

一种基于粗糙集的红外图像多维降噪算法

王加, 周永康, 胡健钊, 潘超, 李泽民, 曾邦泽, 赵德利
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对红外图像噪声复杂多变, 在抑制噪声的同时, 还需要兼顾细节增强的问题, 本文提出了一种基于粗糙集的红外图像多维降噪算法。对采集到的红外图像通过引导滤波进行分层后运用粗糙集理论进一步多维度的分层, 分别处理后合并还原得到输出图像。综合对比主观观察与客观评价指标, 该算法能够对红外图像降噪有良好效果, 对弱小目标细节有良好的增强效果, 另外, 该算法复杂度较低, 具有良好的实时性, 在工程实现方面具有良好的应用前景。

关键词: 红外图像; 多维降噪; 引导滤波; 粗糙集; 图像分层

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)01-0044-07

Infrared Image Denoising Algorithm Based on a Rough Set Approach

WANG Jia, ZHOU Yongkang, HU Jianchuan, PAN Chao, LI Zemin, ZENG Bangze, ZHAO Deli
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: With respect to the complexity and variety of infrared image noise, it is necessary to consider the detailed enhancement of images while suppressing noise. Accordingly, this study developed an infrared image denoising algorithm using the rough set theory. Collected infrared images were first layered by guided filtering. Then, further multi-dimensional stratification was conducted using the rough set theory, and output images were obtained through merging and restoration. Compared with a subjective observation and an objective evaluation index, the algorithm was effective in infrared image denoising and helped to enhance weak and small target details. In addition, the algorithm showed low complexity and good real-time performance. It thus has good application prospects in engineering implementations.

Key words: infrared image, multi dimensional noise reduction, guided filtering, rough set, image layering

0 引言

随着红外成像技术的进步, 其广泛应用于军事与民用领域^[1], 由于红外图像成像是根据物体自身散发热辐射多少的差异区分出不同的物体, 最终将差异转换为人眼可见的图像, 生成的红外图像属于灰度图像, 不具有可见光图像的色彩区分度, 再加之环境温度、大气衰减等的影响, 最终输出的红外图像成像的品质较差^[2], 分辨率较低, 并且普遍存在着对比度低、图像边缘模糊、细节信息少等缺陷, 由于设备的限制和外界环境多种因素的影响, 导致红外图像产生了多种多样的噪声^[3], 使得生成的红外图像的信噪比较低, 对人眼的观察目标造成很大的不便。红外图像降噪算法如何在降低红外图像噪声的同时, 尽可能多的保留细节信息, 是需要深入研究的问题。

红外图像降噪处理是红外成像技术中重要的组成部分^[4], 为满足不同领域特别是军用领域的要求, 对红外图像进行更高性能和更高效率的降噪处理已经成为一种趋势。传统的红外图像降噪算法大体上可分为空间域降噪算法与变换域降噪算法, 空间域降噪算法主要包括高斯滤波、中值滤波和均值滤波等方法, 降噪效果与对细节信息的保留不足; 变换域降噪算法主要包括小波变换、Contourlet 变换等方法, 对细节信息的保留效果较好, 但是算法复杂度偏高, 难以满足实时性的要求。近年来, 基于图像分层^[5]的降噪算法得到了科研人员的重视, 通过低通滤波器将红外图像进行平滑处理, 作为背景层, 再通过输入红外图像与背景层作差, 得到细节层。对含有细节信息包括噪声的细节层进行降噪处理, 将处理后的细节层与背景层合并还原, 输出图像。常用的滤波器有引导滤

收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2020-12-30.

作者简介: 王加(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事红外图像处理算法研究, E-mail: 80393796@qq.com.

通信作者: 赵德利(1989-), 男, 硕士, 主要从事电路系统开发, E-mail: 719554525@qq.com.

