

基于改进同态滤波的红外图像增强算法

张珂^{*}, 廖育荣, 罗亚伦, 程凌峰

航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416

摘要 针对红外图像的边缘细节特征不清晰、整体对比度低等问题,提出一种结合单参数同态滤波和限制对比度的自适应直方图均衡的红外图像增强算法。首先,基于单参数的同态滤波对图像进行处理,研究一种单一参数的传递函数,使得同态滤波算法参数可控且不依赖于实验经验,同时明显增强红外图像的细节特征。然后,利用限制对比度的自适应直方图均衡化对红外图像进行动态范围调整,提高红外图像对比度。实验仿真结果表明,该算法可以明显增强图像细节特征、提高图像对比度,使红外图像更有利于后续观察。

关键词 图像处理; 红外图像增强; 单一参数; 同态滤波; 直方图均衡化

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213373

Infrared Image Enhancement Algorithm Based on Improved Homomorphic Filtering

Zhang Ke^{*}, Liao Yurong, Luo Yalun, Cheng Lingfeng

Department of Electronic and Optical, Engineering Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract To solve the problems of unclear edge details and low overall contrast of infrared images, an adaptive histogram equalization algorithm combining single parameter homomorphic filtering and limited contrast is proposed. First, the image is processed based on homomorphic filtering with single parameter, and a transfer function with single parameter is studied to make the homomorphic filtering algorithm parameters controllable and independent of experimental experience, while significantly enhancing the details of infrared images. Then, the adaptive histogram equalization with limited contrast is used to adjust the dynamic range of the infrared image to improve the contrast of the infrared image. The simulation results show that the algorithm can significantly enhance the image details, improve the image contrast, and make the infrared image more conducive to subsequent observation.

Key words image processing; infrared image; single parameter; homomorphic filtering; histogram equalization

1 引言

近年来,随着红外(IR)成像技术不断发展成熟,红外热成像系统被广泛应用于工业、国防军事、民用等领域^[1]。红外图像在成像过程中,受到红外探测器自身性能以及大气云层反射等因素的共同影响,导致红外图像存在目标细节模糊、整体对比度低、视觉效果差等问题。存在的问题对后续红外图像观察和目标检测产生较大影响,因此通过算法增强红外图像的细节特征、增大图像对比度、降低噪声等显得尤为必要。

传统的红外图像增强算法包括基于空间域和基于变换域的增强。其中:基于空间域的算法通过调整灰度增强图像,典型的算法包括直方图均衡化(HE)、自

适应直方图均衡化(AHE);基于变换域的算法将图像从空间域转换到频率域,如小波变换、傅里叶变换。直方图均衡化将图像的灰度直方图分布处理为近似均匀分布,以此来增强对比度^[2]。但是直方图均衡化在增加对比度的同时也放大了噪声、丢失了图像的细节特征,因此文献[3]提出自适应直方图均衡化。自适应直方图均衡化利用局部区域内的像素构建映射函数,重新分布亮度来提高局部对比度以及获得更多的细节特征,但是同时也增加了噪声。为了抑制噪声,文献[4]提出限制对比度的自适应直方图均衡算法(CLAHE),该算法通过设置阈值对局域内的直方图进行裁剪,以限制对比度进而避免放大噪声。仅仅使用直方图均衡算法进行增强达不到很好的效果。而同态滤波器作为频域

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-01-11; 录用日期: 2022-01-28; 网络首发日期: 2022-02-08

通信作者: m17854270811@163.com

滤波器的一种,融合图像处理的空域特性和频域特性,并且将复杂运算转换为效果相同但相对简单的运算。文献[5]提出结合同态滤波的红外图像增强算法,该算法首先通过同态滤波增强对比度,然后使用限制对比度的自适应直方图均衡进行动态范围调整,提高红外图像的分辨率和对比度。文献[6]使用快速小波变换将同态滤波中的傅里叶变换替换,利用小波变换在时域和频域良好的局部性特点,避免了傅里叶变换的不足。但是文献[6]和文献[7]中同态滤波器参数的设定大多都为经验值且参数众多,不容易控制。文献[7]针对多参数的同态滤波器,提出一种单参数的同态滤波器可见光图像增强算法,该算法避免了参数值经验化及参数不易控制的缺点,但是对于某些图像的峰值信噪比提升不足。

