J]. Infrared Technology, 2020, 42(11): 1072 – 1076, 1080. (in Chinese)
巫玲, 陈念年, 廖小华. 区域自适应多尺度强光融合的红外图像增强[J]. 红外技术, 2020, 42(11): 1072 – 1076, 1080.
- [18] Mittal A, Soundararajan R, Bovik, A. Making a “completely blind” image quality analyzer [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209 – 212.