

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104032

基于指数同态滤波耦合细节锐化规则的 红外图像增强算法*

王欣¹ 徐平平^{2,3} 吴菲¹

(1. 南京工业大学 浦江学院 南京 210000; 2. 东南大学 信息科学与工程学院 南京 210000;
3. 东南大学 移动通信国家重点实验室 南京 210000)

摘要:为了解决当前红外图像增强方法存在的光晕及细节模糊等不足,提出了指数同态滤波耦合细节锐化规则的红外图像增强算法。基于同态滤波方法,通过频域中的像素点与中心像素点的距离,构造指数型同态函数,以同时完成图像的去噪和增强对比度处理。联合相位一致性方法和自适应高提升滤波方法,构造了细节锐化机制。在图像的细节锐化中,利用相位一致性方法,通过傅里叶变换,准确提取出图像的细节特征。并引入高提升滤波方法,利用图像的均值,构造自适应的锐化因子,以形成自适应高提升滤波方法,对提取的图像细节特征进行锐化,完成图像细节内容的增强。实验结果表明,较当前的红外图像增强算法而言,所提算法具有更好的增强效果,其增强图像呈现出更为理想的对比度和更为清晰的图像边缘。

关键词: 红外图像增强; 同态滤波方法; 细节锐化规则; 相位一致性方法; 自适应锐化因子; 自适应高提升滤波方法

中图分类号: TP391; TN01

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 520.6040; 520.6099

Infrared image enhancement algorithm based on exponential homomorphic filtering coupled with detail sharpening rule

Wang Xin¹ Xu Pingping^{2,3} Wu Fei¹

(1. Pujiang College, Nanjing University of Technology, Nanjing 210000, China;

2. College of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China;

3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings as halo and detail blur in the current infrared image enhancement methods, an infrared image enhancement algorithm using exponential homomorphic filter coupled with detail sharpening rule is proposed in this paper. Based on the homomorphic filtering method, an exponential homomorphic function is constructed by the distance between the pixel and the center pixel in the frequency domain to form an exponential homomorphic filter, which is used to denoise the image and enhance the contrast of the image. Based on the phase congruence method and the adaptive high lifting filtering method, detail sharpening rules are constructed. In the rule of detail sharpening, the phase consistency method is used to extract the detail features of the image accurately through Fourier transform. Then, the high lifting filtering method is introduced, which uses the mean value of the image to construct an adaptive sharpening factor to form an adaptive high lifting filtering method. The extracted image details are sharpened to enhance the details of the image. The experimental results show that the image enhanced by the proposed method has better contrast than the current infrared image enhancement algorithm, and the edge of the image is clearer, which shows that the proposed method has better enhancement effect.

Keywords: infrared image enhancement; homomorphic filtering method; detail sharpening rule; phase consistency method; adaptive sharpening factor; adaptive high lifting filtering method

0 引言

在红外传感器的帮助下,人们就可获取到红外图像,促进了红外成像技术的应用^[1-2]。目前在航空航天、安防监控以及遥感探测等多个领域,都可见到红外图像的应用。在红外传感器特性以及大气干扰等影响下,与可见光图像相比较,红外图像的对比度以及对边缘等细节内容的表达能力,都有待改善^[3-4]。对此,对红外图像进行质量上的增强,是一个重要的研究课题。

目前,红外图像增强的方法多种多样,Loh 等^[5]采用高斯滤波方法将弱光增强建模为一组局部函数,并通过卷积神经网络(CNN)对图像进行训练,进而获取增强后的图像。该方法虽然增强了图像的光照度信息,但是高斯滤波方法易对图像的细节信息造成损坏,使得增强后图像存在细节模糊的现象。王爽等^[6]通过最大极值方法检测出图像中的目标信息,利用图像的灰度特征,通过最小二乘法来预测图像的能量变化情况,并通过设定阈值的方法,根据图像的能量变化情况,对图像的对比度进行拉伸,以增强红外图像。该方法虽然能提高图像的对比度特征,但通过设定阈值的方法来增强对比度,对阈值设置准确度要求较高,易出现过增强和欠增强的现象。Wang 等^[7]依据 Retinex 理论,利用高斯滤波器和双边滤波器,选取滤波参数,以求取输入图像的反射和照度分量,并通过指数函数和 S 型函数分别对反射分量的细节以及照度分量的亮度进行增强。该方法增强了图像的细节分量以及亮度特征,但高斯滤波器不能对图像的细节内容进行保护,而且采用双边滤波器获取图像的反射和照度分量时,对滤波参数的设置依赖性较强,易使得增强后图像出现光晕现象。

