

基于改进拉普拉斯金字塔的红外图像增强算法

韩 龙, 赵雅婷, 左 超, 何辉煌
(黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 针对在进行红外图像增强时容易出现细节和边缘纹理丢失的问题, 提出了基于改进拉普拉斯金字塔的红外图像增强算法。首先, 构建拉普拉斯金字塔时, 在原有的差分运算中加入 Canny 边缘检测, 提取图像的基础层和细节层; 其次, 在基础层使用 γ -CLAHE 算法改善对比度和亮度; 对细节层通过拉普拉斯算子进一步增强细节层中的边缘纹理; 最后将细节层与基础层重建得到增强后的红外图像。经实验验证, 本算法与传统 Clahe 算法、Gamma 校正及其他算法相比, 其中, PSNR 最大提高了 5.34, SSIM 值最大提高了 0.6, 熵值最大提高了 2.07, 验证了本算法能够在红外图像增强时提高对比度, 突出边缘信息, 保持结构特性完整, 在红外图像增强处理中是有效的。

关键词: 红外图像; 图像增强; 拉普拉斯金字塔; Canny; 自适应伽马变换

中图分类号: TN911.73; TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.018

Infrared image enhancement algorithm based on improved Laplacian pyramid

HAN Long, ZHAO Ya-ting, ZUO Chao, HE Hui-huang

(School of Electrical & Control Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: In this paper, an infrared image enhancement algorithm based on an improved Laplacian pyramid is proposed to address the common issue of detail and edge texture loss during infrared image enhancement. Firstly, in constructing the Laplacian pyramid, Canny edge detection is incorporated into the existing difference operation to extract the base and detail layers of the image. Secondly, the γ -CLAHE algorithm is applied to improve contrast and brightness in the base layer, and the Laplacian operator is then used to further enhance edge textures in the detail layer. Lastly, the enhanced infrared image is reconstructed by combining the detail layer with the base layer. Experimental results demonstrate that compared to traditional methods such as Clahe algorithm, Gamma correction, and others, the proposed algorithm achieves a maximum increase of 5.34 in PSNR, 0.6 in SSIM, and 2.07 in entropy, which validates the algorithm's effectiveness in enhancing contrast, highlighting edge information, and preserving structural characteristics during infrared image enhancement.

Keywords: infrared image; image enhancement; Laplacian pyramid; Canny operator; γ -CLAHE

1 引言

红外成像不受光照条件限制, 能检测隐蔽热源、测量温度分布, 在军事、医学、工业等领域得到广泛

应用^[1]。但受到内部电子元件的影响, 存在对比度低、细节纹理易丢失的缺点^[2-3]。因此, 对红外图像进行增强是红外图像的研究与应用的重点。

基金项目: 2022 年度黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目 (No. 2022 - KYYWF - 0527) 资助。

作者简介: 韩 龙 (1978 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向红外图像处理, 电力设备故障诊断。E-mail: yazhoulong@163.com

通讯作者: 赵雅婷 (1999 -), 女, 硕士研究生, 研究方向电力设备红外图像处理。E-mail: zyating0612@163.com

收稿日期: 2023-12-05

目前将图像多尺度分解进行红外图像增强是主流趋势, Stark 提出了自适应图像对比度增强方法, 使用“积累函数”从局部直方图生成灰度映射, 进行对比度增强处理^[4]。Li 提出了自适应双平台的直方图均衡化方法, 但最优阈值难以确定^[5]。闫哲对图像的前景和背景进行全局直方图均衡, 仍存在过增强的问题^[6]。罗国强将图像多尺度分解成高频部分和低频部分, 对低频图像进行 Gamma 校正, 改善了图像的亮度 and 对比度, 但细节信息增强不明显^[7]。基于自适应 HE 算法耦合拉普拉斯变换的增强算法对进行八邻域变换, 增强了整个图像空间的对比度和清晰度, 但存在边缘模糊的问题^[8]。程铁栋对图像的细节层和基础层分别进行对比度增强, 但增强后的图像出现了伪影^[9]。汪璇提出了基于引导滤波的高动态红外图像压缩算法, 根据图层的特点进行增强和去噪^[10]。魏艳提出线性变换与局部均衡的红外图像增强, 通过金字塔进行多尺度分解, 对像素灰度进行分段线性变换, 并对图像进行局部直方图均衡化^[11], 计算较复杂, 存在局部曝光的问题。