波、双边滤波、加权最小二乘滤波等。

由于红外图像噪声有很多种类型,其生成过程随机且复杂,包含很多不精确的信息,粗糙集理论^[6]是一种处理不确定信息的理论,能够将不确定、不精确的信息进行分类。本文针对红外图像在降噪的同时,尽可能的兼顾细节保留与实时性的问题,将粗糙集引入红外图像的降噪处理中^[7],并根据红外图像的灰度分布,基于红外图像分层处理的思想,通过引导滤波对红外图像进行分层,再引入粗糙集理论对红外图像细节层进行进一步的分层降噪处理,提出了一种基于粗糙集的红外图像多维降噪方法。

文献[8]将粗糙集理论结合中值滤波应用于红外图像处理,阐明了粗糙集理论应用于红外图像处理的可行性,对于红外图像的边缘信息有较好的保留效果,并且说明了对于噪声分类处理的效果良好。

文献[9]结合粗糙集理论与小波变换理论,提出了一种新的结合红外图像降噪方法。将经过降噪处理后的子图进行通过小波变换,最终得到处理后的红外图像。在具有良好降噪效果的同时能够对红外图像边缘及细节信息进行小幅度的增强,但是仍会存在一定的细节丢失状况,需要进一步研究和改进。

文献[10]通过将直方图均衡以及粗糙集理论相结合的方式,使得红外图像的边缘信息更加清晰,提升红外图像的对比度,以达到更好的红外图像处理效果。证明了此算法具有较高的有效性以及可行性。

通过粗糙集理论与其他降噪算法相结合的方式,对于抑制红外图像噪声有较好的效果,但是仍然存在小细节丢失的情况,具有更深入的研究空间。

1 本文算法

本文使用探测器采集的原始 14 bits 红外图像作为输入图像,图像尺寸为 1024×768,算法框图如图 1

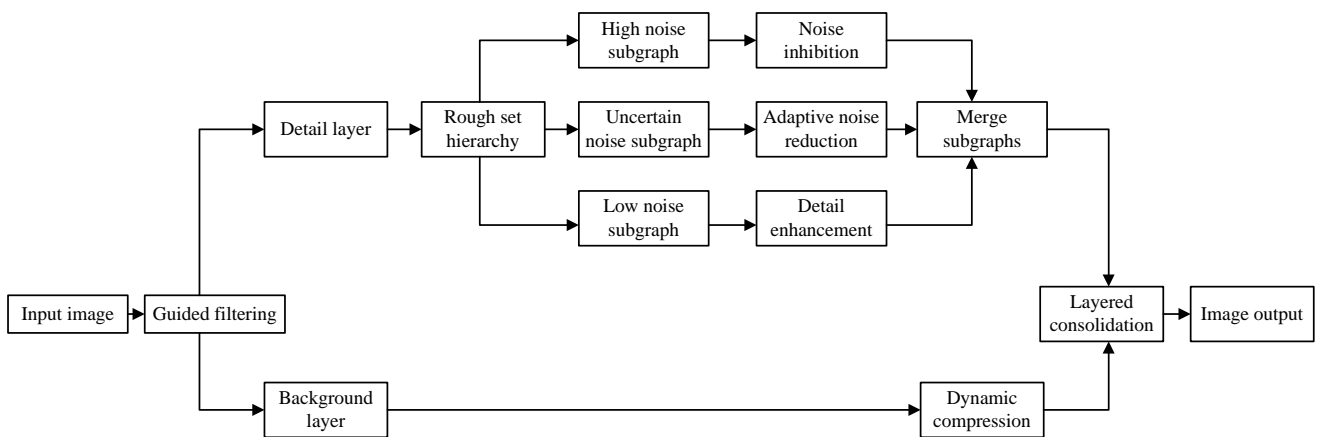


图 1 本文红外图像降噪算法框图

Fig.1 Infrared image denoising algorithm block diagram

所示,输入红外图像通过引导滤波得到背景层与细节层,再运用粗糙集理论对细节层进一步地分层,经过噪声抑制与细节增强,与背景层合并,最后输出处理后的 8 bits 红外图像。