为了解决光晕及细节模糊等问题,本文基于光照反射模型的同态滤波方法,以频域中像素点与中心像素点的距离为依据,构造指数型同态函数,并将其用于同态滤波方法中,对输入图像进行指数同态滤波处理,以去除图像中的噪声,并有效保护图像细节内容,从而增强图像的对比度。在对图像的细节信息进行增强时,所提算法通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法,构造了细节锐化规则。采用相位一致性方法检测出图像中的角点和边缘等细节特征,然后,再在高提升滤波方法的基础上,利用图像的均值特征,构造自适应锐化因子,用于高提升滤波过程,以对图像的细节特征进行增强。在实验中,测试了所提算法对不同红外图像的增强性能。

1 所提图像增强算法设计

所提算法在对红外图像增强时,先通过指数同态滤

波方法,对图像的对比度进行增强。接着再通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法建立细节锐化规则,对图像的细节特征进行增强,其过程如图 1 所示。

1) 图像的对比度增强时,引入了图像细节特征保护能力较强的同态滤波方法,并通过像素点与图像的中心像素点的距离,构造了指数型同态函数,从而对红外图像进行指数同态滤波,去除了红外图像中的噪声,保护了图像的细节内容,增强了图像的对比度。

2) 图像细节特征增强时,通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法,构成了细节锐化规则。在细节锐化规则,利用相位一致性方法提取了图像的细节特征。利用图像的均值特征,构造自适应的锐化因子,从而在高提升滤波方法的基础上形成了自适应高提升滤波方法,用以对提取的图像细节特征进行增强,获取增强图像。

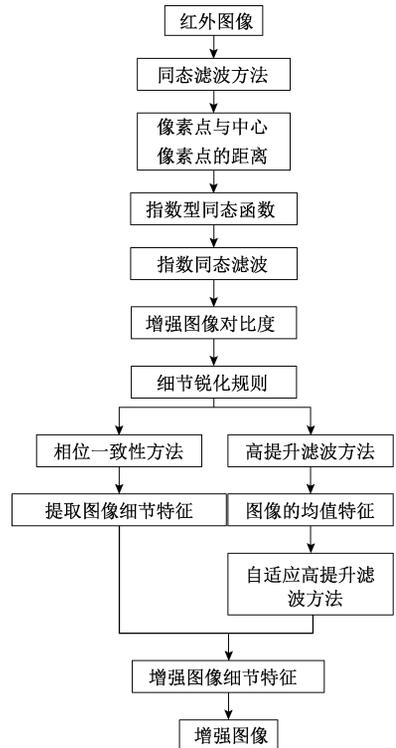


图 1 所提算法的增强过程

Fig. 1 The enhancement process of the proposed algorithm

1.1 图像的对比度增强

在获取到的红外图像中,有时会含有大量的噪声,通常情况下,需要将这些噪声去除后,再对图像进行增强。同态滤波方法为一种基于光照反射模型的滤波方法,其不仅能将乘性噪声转换成加性噪声进行去除,而且还能保护图像的细节成分,以及对图像的对比度进行增强。

依据光照反射模型,图像 $f(x,y)$ 可表示为照度成分 $i(x,y)$ 和反射成分 $r(x,y)$ 的乘积^[8-10]:

$$f(x,y) = i(x,y) \times r(x,y) \quad (1)$$

式中: $i(x,y)$ 的变化较为缓慢, 表征了图像的低频成分, 反映了图像的亮度特征; $r(x,y)$ 的变化较为剧烈, 表征了图像的高频成分, 反映了图像中的噪声以及边缘等细节特征。

利用同态滤波方法对 $f(x,y)$ 进行处理的流程如图2所示。

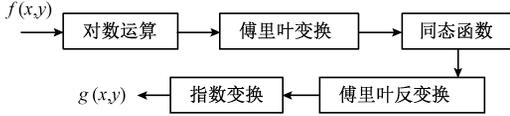


图2 同态滤波的过程

Fig. 2 The process of homomorphic filtering

图2中, $g(x,y)$ 为滤波后的输出图像。由图2可知, 首先需要对 $f(x,y)$ 进行对数运算, 以将 $i(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 的相乘形式变为相加形式:

$$\ln f(x,y) = \ln i(x,y) + \ln r(x,y) \quad (2)$$

接着对式(2)两边作傅里叶变换^[11]:

$$F\{\ln f(x,y)\} = F\{\ln i(x,y)\} + F\{\ln r(x,y)\} \Leftrightarrow$$

$$F(u,v) = I(u,v) + R(u,v) \quad (3)$$

式中: $F\{\cdot\}$ 为傅里叶变换, $F(u,v)$ 和 $I(u,v)$ 、 $R(u,v)$ 分别为 $f(x,y)$ 、 $i(x,y)$ 和 $r(x,y)$ 的傅里叶变换结果。