综上所述, 为了有效增强红外图像的清晰度和对比度, 避免出现细节丢失、边缘模糊的问题, 提出一种基于改进拉普拉斯金字塔的红外图像增强算法, 在建立拉普拉斯金字塔时加入 Canny 边缘检测, 进行上采样差分运算得到图像的基础层和细节层, 通过 γ -CLAHE 算法对基础层进行对比度增强, 使用拉普拉斯算子对图像细节层进行梯度增强, 使用双边滤波器抑制背景噪声, 最后进行重建。经实验验证, 本算法能够增强图像对比度的同时突出边缘信息, 更好地区分背景和前景。

2 本文算法

2.1 拉普拉斯金字塔

拉普拉斯金字塔建立在高斯金字塔基础之上, 图像金字塔经过高斯低通滤波器进行向下采样得到高斯金字塔^[9], 如下式:

$$G_H^r(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_H^{r-1}(2i+m, 2j+n) \quad (1)$$

式中, m, n 为输入图像的行列尺寸; $G_H^r(i, j)$ 为表示第 r 层高斯金字塔, $G_H^1, G_H^2, \dots, G_H^r$ 则构成整个高斯金字塔的分解图像^[12]。

$$G_L^r(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_H^{r+1} \left[\frac{m+i}{2}, \frac{n+j}{2} \right]$$

(2)

式中, $G_L^r(i, j)$ 表示图像向上采样扩大后的图像; $\frac{m+i}{2}, \frac{n+j}{2}$ 是整数, 表示尺寸缩小为原来的一半。

拉普拉斯金字塔各层是通过 G_H^r 差分运算得到的:

$$L_H^r = G_H^r - G_H^{r-1} \quad (3)$$

式中, $L_H^1, L_H^2, L_H^3, \dots, L_H^r$ 是拉普拉斯金字塔的分解图像^[13]。

2.2 Canny 算子边缘检测

边缘检测是通过检测图像灰度突变对图像进行分割的方法, 其算法步骤主要为:

图像灰度化后进行高斯滤波降噪处理, 高斯函数表达式为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, σ 是高斯分布的标准差; $I(x, y)$ 表示原图像; 高斯函数 $G(x, y)$ 卷积得到高斯去噪后的图像 $I_{out}(x, y)$:

$$I_{out}(x, y) = G(x, y) * I(x, y) \quad (5)$$

计算 $I_{out}(x, y)$ 每个像素的梯度和方向, Sobel 算子数学模型如下:

$$\begin{cases} G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta = \text{atan2}(G_x, G_y) \\ G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中, G 为梯度幅值; θ 为梯度的方向; G_x 和 G_y 分别是 x 方向和 y 方向的梯度。

通过非极大值抑制, 保留每个梯度方向上最大的像素, 其他像素置零, 得到边缘图像。

采用双阈值边缘跟踪法, 像素梯度大于高阈值的认定为强边缘, 低阈值和高阈值之间为弱边缘, 低于低阈值的像素被丢弃。连接强边缘像素与相邻的弱边缘像素, 形成边缘线。

2.3 改进拉普拉斯金字塔算法

红外图像增强时, 提高对比度且有效保留清晰的边缘细节是关键。在拉普拉斯金字塔分解中若想

得到更加丰富的细节信息,需要增加金字塔层数,但这使部分边缘会变模糊。本文提出改进拉普拉斯金字塔算法,使用 Canny 边缘检测对拉普拉斯金字塔进行改进,具体算法步骤如下:

输入待增强图像;

将图像经过高斯滤波器进行平滑滤波后进行下采样得到高斯金字塔,同时对图像进行 Canny 边缘检测得到原图像的边缘信息;