1.1 引导滤波

引导滤波^[11]属于线性变换滤波的一种,通过一张引导图,对输入图像进行对比滤波处理,使得最后的输出图像接近于输入图像,属于边缘保持的平滑滤波,对于红外图像的分层处理起到了关键的作用^[12]。引导滤波能在平滑图像的同时对红外图像边界保持可以起到较好的作用。引导滤波的数学模型如表 1:

$$Q_i = \bar{a}_i I_i + b_i, \quad \forall i \in w_k \quad (1)$$

$$\bar{a}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k:i \in w_k} a_k \quad (2)$$

$$a_k = \frac{\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} I_i P_i - \mu_k \bar{P}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (3)$$

$$\bar{b}_i = \frac{1}{|w|} \sum_{k:i \in w_k} b_k \quad (4)$$

$$b_k = \bar{P}_k - a_k \mu_k \quad (5)$$

式中: Q_i 为输出图像; I_i 为引导图像; P_i 表示输入图像; i 表示位置像素点; w_k 表示确定的窗口; \bar{a}_i 和 \bar{b}_i 建立了每个像素点从输入到输出的关系; a_k 和 b_k 是唯一确定的常量系数; $|w|$ 表示窗口内像素点的个数; μ_k 和 σ_k^2 分别表示窗口 w_k 内的平均值和方差; \bar{P}_k 是输入图像在窗口 w_k 中的平均值。 ε 为正则化参数,用于避免 a_k 过大。

1.2 粗糙集理论

红外图像的各种降噪算法有不同的优点和缺点^[13],但是由于数字图像数据量大、噪声种类复杂以及场景的变化等因素,使得在实际的应用中,会出现很多问题。由于图像本身信息的复杂性和信息之间较强的相关性,在处理过程中可能出现不完整性和不精确性等问题,将粗糙集应用于红外图像的处理,可以将这些信息重新进行分类整合,有助于红外图像的质量提升。

粗糙集理论将一幅 $M \times N$ 个像素的红外图像看作一个整体系统,红外图像中的每个像素为系统中的一个对象。

设一个 3×3 的模板,将以中心点为核心的 $4 \times 2 \times 2$ 的子模板划分为4个方向。如图2、3所示。

$F(i-1, j-1)$	$F(i-1, j)$	$F(i-1, j+1)$
$F(i, j-1)$	$F(i, j)$	$F(i, j+1)$
$F(i+1, j-1)$	$F(i+1, j)$	$F(i+1, j+1)$

图2 3×3 滑动窗口

Fig.2 3×3 sliding window

$F(i-1, j-1)$	$F(i-1, j)$
$F(i, j-1)$	$F(i, j)$

图3 4个 2×2 滑动窗口之一

Fig.3 One of four 2×2 sliding windows

通过计算模板中心像素与周围模板像素灰度均值差的统计特征来定义子模板中的等价关系。

设 $F(i, j)$ 为窗口中心像素的灰度值,第 $k(k=1,2,3,4)$ 个模板去掉中心像素外的其它像素灰度值和为 F_k ,则中心像素与第 k 个模板的灰度差异为 $D(k)$,其表达式如下:

$$D(k) = \left| \frac{1}{3} [F(i, j) \times 3 - F_k] \right| \quad (6)$$

则模板中心像素与周围模板灰度差异均值为:

$$\text{Mean}(i, j) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 D(k) \quad (7)$$

模板中心像素与周围模板灰度差异方差为:

$$\text{Var}(i, j) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 [D(k) - \text{Mean}(i, j)]^2 \quad (8)$$

定义如下两个等价关系:

1) 等价关系 Eq_1 : 中心像素与其相邻模板间灰度均值大于阈值 The_Mean , 则 Eq_1 表示与周围模板灰度差异均值较大的像素。

2) 等价关系 Eq_2 : 中心像素与其相邻模板灰度方差小于等于阈值 The_Var , 则 Eq_2 表示与周围模板灰度差异方差较小的像素。

显然,噪声像素点与相邻模板灰度均值差异较大且与相邻模板灰度差异方差较小。这里 The_Mean 与 The_Var 取两者最大值的一半作为阈值。

用 X 表示噪声像素集合,则 X 的上、下近似如下:

$$E_d(X) = \text{Eq}_1 \cap \text{Eq}_2 \quad (9)$$

$$E_u(X) = \text{Eq}_1 \cup \text{Eq}_2 \quad (10)$$

$$P_1 = E_d(X) \quad (11)$$

$$P_2 = E_u(X) - E_d(X) \quad (12)$$

$$P_3 = I - P_2 - P_1 \quad (13)$$

式中: $E_d(X)$ 表示所有确定含噪声像素的集合; $E_u(X)$ 表示所有可能含噪声像素的集合; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为确定含噪声子图、可能含噪声也可能不含噪声子图及确定不含噪声子图; P_1 、 P_2 即为需要噪声抑制的子图。