然后, 利用同态函数 $H(u,v)$ 对式(3)进行滤波处理:

$$H(u,v)F(u,v) = H(u,v)I(u,v) +$$

$$H(u,v)R(u,v) \Leftrightarrow H_F(u,v) = H_I(u,v) + H_R(u,v) \quad (4)$$

采用傅里叶反变换 $F^{-1}\{\cdot\}$ 来处理式(4), 求取其傅里叶反变换结果:

$$F^{-1}\{H_F(u,v)\} = F^{-1}\{H_I(u,v)\} + F^{-1}\{H_R(u,v)\} \Leftrightarrow$$

$$h_f(x,y) = h_i(x,y) + h_r(x,y) \quad (5)$$

最后, 对式(5)两端取指数变换, 求取增强对比度后的图像 $g(x,y)$:

$$g(x,y) = \exp |h_f(x,y)| = \exp |h_i(x,y)| \cdot \exp |h_r(x,y)| \quad (6)$$

为了抑制 $I(u,v)$ 成分, 提高 $R(u,v)$ 成分, 以增强图像的对比度。同态函数 $H(u,v)$ 需为一个高通滤波器, 其剖面需满足图3所示的指数曲线结构^[12]。

高斯滤波器为常用的同态函数 $H(u,v)$, 但其不具保护图像细节的作用, 对此, 本文采用频域中像素点 (u, v) 与中心像素点 (u_0, v_0) 的距离 $D(u,v)$ 构造指数型同态函数 $H(u,v)$:

$$H(u,v) = (r_H - r_L) e^{\left(\frac{-D_0}{D(u,v)}\right)^2} + r_L \quad (7)$$

式中: D_0 为截止频率, r_H 和 r_L 分别为高频和低频增益, 当 $r_H > 1, r_L < 1$ 时, $H(u,v)$ 即可实现抑制照度成分, 提高

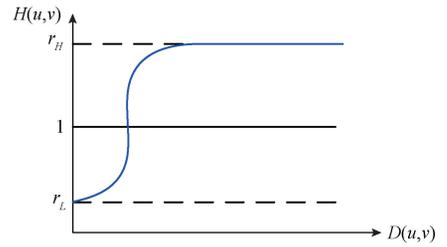
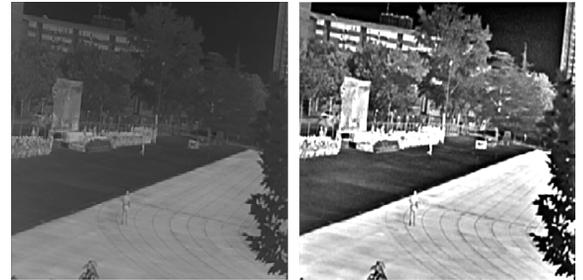


图3 同态函数的剖面曲线

Fig. 3 The profile of homomorphic function

反射成分, 以达到滤除噪声, 增强对比度的效果。

通过指数同态滤波方法获得的对比度增强图像如图4所示。从图4(b)可见, 通过指数同态滤波方法增强后的图像, 具有较好的对比度, 图像的亮度也得到了改善, 图像中树叶和道路的边缘等细节信息得到了较好的保留。



(a) 红外图像
(a) Infrared image
(b) 对比度增强结果
(b) Contrast enhancement results

图4 指数同态滤波方法增强对比度结果

Fig. 4 Contrast enhancement result by exponential homomorphic filter

1.2 图像细节特征的增强

图像的细节特征主要通过图像的角点及边缘来体现。相位一致性方法不仅光照鲁棒性以及噪声鲁棒性都较好, 而且还能够准确的检测出图像的角点及边缘特征, 具有较强的细节提取能力。高提升滤波方法不仅能够对图像的角点和边缘等细节特征进行增强, 而且还能将增强后的结果与原始图像的背景内容进行融合。对此, 本文将通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法构造细节锐化规则, 来对图像的细节特征进行增强。

本文构造的细节锐化规则分为图像细节特征提取和图像细节锐化两个部分, 其中图像细节特征提取的过程依靠相位一致性方法来实现。

对于图像 $f(x,y)$, 将其与方向为 d , 尺度为 s 的 log-Gabor 滤波器的偶对称滤波器 G_{ds}^e , 和奇对称滤波器 G_{ds}^o 进行卷积计算, 以求取 $f(x,y)$ 对应的 log-Gabor 滤波器偶对称响应值 $L_e(x,y)$ 和奇对称响应值 $L_o(x,y)$ ^[13-14]:

$$[L_e(x,y), L_o(x,y)] = [f(x,y) * G_{ds}^e, f(x,y) * G_{ds}^o] \quad (8)$$

采用 $L_e(x,y)$ 和 $L_o(x,y)$ 计算 $f(x,y)$ 的振幅 $A(x,y)$ 和相位角 $\phi(x,y)$:

$$A(x,y) = \sqrt{L_e^2(x,y) + L_o^2(x,y)} \quad (9)$$

$$\phi(x,y) = \arctan(L_e(x,y), L_o(x,y)) \quad (10)$$

通过 $A(x,y)$ 和 $\phi(x,y)$ 即可得出 $f(x,y)$ 的相位一致性函数 $P(x,y)$:

$$P(x,y) = \frac{\sum_o \sum_e w(x,y) |A(x,y) \cdot \phi(x,y) - T|}{\sum_o \sum_e A(x,y) + \varepsilon} \quad (11)$$