根据式(2)进行每一层图像进行上采样,对 Canny 边缘检测得到的 C_i 图层进行差分运算得到新的拉普拉斯金字塔,如式:

$$L_i = (G_H^r - G_L^r(i,j)) + C_i \quad (7)$$

式中, L_i 表示第 i 层拉普拉斯金字塔图像; G_H^r 表示第 r 层高斯金字塔图像,作为图像分解后的基础层; C_i 表示使用 Canny 算子得到的边缘图像, $G_L^r(i,j)$ 表示向上采样扩大后的图像,算法流程示意图如图 1。

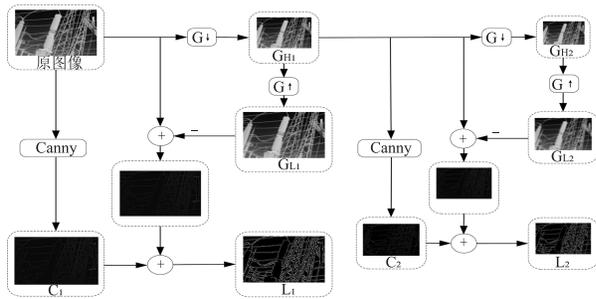


图 1 算法流程示意图

Fig. 1 Algorithm flow diagram

本文将使用改进的拉普拉斯金字塔进行图像分解,分别用 γ -CLAHE 算法和拉普拉斯算子对基础层和细节层进行图像增强,算法框图如图 2 所示。

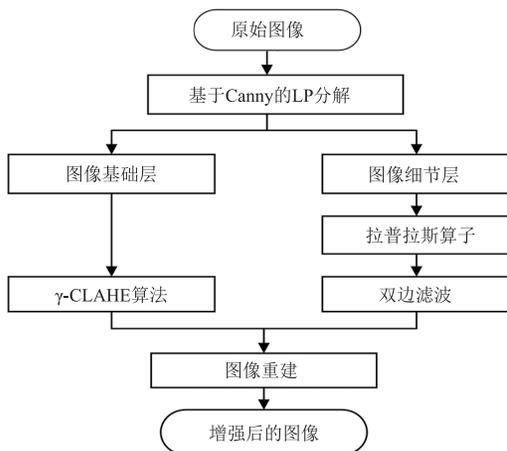


图 2 本文红外图像增强算法

Fig. 2 Infrared image enhancement algorithm in this paper

2.4 基础层增强

基础层图像包含整个图像的全局信息,限制对比度直方图均衡化(Clahe)能避免图像出现局部对比度过度增强的问题^[14]。通过 Gamma 校正对图像进行亮度和对比度调节^[15],如图 3 所示,其数学表达式为:

$$I_{out} = cI^\gamma \quad (8)$$

式中, I_{out} 表示输出图像灰度值; c 表示灰度缩放系数; γ 表示 Gamma 校正因子,当 $\gamma < 1$ 时,图像变暗;反之,图像变亮。

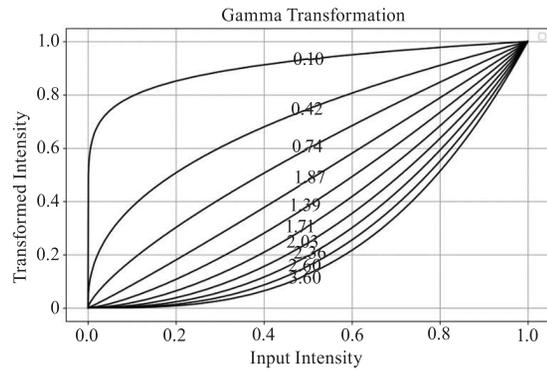


图 3 Gamma 校正示意图

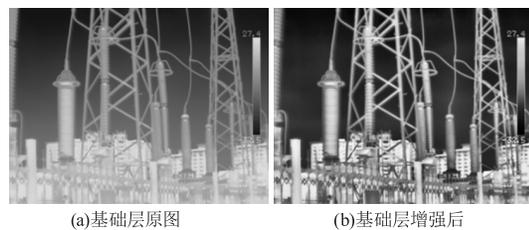
Fig. 3 Gamma correction diagram

为避免 Clahe 算法处理后的图像出现过增强,使用 γ -CLAHE 算法^[16]对基础层进行增强。使用 Gamma 校正函数调整图像的亮度,并将图像分成若干个小块,计算各个小块的灰度分布直方图,如式(9),根据新的直方图和对比度限制区域位置,计算新的像素值,得到增强后的图像:

$$F_{i,j} = \frac{N-1}{M} \sum_{k=0}^n h_{i,j}(k) \quad (9)$$

式中, $h_{i,j}(k)$ 是像素的直方图; M 、 N 是不同小块中的像素数; $N-1$ 是不相互重叠的区域像素数。

使用 γ -CLAHE 算法对基础层图像增强,如图 4 所示,增强后的图像对比度有效提高。



(a)基础层原图 (b)基础层增强后

图 4 基础层图像增强前后对比图

Fig. 4 Comparison of the base layer before and after enhancement

2.5 细节层增强

图像的细节层包含丰富的纹理信息,但也存在

大量高频噪声。拉普拉斯算子强调锐化边缘部分,保留细节层的边缘信息,定义为下式:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y) \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y) \\ g(x, y) = f(x, y) + \beta[\nabla^2 f(x, y)] \end{cases} \quad (12)$$

式中, $g(x, y)$ 为输出图像; $f(x, y)$ 为原始图像; β 表示锐化系数, 取值越大, 细节锐化越明显, 同时噪声也会增加。

双边滤波(Bilateral Filtering, BF)考虑像素之间的空间关系和像素差异, 能够有效保留图像边缘信息, 去除图像噪声, 计算公式如下:

$$I_{out}(x, y) = \frac{1}{w_p} \sum_{(i, j) \in \Omega} I(i, j) \cdot w_p(i, j) \cdot w_d(x, y, i, j) \quad (13)$$

式中, I_{out} 是输出图像的像素值; I 是输入图像像素值; Ω 是输入图像中以 (x, y) 为中心的邻域; $w_p(i, j)$ 是空间权重; $w_d(x, y, i, j)$ 是像素权重; w_p 为归一化因子。

双边权重从空间距离和像素相似性上综合考虑, 使其能在去噪的同时保留图像的边缘和细节, 图5为细节层增强前后对比图, 图5(b)增强边缘信息的同时, 背景增加了大量的噪声, 使用双边滤波器进行去噪得到图5(c), 保留了边缘信息, 起到了去噪保边的效果。

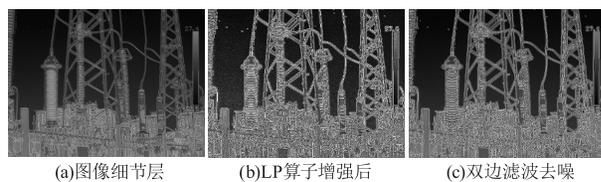


图5 细节层图像增强前后对比图

Fig. 5 Comparison of detail layer before and after enhancement

2.6 基础层与细节层重建

通过线性加权的融合方式, 可以在细节增强的同时保持全局信息的完整性, 从而避免信息的丢失, 即:

$$I = I_b + \eta \times I_d \quad (14)$$

式中, I 为增强后的图像; I_b 表示增强后的基础层图像; I_d 表示增强后的细节层图像; η 是细节层的权重参数。

基础层是全局信息的关键, 确保增强后的图像保持原始图像的基本特征, 细节层的权重会影响细节和边缘信息的表现程度, 在图像增强过程中, 细节层会增加噪声, 调整细节层的权重 η 可以抑制背景噪声的增加程度, 增大 η 值可以突出边缘细节, 提高图像中的细节和纹理表现, 而减小 η 值则强调全局信息, 有助于降低噪声水平。由实验结果可知, η 在 0 ~ 0.8 时效果最佳, 图6为 η 取 0.2、0.4、0.6、0.8 时不同的重建效果, 从图中可以看出, 当 $\eta = 0.6$ 、 $\eta = 0.8$ 时存在局部过增强和噪声增加问题, $\eta = 0.2 \sim 0.4$ 时对比度得到有效提高, 经实验对比, 本文取中间值 $\eta = 0.3$ 作为线性权重, 图像对比度提高得同时抑制了背景噪声。权重 η 取不同值时对比图, 如图6所示。