以上为应用粗糙集理论对采集到的红外图像进行子图的划分,将含有不同信息的子图进行分类。再对含有不同信息的子图分别进行处理,最后将处理后的子图进行合并还原为细节层,再与背景层合并,最终输出红外图像。

1.3 多维噪声自适应降噪系数

在图像细节多的区域,图像的局部方差大,噪声可能被细节所掩盖^[14],而在图像细节少的区域,噪声易于观察到。在对细节层图像进行降噪时,图像的细节降噪系数根据图像的不同区域自适应地进行变化,降噪系数公式如下所示:

$$v(i, j) = \frac{1}{m(i, j) * \omega + 1} \quad (14)$$

$$g(i, j) = g_L + [1 - v(i, j)] * (g_H - g_L) \quad (15)$$

式中: 定义噪声掩膜函数 $m(i, j)$ 与图像的局部方差有关; $v(i, j)$ 用于表征噪声可见性与掩膜函数之间的关系; g_L 为图像低增益值; g_H 为图像高增益值,在统计图像中的某个像素点 $v(i, j)$ 趋近于零时,该像素点的降噪系数取值相对较大,反之系数取值相对较小。为了不使图像的细节层信息被过多的抑制, g_L 与 g_H 的选值为较小的整数。

1.4 多维降噪算法

通过引导滤波将输入图像分为背景层与细节层后,将细节层通过粗糙集理论进行进一步的分层处理,将细节层子图划分为低噪声子图、不确定含噪声子图与高噪声子图3个子图层。由于目前红外图像还达不到无噪处理,将含有较多细节信息的子图称为低噪子图。将算法分离出的多数噪声与细节信息共存的

子图称为不确定含噪声子图,将算法确定分离出的多数为噪声的子图称为高噪声子图。

对于分层的3个子图,分别进行不同的增强与抑制,最后将子图相加合并还原出处理后的图像。合并公式如下所示:

$$S = a \times I_1 + b \times I_2 + c \times I_3 \quad (16)$$

$$P = S + \text{Back} \quad (17)$$

式中: P 为最终输出图像; S 为合并还原的图像; Back 为引导滤波分离出的背景层。 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为经过粗糙集多维分层处理的低噪声子图、不确定含噪声子图与高噪声子图; a 、 b 、 c 分别为子图的增益系数,对于低噪声子图,设置增益系数 a ,对子图细节进行增强,通常情况下 $a > 1$ 。经过仿真实验选取 $a = 1.5$ 效果良好。对于不确定噪声子图,设置自适应降噪系数 b ,对子图细节进行自适应增强,取 $b = g(i, j)$ 。对于高噪声子图,设置增益系数 c ,对子图细节进行增强,通常情况下 $c < 1$ 。经过仿真实验选取 $c = 0.6$ 效果良好。

通过选取增益系数与自适应降噪系数,对红外图像经过多维分层的子图分别用不同的系数进行处理,对噪声更多的子图进行抑制,对细节更多的子图进行增强,对不确定噪声子图进行自适应降噪,最终达到噪声抑制兼顾细节增强的良好效果。

2 仿真实验结果及分析

红外探测器采集到的原始图像是 14 bits 或者更高位的灰度图像,一般而言,人眼对于灰度的分辨极限还无法达到目前显示设备的 8 bits,更无法达到红外探测器采集到的 14 位或者更高位数的图像。需要对探测器采集到的原始图像进行动态压缩,将红外图像从 14 bits 压缩到人眼能够观察的 8 bits。原始输入红外图像分辨率为 1024×768 ,位深为 14 bits。如图 4 为经