式中: ε 为常数,用于防止分母为 0; T 为噪声预估因子; $w(x,y)$ 和 $\phi(x,y)$ 分别为频率扩展的加权函数和相位偏差函数。

$$w(x,y) = \frac{1}{1 + e^{-z(x)}} \quad (12)$$

$$\phi(x,y) = \cos(\phi(x,y) - \bar{\phi}(x,y)) - |\sin(\phi(x,y) - \bar{\phi}(x,y))| \quad (13)$$

式中: c 为截止频率; $\bar{\phi}(x,y)$ 为 $f(x,y)$ 的相位角的平均值; $z(x)$ 为频率展宽函数。

通过式(11)提取出图像的细节特征后,需要通过自适应高提升滤波方法来增强所提取的细节特征,并将其和图像的背景内容相融合。对于图像 $f(x,y)$, 其高提升滤波所得图像 $f_{hb}(x,y)$ 可表述为^[15]:

$$f_{hb}(x,y) = Af(x,y) - \bar{f}(x,y) \quad (14)$$

式中: A 为锐化因子; $\bar{f}(x,y)$ 为 $f(x,y)$ 的模糊形式。 $\bar{f}(x,y)$ 可通过图像的锐化结果 $f_s(x,y)$ 来求取:

$$\bar{f}(x,y) = Af(x,y) - f_s(x,y) \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得:

$$f_{hb}(x,y) = (A - 1)f(x,y) + f_s(x,y) \quad (16)$$

图像的锐化结果 $f_s(x,y)$ 可利用其拉普拉斯变换结果 $\nabla^2 f(x,y)$ 来表示,因此式(16)可变形为:

$$f_{hb}(x,y) = (A - 1)f(x,y) + \nabla^2 f(x,y) \quad (17)$$

为了突出图像的局部细节特征,将图像按照 $m \times n$ 大小均匀分割,并对每个分割所得区域利用式(17)计算锐化结果。在锐化每个区域的过程中,利用该区域的均值 K_j 与图像的全局均值 K_f 构造自适应的锐化因子,以保证锐化图像细节时,还能提高图像的亮度特征。

$$A = K_j/K_f + 1 \quad (18)$$

图 5 所示为经过所提算法对图 4(a) 增强后的图像。从图 5 可见,增强后的图像不仅对比度较好,而且图像的细节特征也得到了较好的表达。



图 5 增强图像

Fig. 5 Enhanced image

2 实验结果

在 AMD Ryzen 5 3600CPU、8 GB 内存的 PC 上,以 MATLAB 2018a 作为测试软件,对所提算法进行图像增强实验。为了突出所提算法的优势,在实验中,采用文献[16-17]算法作为比对。其中文献[16]算法在 Retinex 方法的基础上,通过高斯滤波方法对图像的结构层增强,利用掩模加权最小二乘法对纹理层进行细节增强,获取增强图像,该方法具有一定的新颖性。文献[17]算法借助小波变换方法分解图像,设计了邻域阈值技术,对分解所得子图进行去噪和增强,进而获取增强图像,该方法具有一定的创新性。通过对各算法增强图像的主观视觉效果与客观数值测试两个方面,来评价各算法的图像增强效果。实验中主要参数的设置为 $D_0 = 70, r_H = 4.5, r_L = 0.3, \varepsilon = 0.02, T = 3.5$ 。

2.1 主观评价测试

主观评价测试是利用文献[16-17]算法和所提算法对待增强红外图像进行增强后,观察各算法增强后图像效果的过程。在主观评价测试过程中,利用各算法对 car-trees 红外图像和 city-ocean 红外图像,以及含噪 house-jeep 红外图像和含噪 build 红外图像进行增强。各算法对 car-trees 红外图像的增强结果如图 6 所示。从图 6(a)可见,待增强的 car-trees 红外图像较为暗淡,对比度和细节内容表达能力也不强。经过文献[16]算法增强后的图 6(b)中,图像亮度得到了明显的提升,但存在过增强的现象,图 6(b)中汽车的轮胎存在光晕现象,使得轮胎过亮对比度较低,同时图 6(b)中地面草坪的细节内容也不能很好的得到体现,树干的边缘也模糊不清。在图 6(c)图像的对比度得到了明显的改善,车胎和轮毂清晰可见,但车窗的边缘以及车灯处的细节内容存在模糊现象,虽然树干的边缘得到了很好地表达,但树叶的轮廓