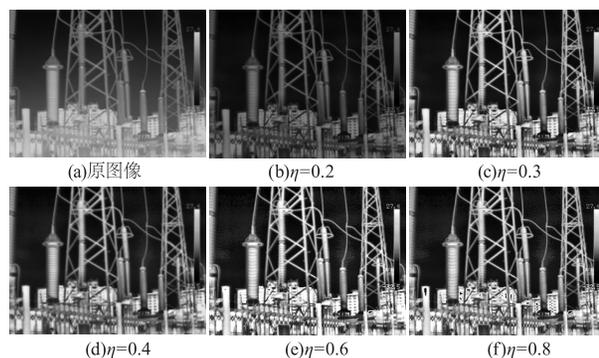


图6 η 取不同值时对比图

Fig. 6 Comparison of image with different η

3 实验验证及分析

本文使用处理器 i5 - 12500H, 内存 16 G, 固态硬盘 512 G 配置的笔记本电脑以 Python 3.9 作为实验平台, 对电气设备红外图像进行实验验证, 数据集来源于笔者于 2023 年 3 月在长春市某变电站使用 FOTRIC 628CL25 型红外成像仪进行拍摄的。

对 Clahe 增强算法、Gamma 校正增强算法、将图像分层对图像的低频部分使用 Gamma 校正增强算法^[7]、自适应 HE 算法耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法^[8]以及本文算法进行对比实验, 增强后效果对比如图 7、8、9 所示。

3.1 主观评价

评价指标主要从主观和客观两方面进行评价, 主观评价是通过观察者的主观意见和感受来评估图像的质量和特性, 这种评价方法用于从人眼视觉上来评估图像的清晰度、对比度、颜色准确性等增强程度。

在图7、8、9中(b)图是使用Clahe算法增强,提高了图像亮度,但边缘信息依旧没有得到增强;(c)图是经过Gamma校正后的图像,对比度提高不明显,边缘信息弱化;(d)图使用文献[7]的算法进行增强,出现前景过增强,背景过暗的现象;(e)图使用文献[8]的算法进行增强,明显提高了图像的亮度和对比度,且边缘得到保留,但存在局部过增强、曝光现象;(f)图是使用本文算法进行增强的图像,在去噪的同时,强化了前景与背景的层次,与上述的算法相比,很好地保留了图像的局部细节和边缘纹理,没有出现过增强。