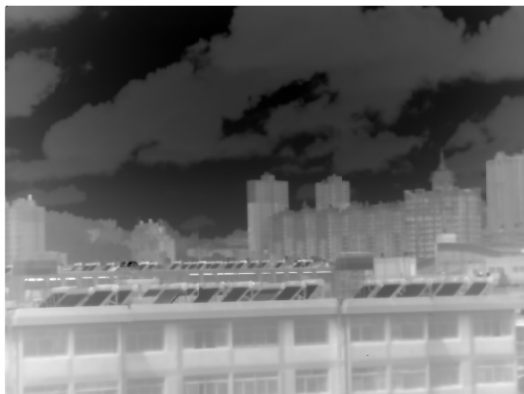
过引导滤波分层的图像,背景层经过直方图动态压缩,细节层由于数值较小,不需要压缩可以直接显示出来。

运用粗糙集理论将细节层进一步细分为 3 个子图,进行多维度的分层,如图 5 所示,分别对 3 个子图进行噪声抑制与细节增强处理,处理后将子图合并,得到处理后的细节层。

将处理后的细节层与背景层合并,最终的到处理后的输出红外图像,如图 6 所示。将未经处理的细节层与经过动态压缩的背景层合并,得到经过压缩与引导滤波分层但是未经降噪处理的 8 bits 原始图像,作为降噪处理前后对比的输入图像。

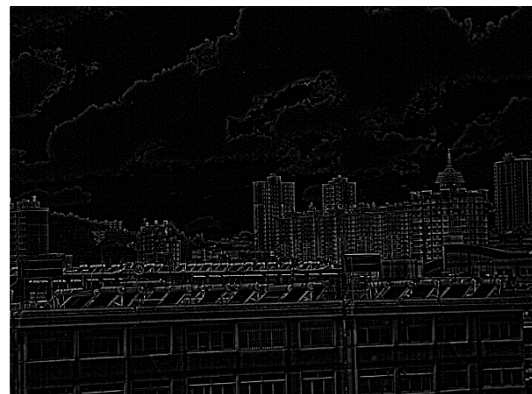
为了更好地验证粗糙集红外图像多维分层降噪算法的处理效果,选用较为干净的 8 bits 红外图像,对其添加条纹噪声,通过对比其他算法效果侧面体现出本文的降噪算法处理效果。

如图 6 所示,从不同算法对比图看,经过引导滤波自适应增益系数中值滤波分层处理得到的细节层含有较多的条纹噪声,对于条纹噪声的抑制效果并不明显,物体边缘以及弱小目标的细节部分有一定的增强效果,整体处理后的图像有一定程度的损失。经过双边滤波自适应增益系数中值滤波处理后的细节层对于条纹噪声有着一定的降噪效果,细节部分得到了一定的增强,但是算法复杂度高,缺乏实时性,难以实现工程化。加权最小二乘滤波自适应增益系数中值滤波对条纹噪声有一定的抑制效果,但是对于细节增强效果并不算理想,且算法复杂度相对引导滤波较高。本文算法在保证降噪效果的同时对图像中的细节信息与图像边缘信息有较好的增强效果,对复杂背景下的细节信息以及边缘保留较好,空旷背景下噪声抑制效果较好,且实时性好,满足工程化应用的需求。