还是不清晰。在图 6(d) 中图像的亮度和对比度都较好, 车胎和轮毂清晰可见, 且车窗和车灯处的边缘等细节都得到了清晰的体现, 地面草坪的细节内容也得到了较好的体现, 能较好的表达出草坪的轮廓特征。同时在图 6(d) 中树干和树叶的轮廓及边缘都得到了完整和清晰的体现。各算法对 city-ocean 红外图像的增强结果如图 7 所示。对比图 7 各算法增强的图像可见, 图 7(b) 整体偏亮, 房屋存在光晕现象, 不能很好地体现出房屋的轮廓。同时在图 7(b) 海水的波纹也不能得到较好的体现。在图 7(c) 房屋上的线条等细节内容较为模糊, 山体的边缘较为模糊, 海水与陆地的边缘也不清晰。图 7(d) 亮度适中, 对比度较好, 房屋的线条及边缘等细节内容得到了较好的体现, 山体的边缘也较为清晰, 海水和陆地的边缘也清晰可见, 海水的波纹等细节内容也得到了较好的表达。图 8 所示为各算法对 house-jeep 红外图像的增强结果。从图 8 各算法增强的图像可见, 图 8(b) 中房子和车轮及地面都偏亮且对比度较低, 车轮的轮廓模糊不清, 房子窗户的边缘也较为模糊。图 8(c) 天空和白云较为偏暗, 且房顶的边缘较为模糊。图 8(d) 天空和白云, 以及房子和车轮、地面的亮度都较为适中, 房子和车轮的边缘清晰可见, 房顶的轮廓清晰。图 9 所示为各算法对 build 红外图像的增强结果。从图 9 各算法增强的图像可见, 图 9(b) 建筑物偏亮, 而植物亮度偏暗, 图像的对比较低, 建筑物的边缘模糊, 街道上车辆等细节信息丢失。图 9(c) 地面偏亮, 地面的轮廓模糊, 车辆等细节内容丢失, 建筑物较为模糊, 房子的屋顶对比度较低。图 9(d) 建筑物和地面的亮度适中, 图像的整体对比度较好, 地面车辆等细节内容清晰可见, 建筑物的边缘也较为清晰, 房子屋顶的对比度也较好。由此可见, 所提算法增强的图像不仅较好的保留了图像的边缘等细节内容, 而且还具有较好的亮度和对比度特征。因为所提算法通过频域中像素点与中心像素点的距离, 构造了指数型同态函数, 形成指数同态滤波方法, 在完成图像去噪和增强对比度的同时, 保护了图像的细节信息。同时所提算法还利用了相位一致性方法和自适应的高提升滤波方法构造了细节锐化规则, 对图像的细节特征进行了锐化, 使得增强后图像提高了细节特征的表达能力, 从而得到了质量良好的增强图像。

2.2 客观数值测试

信息熵^[18] (information entropy, IE) 和标准差 (standard deviation, SD) 以及平均梯度 (average gradient, AG) 分别从图像所含信息量大小和图像像素间的灰度差异性方面, 以及图像细节内容的表达能力度量了增强图像的质量。其中 IE 越大, 就表明增强图像具有更多的信息量, 图像就拥有更多的细节内容, 图像的质量就越好^[18]。SD 越大, 就说明像素点间的灰度差异越明显, 图像的对比度就越好^[19]。AG 越大, 就说明图像细节内容

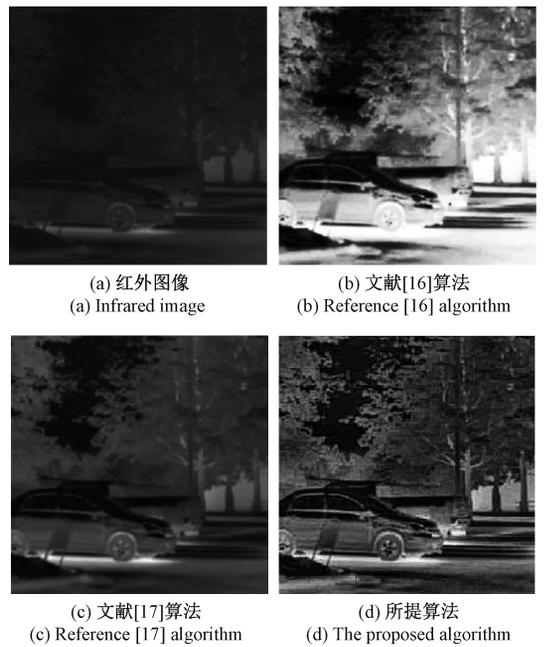


图 6 各算法对 car-trees 红外图像的增强结果
Fig. 6 The enhancement results of car trees infrared image by each algorithm