本文针对红外图像成像的整体对比度低、细节特征不足、视觉效果模糊等缺点,提出一种单参数的同态滤波结合限制对比度直方图均衡化的算法来增强红外图像。该算法使用新构造的传递函数,避免同态滤波器多

参数难以控制的缺点,同时保持相同效果,然后使用限制对比度的自适应直方图均衡化调整动态范围,完成红外图像增强。实验结果表明,所提算法能够有效提高整体对比度,增加细节特征,最终有较好的视觉效果。

2 算法设计

红外图像在成像时由于受到红外成像系统器件本身缺陷以及辐射信号波长等因素的影响,得到的图像往往存在整体对比度低、细节特征不突出、视觉效果差等缺点。针对上述缺点,结合单参数的同态滤波和限制对比度直方图均衡化的算法对红外图像进行增强。改进之处如下:1)构造新的传递函数,使用新的单参数传递函数替换多参数函数,大大减少确定多个参数的实验次数,提高参数的可控性,同时改善图像亮度不均匀的问题,增加其细节特征;2)使用限制对比度自适应直方图均衡化算法对滤波后图像的动态范围进行调整,通过对区域内像素点进行线性插值消除块状效应,有效提高图像整体对比度。所提算法整体流程如图1所示:

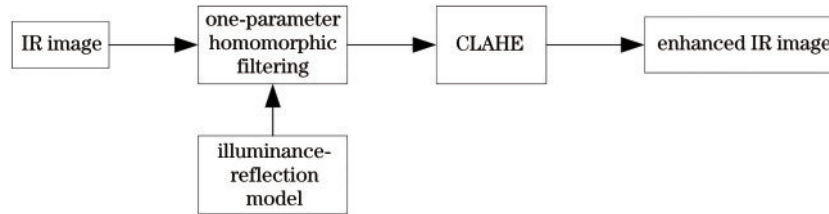


图1 基于改进同态滤波的红外图像增强算法

Fig. 1 Infrared image enhancement algorithm based on improved homomorphic filtering

2.1 同态滤波原理及优化

在红外图像的获取过程中,避免不了的噪声干扰使图像质量下降,一般为乘性噪声即噪声与图像以相乘的方式混合,可采用图像的照度-反射模型^[8]描述,其表达式为

$$F(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y), \quad (1)$$

式中: $F(x, y)$ 表示获取到的图像; $i(x, y)$ 为照度分量,表示图像的低频部分,变化较为缓慢; $r(x, y)$ 为反射分量,表示图像的高频部分,变化较快。这种结合方式导致两个分量在频率域内不能分离,而线性滤波器不易滤除乘性噪声。同态滤波作为线性滤波,不能直接处理乘性噪声,需要使用非线性的对数函数将其转换为加性噪声,再进行下一步处理,然后用指数变换转换为图像^[9]。总体流程如图2所示,图2中: \ln 为对数变换; FFT 为快速傅里叶变换; $H(u, v)$ 为滤波器的传递函数; IFT 为快速傅里叶逆变换; \exp 为指数变换。具体计算步骤如下:

1)对式(1)两端取对数,即

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

2)对式(2)进行快速傅里叶变换,得到频域表达式:

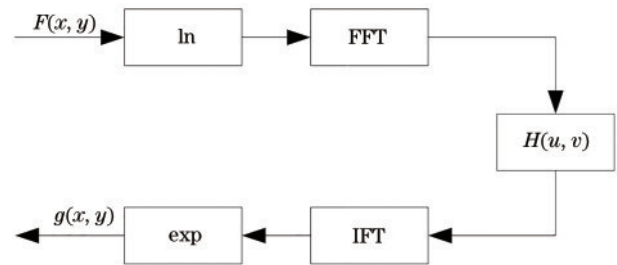


图2 同态滤波算法流程图

Fig. 2 Flow chart of homomorphic filtering algorithm

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

3)用增强函数 $H(u, v)$ 对式(3)两端处理:

$$F(u, v) \cdot H(u, v) = I(u, v) \cdot H(u, v) + R(u, v) \cdot H(u, v), \quad (4)$$