(a) 直方图动态压缩背景图

(a) Histogram dynamic compression of background image



(b) 细节层

(b) Detail layer

图 4 引导滤波分层红外图像

Fig.4 Guided filtering layered infrared image

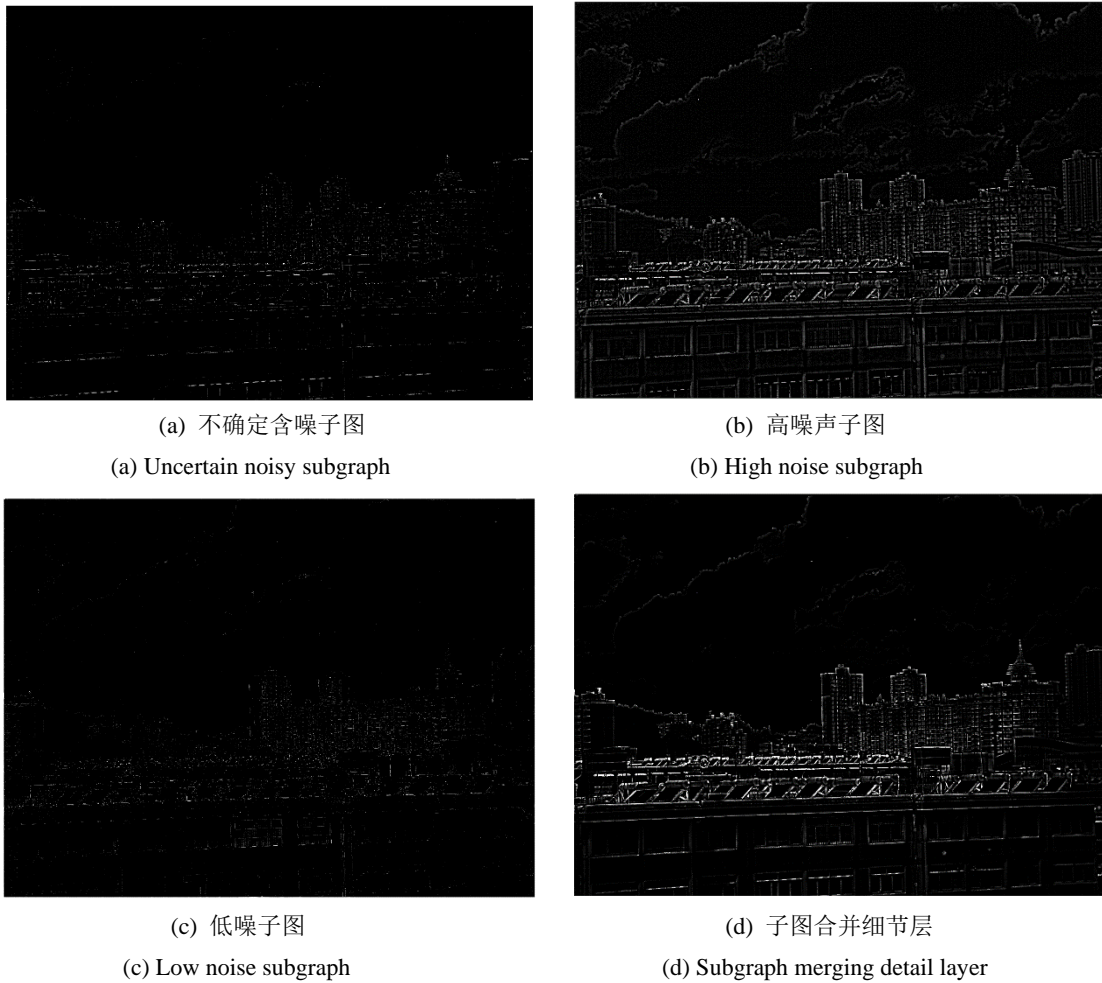


图5 粗糙集多维分层处理细节层红外图像

Fig.5 Multi dimensional hierarchical processing of detail layer infrared image based on rough set