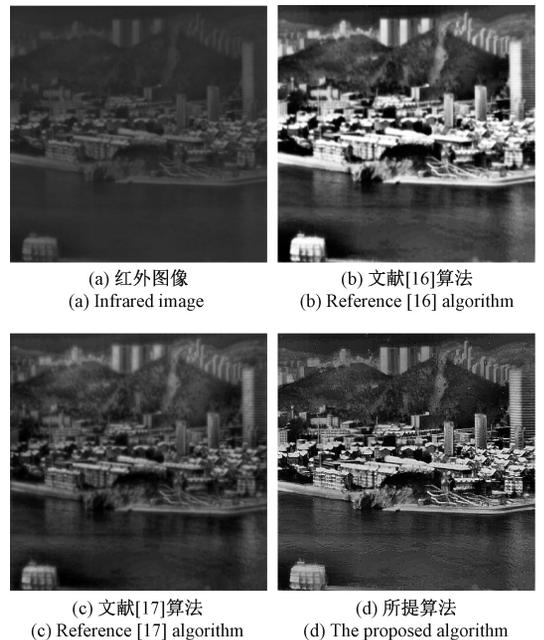


图 7 各算法对 city-ocean 红外图像的增强结果
Fig. 7 The enhancement results of city-ocean infrared image by each algorithm

表达能力越好^[20]。对于 $M \times N$ 大小的图像 $I(x, y)$, IE、SD 以及 AG 的计算过程分别为:

$$IE = - \sum_{j=0}^{L-1} p(j) \log_2 p(j) \quad (19)$$

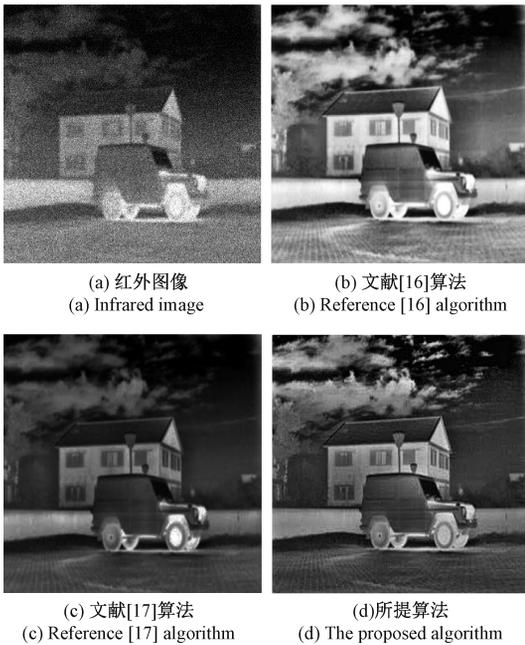


图 8 各算法对 house-jeep 红外图像的增强结果
Fig. 8 The enhancement results of house-jeep infrared image by each algorithm

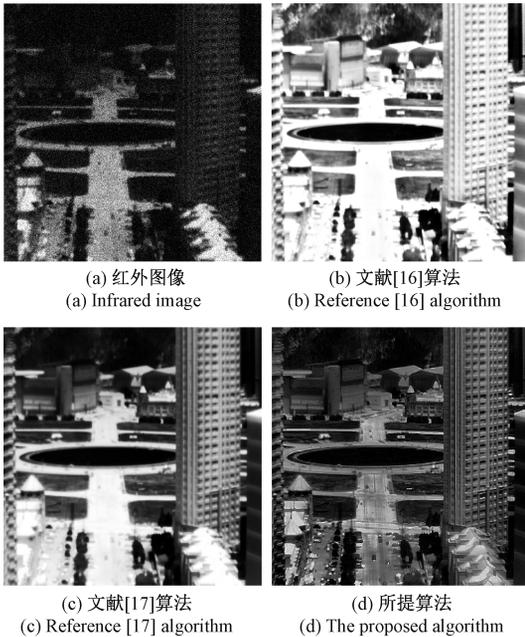


图 9 各算法对 build 红外图像的增强结果
Fig. 9 The enhancement results of build infrared image by each algorithm

$$SD = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [I(x,y) - \bar{I}]^2} \quad (20)$$

$$AG = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\frac{\nabla I_x(i,j)^2 + \nabla I_y(i,j)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

式中: L 为 $I(x,y)$ 的灰度总数; $p(j)$ 为灰度为 j 像素点的

概率; \bar{I} 为 $I(x,y)$ 的均值; $\nabla I_x(i,j)$ 和 $\nabla I_y(i,j)$ 分别为 x 和 y 方向上 $I(x,y)$ 的梯度。