式中: $H(u, v)$ 为同态滤波的传递函数,并且在频域中对照射分量进行削弱,对反射分量进行增强,达到增加细节特征的目的。

4)对式(4)进行快速傅里叶反变换:

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

5)对式(5)两端同时取指数:

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

式中: $g(x, y)$ 为经过同态滤波后的图像, 滤波器函数的选择决定增强效果。所需滤波器需要分别处理图像高频和低频分量, 削弱低频分量, 增加高频分量, 达到增加细节信息、压缩图像动态范围的目的。此滤波器原理上类似于高通滤波器, 因此常采用优化的高斯高通型滤波器作为同态滤波器。传统的高斯高通型同态滤波器函数^[10]为

$$\begin{cases} H(u, v) = 1 - \exp[-c(D(u, v)/D_0)^{2n}] \\ D(u, v) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $D(u, v)$ 为任一点的频率到中心点频率之间的距离; D_0 为截止频率; 常数 c 控制坡面锐化度; n 为滤波器阶数。优化之后:

$$H(u, v) = (R_h - R_l) \times \left\{ 1 - \exp[-c(D(u, v)/D_0)^{2n}] \right\} + R_l, \quad (8)$$

式中: R_h 为高频增益; R_l 为低频增益。然而传统同态滤波器的参数较多, 不易控制, 且参数值的确定需要大量的实验, 对不同的图像参数值不同。

为了解决同态滤波器的参数较多的问题, 同时保证相似的增强效果, 本研究提出一种基于双重指数函数的单参数同态滤波器传递函数, 其基本函数模型为

$$y = a \times \exp[\exp(b - kx)]. \quad (9)$$

当 $a = 1, b = 1, k = 1$ 时, 式(9)曲线如图 3 所示:

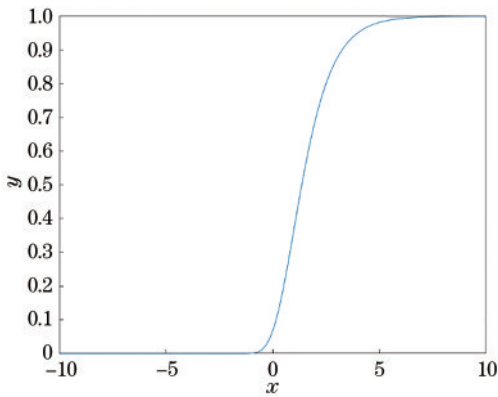


图 3 双重指数曲线图

Fig. 3 Double exponential graph

该双重指数函数曲线与同态滤波的滤波器剖面结构相似, 由此构造的新传递函数为

$$H(u, v) = \exp\{\exp[1 - \alpha \times D(u, v)]\}, \quad (10)$$

式中: α 为参数变量。新构造的传递函数三维结构如图 4 所示。高斯高通型同态滤波器是高通滤波器的变形, 未优化的滤波器即未加高低频增益的滤波器的三维结构如图 5 所示。