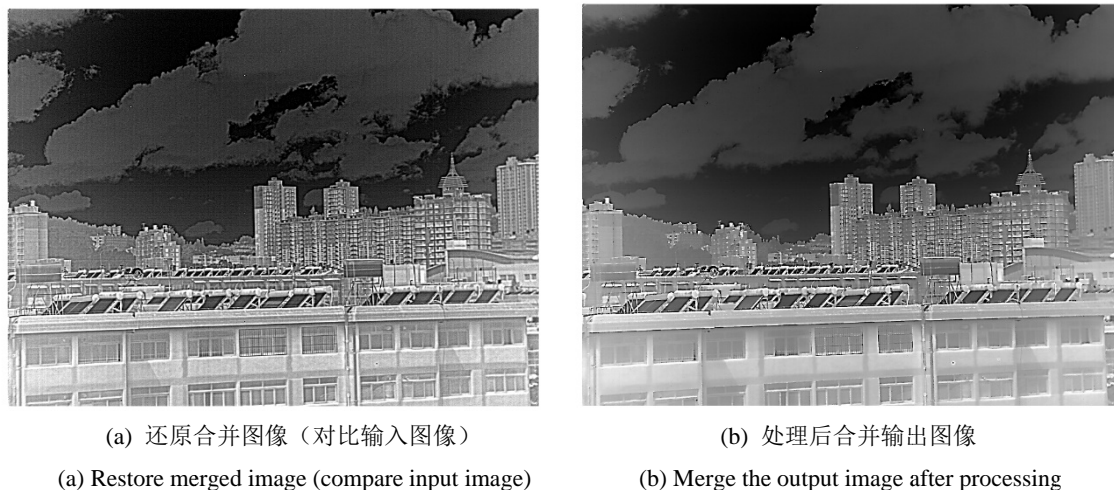


图6 本文算法与对比红外图像

Fig.6 This algorithm is compared with infrared image

另外采用峰值信噪比、信息熵两种客观评价指标对不同算法进行了客观评价,如表1所示。从结果可得,本文算法的峰值信噪比高于其他算法处理图像,信息熵值高于对其他算法处理后的红外图像,峰值信

噪比越高说明噪声抑制的效果越好,信息熵值越大表明图像信息量越多,从客观评价指标说明了本文算法对红外图像的噪声具有较好的抑制效果,并且对细节部分有一定幅度的增强效果。



(a) 输入图像
(a) Input image



(b) 添加条纹噪声图像
(b) Add fringe noise image



(c) 引导滤波自适应增益系数中值滤波图像
(c) Guided filter adaptive gain coefficient median filter image



(d) 双边滤波自适应增益系数中值滤波图像
(d) Bilateral filtering adaptive gain coefficient median filtering image



(e) 加权最小二乘自适应增益系数中值滤波图像
(e) Weighted least squares adaptive gain coefficient median filter image



(f) 本文算法
(f) The algorithm in this paper

图7 不同算法效果条纹噪声抑制对比

Fig.7 Comparison of different algorithms for fringe noise suppression

另外, 本文还对不同算法的运行时间, 分别通过 Matlab 进行对比仿真, 仿真平台: Lenovo 系列笔记本电脑, CPU: AMD Ryzen7 4800H @2.9GHz16GB 内存, 计算环境: Matlab\R2018b。结果如表 2 所示。通过分析表 2 的数据, 引导滤波的时间复杂度为 $O(N)$, N 为图像像素总数, 与滤波半径无关, 复杂度较低。双边滤波的时间复杂度为 $O(\sigma^2)$, 其中 σ 为高斯核函数的标准差, 时间复杂度较高。加权最小二乘的时间复杂度为 $O(mN)$, 其中 N 为图像像素总数, m 为常数系数, 时间复杂度较高。本文改进算法的时间复

杂度为 $O(N)$, 即在传统引导滤波的基础上结合本文算法, 可以更高效地对图像进行处理, 具有时间复杂度上的优势。在图像分辨率越来越高, 图像像素越来越多的当下, 具有时间复杂度优势的算法更具有实际应用价值。

本文算法和上述改进的自适应双边滤波与自适应加权最小二乘滤波算法的运行时间相比, 算法运行时间低得多。略大于改进的自适应引导滤波运行时间, 红外图像的处理效果优于自适应引导滤波。综合来看, 本文提出的基于粗糙集的红外图像多维降噪算

法具有一定的实时处理应用价值。

表1 不同算法降噪效果客观评价指标

Table 1 Objective evaluation index of noise reduction effect of different algorithms

Algorithm	Peak Signal To Noise Ratio(PSNR)	Entropy
Guided filtering	54.5211	6.1239
Bilateral filtering	55.3598	6.1274
Least square filtering	57.7474	6.3115
The algorithm in this paper	58.7371	6.4126

表2 不同算法运行时间对比

Table 2 Running time comparison of different algorithms

Algorithm	Time complexity	Running time/s
Guided filtering	$O(N)$	2.744
Bilateral filtering	$O(\sigma^2)$	5.273
Least square filtering	$O(mN)$	4.397
The algorithm in this paper	$O(N)$	3.174