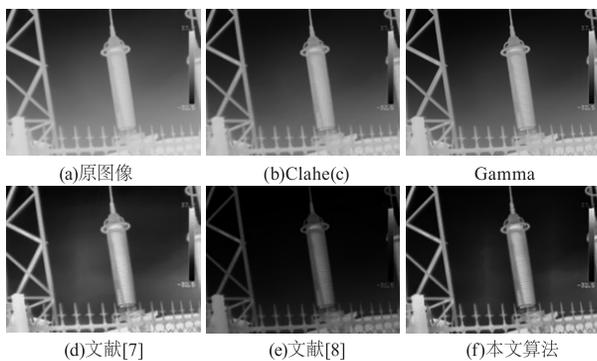


图7 场景一使用不同算法增强前后对比图

Fig. 7 Scenario 1 contrast image before and after image enhancement

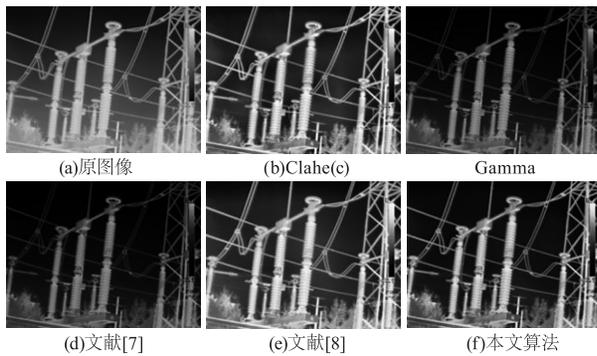


图8 场景二使用不同算法增强前后对比图

Fig. 8 Scenario 2 contrast image before and after image enhancement

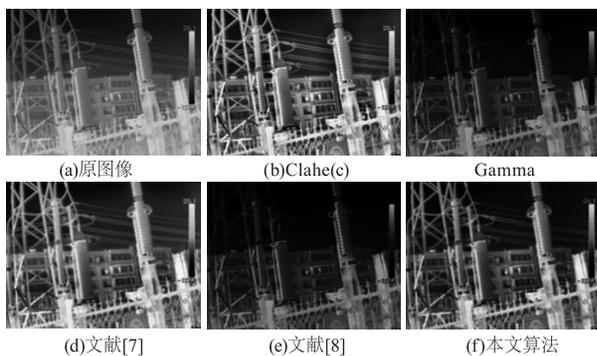


图9 场景三使用不同算法增强前后对比图

Fig. 9 Scenario 3 contrast image before and after image enhancement

3.2 客观评价

1) 峰值信噪比(PSNR)是峰值信号能量和噪声平均能量之比,数值越大输出图像的失真越小,图像质量越好,计算公式如下式:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \lg \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (15)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (16)$$

式中, MAX_I 为最大像素值; MSE 为含噪图像的均方误差;增强后的图像为 $I(x,y)$ 。

2) 结构相似性(SSIM)评估两幅图像之间的亮度、对比度和结构之间的相似性,取值范围是 $[-1, 1]$,SSIM的值越接近1,相似度越高,计算公式如下:

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (17)$$

式中, μ_x, μ_y 是图像在 x 和 y 方向上的均值; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ 是图像在 x, y 和整体的方差; C_1 和 C_2 表示图像的灰度值。

3) 信息熵(Entropy)用来评估图像中的信息量,信息熵值越高,图像中像素分布越均匀,信息含量越多,计算公式如下:

$$H(X) = \sum p(x) \cdot \log_2(p(x)) \quad (18)$$

式中, $H(X)$ 代表信息熵; $p(x)$ 表示图像中像素出现的概率。

表1 场景一不同算法增强的客观评价指标

Tab. 1 Scenario 1 peak signal-to-noise ratio of different algorithm

	PSNR	SSIM	Entropy
Clahe	93.25	0.33	7.19
Gamma	91.54	0.82	7.26
文献[7]	90.48	0.42	7.29
文献[8]	92.06	0.87	7.69
本文算法	95.82	0.93	7.83

通过三个不同场景下不同算法的对比试验结果可知(如表1,2,3),与传统Clahe、Gamma增强算法相比本文算法各项指标都有一定提升,且相对于文献[7]、文献[8]的算法大部分指标都得到了提高,PSNR最大提高了5.34,SSIM值最大提高了0.6,Entropy值最大提高了2.07。结合主观和客观的评

价指标的各项参数,本算法在红外图像增强时表现出色,能够保留大量的细节信息和边缘,提高了图像质量和信息的可用性。

表2 场景二不同算法增强的客观评价指标

Tab.2 Scenario 2 peak signal-to-noise ratio of different algorithms

算法	PSNR	SSIM	Entropy
Clahe	92.22	0.73	7.63
Gamma	90.43	0.52	7.31
文献[7]	90.51	0.49	6.47
文献[8]	93.32	0.86	7.68
本文算法	94.46	0.90	8.14

表3 场景三使用不同算法增强的客观评价指标

Tab.3 Scenario 3 peak signal-to-noise ratio of different algorithms

算法	PSNR	SSIM	Entropy
Clahe	93.97	0.79	7.67
Gamma	89.85	0.54	6.83
文献[7]	90.43	0.47	6.66
文献[8]	92.33	0.76	7.61
本文算法	94.92	0.84	8.73

4 结 论

本文针对在红外图像增强时容易细节信息丢失,边缘不够突出的问题,提出了基于改进拉普拉斯金字塔的红外图像增强算法。该算法利用 Canny 边缘检测能够有效提取图像高频细节信息和边缘纹理的特点,在构建拉普拉斯金字塔时,加入该算子,改变原有的差分法构建方式,能够在图像分解时更简单、有效地获取丰富的细节信息,突出边缘部分。