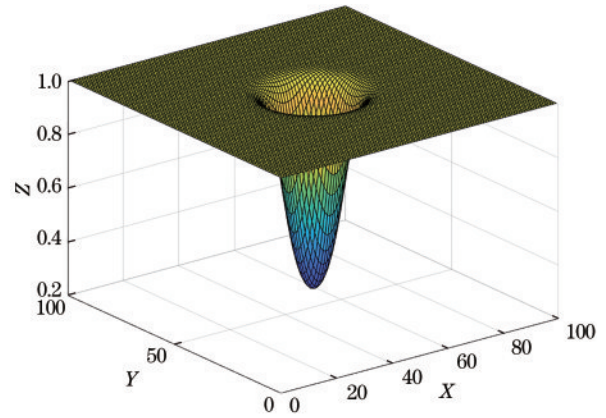


图 4 新构造的传递函数三维图

Fig. 4 Three-dimensional diagram of newly constructed transfer function

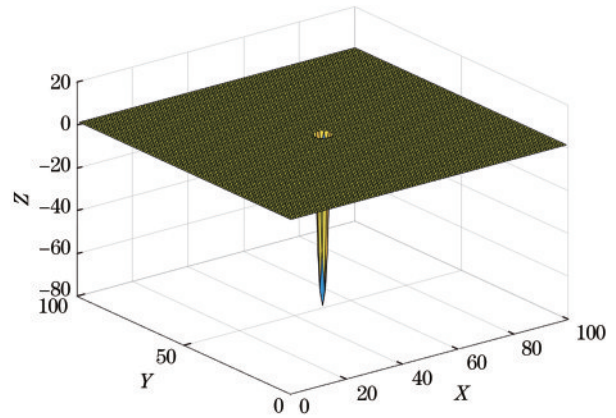


图 5 高斯型滤波器传递函数三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of Gaussian filter transfer function

同态滤波器主要作用是增强高频、削弱低频, 增强细节特征, 与带通滤波器在原理上类似。带通滤波器的高频与低频的截止频率分别为其信号功率降低一半时的值, 然而对于同态滤波器, 其设计常为高通滤波器加上低频增益, 使其在 1 上下波动。比较图 4 和图 5 可知, 所提滤波算法从中心频率到高频的过渡较为平缓, 斜率相对较小, 使得滤波效果更加均匀, 并且对于图像的低频分量也有增益, 避免调整动态范围时出现过压缩的现象。

2.2 基于线性的限制对比度的自适应直方图均衡

经过单参数同态滤波的红外图像, 细节特征得到增强。但图像整体较暗, 动态范围和对比度较低, 导致增强后的图像细节信息不明显。因此继续使用限制对比度的自适应直方图均衡处理滤波后的图像, 对灰度值进行有效拉伸来调整动态范围和提高图像对比度。

CLAHE 在 HE 操作的基础上, 利用计算得出的幅值对每个子块直方图的幅值进行限制, 可以对噪声进行有效抑制, 增加动态范围和增强对比度。具体算法流程如下:

- 1) 将图像分割为大小相同且相互不重叠的连续

子块。

2) 计算得到的每个子块的直方图。

3) 根据每个子块直方图的像素分布,选择像素数目前 25% 的像素级,通过式(11)计算的裁剪幅值适用于每个子块,并且效果较好^[11]。

$$T = \sum_{i=1}^i g_i / s, \quad (11)$$

式中: g_i 为对应的像素数目; s 为前 25% 的灰度级数。

4) 对子块的直方图进行裁剪,并且分配其像素点。使用式(11)得到裁剪幅值 T 对子块直方图进行裁剪,将超过幅值的像素点均匀分布到其余部分,如图 6 所示。

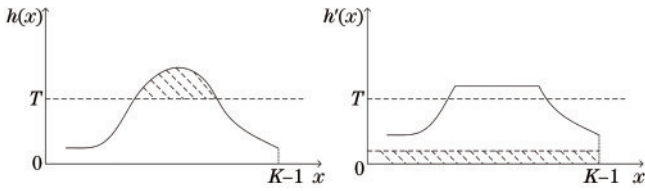


图 6 直方图裁剪及分配

Fig. 6 Histogram cropping and distribution

5) 对重新分配像素的子块直方图进行 HE 操作。

6) 线性插值。子块直方图进行 HE 操作时,由于每个子块的映射函数不同,仅用相应子块的映射函数会导致图像在各子块交界处有块状效应,因此使用双线性插值运算解决子块边缘过渡不理想的问题。

对于边角区域的像素用黑色标记,利用黑色子块本体的映射函数进行运算。除四角外的边缘区域用白色标记,其映射值由白色块相邻子块的映射函数计算得到,再对其映射值进行线性插值运算,如图 7 所示。

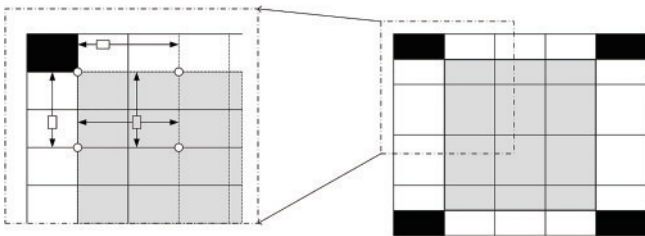


图 7 线性插值

Fig. 7 Linear interpolation



图 8 算法比较实验 1。(a)原图;(b)高斯高通型;(c) CLAHE;(d)所提算法

Fig. 8 Algorithm comparison experiment 1. (a) Original image; (b) Gaussian high-pass type; (c) CLAHE; (d) proposed algorithm

$$f(x, y) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f_1(x_1, y_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f_2(x_2, y_2), \quad (12)$$