采用文献[16-17]算法和所提算法,对主观评价测试时的 4 幅红外图像进行增强。通过度量主观评价测试时各算法增强图像对应的 IE 、 SD 以及 AG 结果,来实现对各算法的客观数值测试。表 1 所示为各算法增强图像对应的 IE 、 SD 以及 AG 结果。分析表 1 各算法增强图像对应的 IE 、 SD 以及 AG 结果可见,所提算法增强图像的 IE 、 SD 以及 AG 结果,强于文献[16-17]算法增强图像的 IE 、 SD 以及 AG 结果。观察图 7 各算法增强图像,对应的 IE 、 SD 以及 AG 结果可见,所提算法对应的 IE 、 SD 以及 AG 结果分别为 7.418 6、36.617 3 和 13.176 3。由此说明,所提算法增强的图像含有较丰富的信息量,具有较好的细节表达能力,同时图像的对比度也较好。因为所提算法利用指数同态滤波方法去除了图像中的噪声,保护了图像的边缘等细节特征,增强了图像的对比度。通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法构造的细节锐化规则,对图像的细节进行了锐化,提高了图像的细节表达能力,从而促进了所提算法的图像增强性能。文献[16]算法中将图像分解为结构层和纹理层,并通过基于 Retinex 方法的图像增强算法对结构层进行增强,利用掩模加权最小二乘法对纹理层进行细节增强。由于 Retinex 方法在增强图像时,需要借助高斯滤波方法来完成,而高斯滤波方法不能较好的保护图像的细节特征,而且掩模加权最小二乘法对细小纹理等细节特征的增强效果不明显,使得文献[16]算法的增强效果欠佳。文献[17]算法通过多级小波变换方法将图像分解后,对各级图像采用邻域阈值技术,对各级子图进行去噪和增强,最后采用逆小波变换的方法获取增强图像。由于小波变换方法分解图像时易丢失图像的细节信息,而且邻域阈值技术对阈值设置的要求较高,易使得增强图像出现细节特征丢失和光晕等现象,从而降低了文献[17]算法的增强效果。

表 1 各算法的客观数值测试结果

Table 1 Objective numerical test results of each algorithm

名称		图 6	图 7	图 8	图 9
本文算法	IE	7.891 5	7.418 6	7.387 3	7.408 3
	SD	38.427 3	36.617 3	37.861 3	37.943 2
	AG	14.987 3	13.176 3	14.687 2	14.973 1
文献[16]	IE	7.691 4	7.216 4	7.146 3	7.297 3
	SD	36.834 6	34.168 3	35.493 4	36.073 4
	AG	12.763 4	11.863 4	12.743 6	12.873 6
文献[17]	IE	7.746 4	7.346 1	7.246 9	7.394 3
	SD	37.043 8	35.497 3	36.419 3	37.643 1
	AG	13.543 1	12.843 6	13.497 2	13.893 7

3 结 论

本文采用像素点间的距离构造了指数同态函数,形成了指数同态滤波方法,用于去除图像噪声、优化图像对比度的同时,保护图像的细节特征。通过相位一致性方法和自适应高提升滤波方法构造了细节锐化规则,提取了图像的细节特征,并对所提取细节特征进行了锐化处理,使得增强图像能够较好的表达图像的细节特征。实验结果显示,所提算法增强的图像具有较为理想的质量,呈现出较高的对比度和清晰度。

参考文献

- [1] 姜维,王学春,杨勇. 基于结构特征先验与多尺度反锐化掩模机制的红外图像增强算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(4):1-9.
- JIANG W, WANG X CH, YANG Y. Infrared image enhancement algorithm based on structural feature priori and multi-scale non-sharpening masking mechanism [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(4):1-9.
- [2] 张瑞,汤心溢,李争. 低照度短波红外图像增强算法[J]. 红外与毫米波学报, 2020,39(6):818-824.
- ZHANG R, TANG X Y, LI ZH. Research on low illumination shortwave infrared image enhancement algorithm[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020,39(6):818-824.
- [3] 顾振飞,袁小燕,张照锋. 基于简化大气散射模型的单幅红外图像增强方法[J]. 电子器件, 2019,42(5):1229-1236.
- GU Z F, YUAN X Y, ZHANG Z F. A single infrared image enhancement method based on the simplified atmospheric scattering model [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019,42(5):1229-1236.
- [4] 孔祥阳,赵永强,彭群. 基于互结构正则约束的红外偏振图像增强算法[J]. 光子学报, 2020,49(5):160-165.
- KONG X Y, ZHAO Y Q, PENG Q N. Infrared polarization image enhancement algorithm based on mutual structure regularization constraint [J]. Acta Photonica Sinica, 2020,49(5):160-165.
- [5] LOH Y P, LIANG X F, CHAN C S. Low-light image enhancement using Gaussian Process for features retrieval[J]. Signal Processing: Image Communication, 2019,74(1):175-190.
- [6] 王爽,邵艳明,宋敏敏. 种面向目标跟踪性能的红外图像自适应增强方法[J]. 红外技术, 2019,41(7):646-653.
- WANG SH, SHAO Y M, SONG M M. An adaptive enhancement method for infrared image based on target tracking performance [J]. Infrared Technology, 2019,41(7):646-653.
- [7] WANG P, SUN Z M. Multi-level decomposition Retinex low-light image enhancement algorithm [J]. Application Research of Computers, 2020,37(4):1204-1209.
- [8] 苏本跃,储小玉,盛敏. 同态滤波下 RGB-D 点云配准方法[J]. 中国图象图形学报, 2019,24(11):1985-1997.
- SU B Y, CHU X Y, SHENG M. RGB-D point cloud registration method via homomorphic filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2019,24(11):1985-1997.
- [9] LIANG X M, TIAN T, LIU W T. Flotation froth image segmentation based on highlight correction and parameter adaptation [J]. Mining, Metallurgy and Exploration, 2020,37(2):467-474.
- [10] YUGANDERA P, TEJASWINIA C H, MEENAKSHIA J. MR image enhancement using adaptive weighted mean filtering and homomorphic filtering [J]. Procedia Computer Science, 2020,167(1):677-685.
- [11] 刘笑楠,张文云,高艳娜. 局部置乱结合双随机相位编码的双虹膜身份模板保护方法[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(6):233-239.
- LIU X N, ZHANG W Y, GAO Y N. Double iris identity template protection method combining partial scrambling and double random phase coding [J]. Journal of Instrumentation, 2020,41(6):233-239.
- [12] ZAHEERUDDINA S, SUGANTHIB K. Image contrast enhancement by homomorphic filtering based parametric fuzzy transform [J]. Procedia Computer Science, 2019,165(1):166-172.
- [13] JUNEJA K, RANA C. LBP pattern-processed Log-Gabor filter for expression and illumination robust facial recognition [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2019,553(1):795-803.
- [14] 刘帅,刘元宁,庄述鑫. 自适应优化 Log-Gabor 滤波器与动态径向基函数神经网络的虹膜识别[J]. 吉林大学学报(理学版), 2019,57(2):331-338.
- LIU S, LIU Y N, ZHUANG S X. Iris recognition based on adaptive optimization Log-Gabor filter and dynamic RBF neural network [J]. Journal of Jilin University