使用改进后的拉普拉斯金字塔将图像分成细节层和基础层,使用 γ -CLAHE 算法提高对比度,拉普拉斯算子强化细节层的边缘纹理信息,并通过双边滤波对背景噪声去噪。最后将细节层和基础层线性重组得到增强后图像。该算法经验证,从主观评价上能够增强图像的对比度与亮度,边缘更清晰;从客观评价指标来看,相较于传统算法,PSNR、SSIM 以及 Entropy 都有较大提高。实验结果证明了本算法在红外图像增强时既能增强局部细节,又能保持全局信息的一致性和完整性。

参考文献:

- [1] Song Rui, Li Yuxin. 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] Deng Chunhua, Zhou Yong. Infrared image enhancement algorithm based on low frequency redistribution and edge enhancement[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(1):146-152. (in Chinese)
邓春华,周勇. 低频重分布与边缘增强的红外图像增强算法[J]. 激光与红外, 2023, 53(1):146-152.
- [3] Wu Tian, Li Zhinong, Zhu Junzhen, et al. Crack enhancement method for ultrasonic infrared thermal images based on cluster analysis and skeleton extraction[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10):1545-1551. (in Chinese)
吴恬,李志农,朱俊臻,等. 基于聚类分析和骨架提取的含裂纹超声红外热像增强方法研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(10):1545-1551.
- [4] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(5):889-896.
- [5] Li S, Jin W, Li L, et al. An improved contrast enhancement algorithm for infrared images based on adaptive double plateaus histogram equalization[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 90:164-174.
- [6] Yan Zhe, Jiang Li, Yang Fan, et al. Bi-histogram equalization algorithm for infrared image enhancement[J]. Infrared Technology, 2022, 44(9):944-950. (in Chinese)
闫哲,蒋砾,杨帆,等. 基于双直方图均衡算法的红外图像增强[J]. 红外技术, 2022, 44(9):944-950.
- [7] Luo Guoqiang, Chen Jiayi. Image enhancement based on improved bilateral filtering and average γ correction[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(5):644-649. (in Chinese)
罗国强,陈家益. 改进双边滤波与平均 γ 校正的图像增强[J]. 传感技术学报, 2022, 35(5):644-649.
- [8] Lü Kanhui, Zhang Daxing. 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] Cheng Tiedong, Lu Xiaoliang, Yi Qiwen, 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.
- [10] Wang Xuan, Zhao Jinbo, Liu Zhijia, et al. High dynamic infrared image compression algorithm based on guided filtering[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(2):250–255. (in Chinese)
汪璇, 赵金博, 刘智嘉, 等. 基于引导滤波的高动态红外图像压缩算法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(2):250–255.
- [11] Wei Yanping. Infrared image enhancement by fusion of linear transformation and local equalization[J/OL]. *Laser Technology*, 2023–10–29. (in Chinese)
魏艳平. 线性变换与局部均衡融合的红外图像增强[J/OL]. *激光技术*, 2023–10–29.
- [12] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *Readings in Computer Vision*, 1987, 31(4):671–679.
- [13] Li Xiaoxiao, Nie Rencan, Zhou Dongming, et al. Laplacian multi-scale medical image fusion algorithm for image enhancement[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2019, 41(5):908–917. (in Chinese)
李肖肖, 聂仁灿, 周冬明, 等. 图像增强的拉普拉斯多尺度医学图像融合算法[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2019, 41(5):908–917.
- [14] Sahu S, Singh A K, Ghrera S P, et al. An approach for denoising and contrast enhancement of retinal fundus image using CLAHE[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 110:87–98.
- [15] Luo Guoqiang. Infrared image enhancement based on Gamma transformation and multi scale detail enhancement[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(2):253–260. (in Chinese)
罗国强. Gamma 变换与多尺度细节增强的红外图像增强[J]. *激光与红外*, 2023, 53(2):253–260.
- [16] Cheng Hongda, Luo Haiming, Xia Qingchao, et al. Recognition of images for underwater vehicle based on improved γ -CLAHE algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2022, 56(8):1648–1655. (in Chinese)
成宏达, 骆海明, 夏庆超, 等. 基于改进 γ -CLAHE 算法的水下机器人图像识别[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2022, 56(8):1648–1655.