式中: $f_1(x_1, y_1)$ 和 $f_2(x_2, y_2)$ 为 (x, y) 通过相邻子块映射函数得到的映射值。

除上述边缘区域外为灰色标记的中心区域,该处的像素值使用其周围 4 个子块的映射函数计算得到 4 个映射值,然后使用双线性插值对 4 个映射值进行计算:

$$f(x, y) = \frac{(x'_2 - x)(y'_2 - y)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} f_1(x_1, y_1) + \frac{(x'_2 - x)(y - y'_1)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} f_2(x_2, y_2) + \frac{(x - x'_1)(y'_2 - y)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} f_3(x_3, y_3) + \frac{(x - x'_1)(y - y'_1)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} f_4(x_4, y_4), \quad (13)$$

式中: $f_1(x_1, y_1)$ 、 $f_2(x_2, y_2)$ 、 $f_3(x_3, y_3)$ 和 $f_4(x_4, y_4)$ 为 (x, y) 通过周围 4 个子块的映射函数得到的映射值。

3 实验结果分析

3.1 实验仿真环境及结果

为了验证所提红外图像增强算法的效果,选择不同场景的原始红外图像进行测试,与优化后高斯高通型同态滤波算法、CLAHE 进行仿真实验对比。本实验在 Windows 10 操作系统下进行,仿真软件为 MATLAB2019b,主要配置为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU,主频为 2.20 GHz,内存为 32 GB。高斯高通型同态滤波算法的参数如下: $D_0 = 80$ 、 $c = 1.2$ 、 $R_n = 1.7$ 、 $R_1 = 0.5$ 、 $n = 2$,所提算法中的 $\alpha = 0.001$ 。

实验结果分别如图 8~11 所示。从主观评价上来看,高斯高通型同态滤波、CLAHE 和所提算法都对红外图像进行了不同程度的增强,图像中所含信息相较于原图像都更加清晰。对比增强后的图像可知:经过高斯高通型同态滤波算法处理的图像有效改善了亮度不均匀的问题,明显提升了图像的细节特征,但是整体图像偏暗,动态范围不足;经过限制对比度的自适应直方图均衡化算法处理的图像在视觉效果上有了提升,增加了图像的对比度,但是对于图像细节特征并无提升;通过所提算法处理后的图像明显改善了图像整体

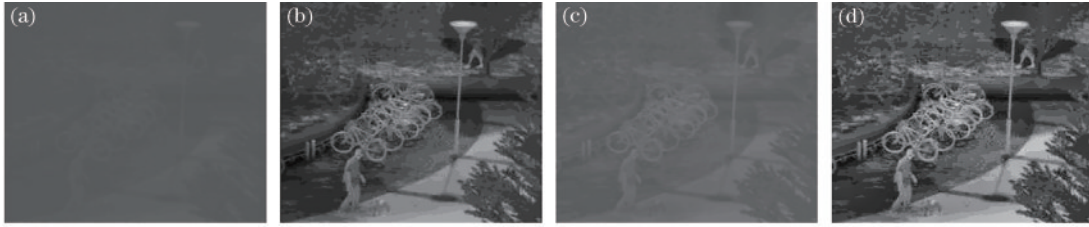


图 9 算法比较实验 2。(a)原图;(b)高斯高通型;(c) CLAHE;(d) 所提算法

Fig. 9 Algorithm comparison experiment 2. (a) Original image; (b) Gaussian high-pass type; (c) CLAHE; (d) proposed algorithm