(Science Edition), 2019, 57(2): 331-338.

- [15] ANOOP B N, JOSEPH J, WILLIAMS J. A prospective case study of high boost, high frequency emphasis and two-way diffusion filters on MR images of glioblastoma multiforme [J]. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine, 2018, 41(2): 415-427.
- [16] JIANG X S, YAO H X, LIU D L. Nighttime image enhancement based on image decomposition [J]. Signal Image and Video Processing, 2019, 13(1): 189-197.
- [17] UMOH I J, ONUH G, SIKIRU T H. 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(1): 202-209.
- [18] 路皓翔, 刘振丙, 郭棚跃. 多尺度卷积结合自适应双区间均衡化的图像增强 [J]. 光子学报, 2020, 49(10): 158-172.
LU H X, LIU ZH B, GUO P Y. Multi-scale convolution combined with adaptive Bi-interval equalization for image enhancement [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(10): 158-172.
- [19] 李贤阳, 阳建中, 杨竣辉. 基于改进的直方图均衡化与边缘保持平滑滤波的红外图像增强算法 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(3): 96-103.
LI X Y, YANG J ZH, YANG J H. Infrared image enhancement algorithm based on improved histogram equalization and edge preserving smoothing filter [J]. Computer Application and Software, 2019, 36(3): 96-103.
- [20] 杨先凤, 蒋欣岑, 杜晶晶. 融合伽马变换及分数阶的低照度图像增强算法 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42(3): 762-769.
YANG X F, JIANG X L, DU J J. Low illumination image enhancement algorithm based on gamma transform and fractional order [J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(3): 762-769.

作者简介



王欣, 2007 年于徐州师范大学获学士学位, 2011 年于南京工业大学获硕士学位, 2021 年于泰国正大管理学院获博士学位, 现为南京工业大学浦江学院副教授, 主要研究方向为计算机图形图像、红外检测技术、云计算与大数据。

E-mail: njwangxin@sina.com

Wang Xin received B. Sc. degree from Xuzhou Normal University in 2007, M. Sc. degree from Nanjing Tech University in 2011, and Ph. D. degree from PANYAPIWAT Institute of Management in 2021. Now he is an associate professor at Nanjing Tech University Pujiang Institute. His main research interests include computer graphics & image, infrared detection technology, cloud computing and big data.



徐平平, 1982 年于东南大学获学士学位, 1989 年于东南大学获硕士学位, 2000 年于东南大学获博士学位, 现为东南大学教授, 主要研究方向为物联网、计算机图形学。

E-mail: xpp@seu.edu.cn

Xu Pingping received B. Sc. degree from Southeast University in 1982, M. Sc. degree from Southeast University in 1989, and Ph. D. degree from Southeast University in 2000. Now she is a professor at Southeast University, her main research interests include internet of things and computer graphics.



吴菲, 2006 年于南京邮电大学获学士学位, 2009 年于南京邮电大学获硕士学位, 2021 年于泰国正大管理学院获博士学位, 现为南京工业大学浦江学院讲师, 主要研究方向为图像处理、机器学习、数据挖掘。

E-mail: christynj@163.com

Wu Fei received B. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2006, M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2009, and Ph. D. degree from PANYAPIWAT Institute of Management in 2021. Now she is a lecturer at Nanjing Tech University Pujiang Institute. Her main research interests include image processing, machine learning and data mining.