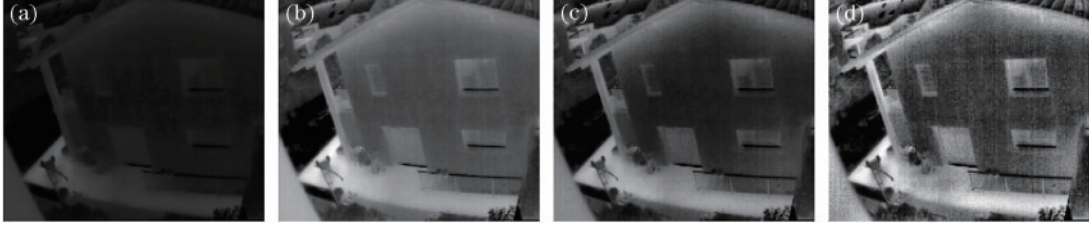


图 10 算法比较实验 3。(a)原图;(b)高斯高通型;(c) CLAHE;(d) 所提算法

Fig. 10 Algorithm comparison experiment 3. (a) Original image; (b) Gaussian high-pass type; (c) CLAHE; (d) proposed algorithm



图 11 算法比较实验 4。(a)原图;(b)高斯高通型;(c) CLAHE;(d) 所提算法

Fig. 11 Algorithm comparison experiment 4. (a) Original image; (b) Gaussian high-pass type; (c) CLAHE; (d) proposed algorithm

的明亮程度,更加突出图像中的细节特征,有更高的清晰度,整体视觉效果更加生动,有利于后续红外图像观察。

3.2 客观评价

为进一步客观评价各算法的性能,选用图像平均梯度(AVE)^[12]、图像信息熵(IE)^[13]和峰值信噪比(PSNR)^[14]作为客观评价指标来对增强的效果进行定量评价。

图像的平均梯度表示一幅图像所包含的细节特征情况,在一定程度上表示图像细节信息的呈现能力,其表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{\text{avg}} = \frac{S}{M \times N} \\ S = \sum_{i=2}^M \sum_{j=2}^N \sqrt{\frac{[I(i,j)-I(i+1,j)]^2 + [I(i,j)-I(i,j+1)]^2}{2}} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: G_{avg} 表示平均梯度; $M \times N$ 表示图像大小; $I(i,j)$ 表示 (i,j) 处的像素值。一般来说,图像平均梯度的值越大,图像的细节特征越分明。

信息熵为另一图像质量评价指标。图像的信息熵越大表示图像包含的信息越多,其表达式为

$$E = - \sum_m^{L-1} p(l) \log_2 p(l), \quad (15)$$

式中: E 为图像信息熵; $p(l)$ 为图像灰度级 l 的分布密度函数; L 为图像灰度级。

图像的峰值信噪比表示图像信号最大可能功率和噪声功率的比值,其数值越大表示图像质量越好。

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{L^2}{M \times N \sum \sum [I(i,j) - I(i,j)]^2}, \quad (16)$$

式中: $I(i,j)$ 、 $I(i,j)$ 表示点 (i,j) 的处理前后的灰度值。

实验结果如表 1~4 所示。从表中可以看出,所提算法不能同时兼顾平均梯度、信息熵和峰值信噪比。但在平均梯度上,所提算法较其他算法及原图有较大提升,在信息熵方面,所提算法较其他算法及原图有明显提升。

对于图像来说,主要信息由低频部分表示,而高频部分不仅包含图像的细节特征及边缘信息,还存在着噪声。由于所提算法对高频部分增强能力大于其他算法,由所提算法增强后的图像高频信息比其他算法的高频信息要多,从而使噪声的高频信息更多。因此在峰值信噪比方面,所提算法略低于其他算法。但是所提算法还存在低频增益,所以在视觉效果方面改善较为明显。

表 1 不同算法客观指标比较(图 8)

Table 1 Comparison of objective indicators of different algorithms (Fig. 8)

Algorithm	AVG	IE	PNSR
Unprocessed	0.3313	2.8139	
Gaussian high-pass type Homomorphic filtering	5.0287	3.8174	18.7686
CLAHE	1.1655	4.4677	24.2069
Proposed algorithm	8.4395	7.1016	16.9241

表 2 不同算法客观指标比较(图 9)

Table 2 Comparison of objective metrics of different algorithms (Fig. 9)

Algorithm	AVG	IE	PNSR
Unprocessed	1.7030	4.7987	
Gaussian high-pass type Homomorphic filtering	2.5163	5.1141	19.0423
CLAHE	3.9384	6.5199	20.2797
Proposed algorithm	7.0356	7.0982	20.2917

表 3 不同算法客观指标比较(图 10)

Table 3 Comparison of objective metrics of different algorithms (Fig. 10)

Algorithm	AVG	IE	PNSR
Unprocessed	1.8562	5.5586	
Gaussian high-pass type Homomorphic filtering	5.1615	6.6853	15.9972
CLAHE	5.6597	7.0467	14.6205
Proposed algorithm	11.6736	7.6379	13.9614

表 4 不同算法客观指标比较(图 11)

Table 4 Comparison of objective metrics of different algorithms (Fig. 11)

Algorithm	AVG	IE	PNSR
Unprocessed	0.4067	4.1433	
Gaussian high-pass type Homomorphic filtering	4.2809	4.8172	10.2381
CLAHE	5.1099	7.4538	10.0618
Proposed algorithm	6.2192	7.6457	10.5492

4 结 论

提出一种基于改进同态滤波的红外图像增强算法,该算法利用双指数函数构造新的传递函数,避免同态滤波器的多参数问题,提高参数变量的可控性。首先通过单参数的同态滤波对红外图像进行处理,增强红外图像细节特征,然后利用限制对比度的自适应直方图均衡算法进一步调整动态范围,增加图像对比度。实验结果与理论分析表明,照度不均匀、低照度及信息模糊的图像,经所提算法增强后提升了对比度、丰富了图像细节特征、调整了动态范围,视觉效果更好。但所

提算法在峰值信噪比方面提升并不明显,需要在图像高频范围内进一步分离噪声,从而提高信噪比。

参 考 文 献

- [1] 刘哲. 红外图像非均匀性校正及增强算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
Liu Z. Research on algorithms of nonuniformity correction and enhancement for infrared images[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [2] 丁畅, 董丽丽, 许文海. “直方图”均衡化图像增强技术研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(23): 12-17.
Ding C, Dong L L, Xu W H. Review of “histogram” equalization technique for image enhancement[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(23): 12-17.
- [3] Pizer S M, Amburn E P, Austin J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 39(3): 355-368.
- [4] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Heckbert P S. Graphics gems. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [5] 胡窦明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 224-228.
Hu D M, Zhao H S, Li Y C, et al. A new approach to infrared image enhancement based on homomorphic filter [J]. Infrared Technology, 2012, 34(4): 224-228.
- [6] 董静薇, 赵春丽, 海博. 融合同态滤波和小波变换的图像去雾算法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(1): 66-70.
Dong J W, Zhao C L, Hai B. Research on image de-fog algorithm based on fusion homomorphic filtering and wavelet transform[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(1): 66-70.
- [7] 冯相辉. 一种改进的同态滤波图像增强算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 138-145.
Feng X H. An improved homomorphic filtering image enhancement algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(1): 138-145.
- [8] 王智奇, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 75-80.
Wang Z Q, Li R B, Liu J Y, et al. Image enhancement algorithm based on homomorphic filtering and histogram equalization[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 75-80.
- [9] 朱志勋, 赵磊, 李恒, 等. 基于改进的同态滤波与 Canny 算法的磁瓦表面缺陷检测算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(18): 1810009.
Zhu Z X, Zhao L, Li H, et al. Research on magnetic tile surface defect detection algorithm based on improved homomorphic filtering and Canny algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(18): 1810009.
- [10] 王秋云. 一种改进的照度不均图像增强方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(2): 33-35.
Wang Q Y. An improved method of uneven illumination

- image enhancement[J]. Automation & Instrumentation, 2017(2): 33-35.
- [11] 王红茹, 李瑞, 王佳. 基于改进 CLAHE 的水下彩色图像增强算法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 119-122, 141.
Wang H R, Li R, Wang J. Underwater color image enhancement algorithm based on improved CLAHE[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(11): 119-122, 141.
- [12] Ashiba M 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.
- [13] 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.
- [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, Lü 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.