3 结论

针对高位深度的红外图像噪声抑制以及兼顾细节增强问题, 本文结合引导滤波和粗糙集理论, 提出了一种基于粗糙集的红外图像多维分层的降噪算法。通过对几个不同场景下红外图像降噪算法处理效果的对比仿真, 从降噪图像的主观感受与客观评价指标来看, 可以发现本文算法能够很好地抑制横竖条纹噪声, 具有较好的保边性与降噪效果, 同时对于红外图像中细节信息的增强, 具有较好的效果, 算法复杂度低, 实时性高, 具有一定的实际应用价值, 在细节层细节保留方面以及背景层动态压缩方面还有研究改进的空间, 还需要深入地研究与改进。

参考文献:

[1] 王洋, 潘志斌. 红外图像降噪与增强技术综述[J]. 无线电工程, 2016, 46(10): 1-7, 28.
WANG Yang, PAN Zhibin. Review of De-noise and Enhancement Technology for Infrared Image[J]. *Radio Engineering*, 2016, 46(10): 1-7, 28.

[2] ZHANG Qiang, PAN Weijun, ZHU Xiping, et al. Enhancement Method for Infrared Dim-Small Target Images Based on Rough Set[C]//2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). IEEE Computer Society, 2017: 301-306

[3] 惠建江, 刘朝晖, 刘文. 红外图像的噪声分析和弱小目标的增强[J]. 红外技术, 2005, 27(2): 135-138.
HUI Jianjiang, LIU Chaohui, LIU Wen. Noise analysis of infrared image and Muti-dim-small Targets Enhancement. [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(2): 135-138.

[4] Phophalia A, Mitra S K, Rajwade A K. Medical image denoising from similar patches derived by Rough Set[C]//*Image Information Processing (ICIIP)*, 2013: 586-591

[5] 葛朋, 杨波, 韩庆林, 等. 一种基于引导滤波图像分层的红外图像细节增强算法[J]. 红外技术, 2018, 40(12): 1161-1169.
GE Peng, YANG Bo, HAN Qinglin, et al. Infrared Image Detail Enhancement Algorithm Based on Hierarchical Processing by Guided Image Filter[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(12): 1161-1169.

[6] Pawlak Z. Rough sets[J]. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 1982, 11(5): 341-356.

[7] 常蓬勃. 粗糙集方法在红外图像增强中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
CHANG Pengbo. The Application of Rough Set Method in Infrared Image Enhancement[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[8] 张瑞兰. 基于粗糙集理论的水下红外图像增强[J]. 海洋技术, 2010, 29(2): 63-65.
ZHANG Ruilan. Underwater Infrared Image Enhancement Based on Rough Sets[J]. *Ocean Technology*, 2010, 29(2): 63-65.

[9] 焦圣喜, 魏宏建. 一种基于粗集与小波的声纳图像降噪方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(24): 7082-7086.
JIAO Shengxi, WEI Hongjian. A Denoising Algorithm for Sonar Images Based on Rough Set and Wavelet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(24): 7082-7086.

[10] 李杨, 闫岩. 结合直方图均衡和模糊集理论的红外图像增强研究[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(2): 428-430, 450.
LI Yang, YAN Lei. Study of Infrared Image Enhancement Based on Histogram Equalization and Fuzzy Set Theory[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2019, 47(2): 428-430, 450.

[11] 刘杰, 张建勋, 代煜. 基于多引导滤波的图像增强算法[J]. 物理学报, 2018, 67(23): 293-302.
LIU Jie, ZHANG Jianxun, Dai Yu. Image enhancement based on multi-guided filtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(23): 293-302.

[12] 樊启明. 基于滤波分层的红外图像细节增强算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
FAN Qiming. Research on infrared image detail enhancement algorithm based on image layering by filter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[13] 邢占峰, 吕扬生, 张力新, 等. 粗糙集理论在超声心动图噪声抑制中的应用[J]. 医疗设备信息, 2003(4): 4-7.
XING Zhanfeng, LV Yangsheng, ZHANG Lixin, et al. Application of rough sets on echocardiographic images denoising[J]. *Information of Medical Equipment*, 2003(4): 4-7.

[14] 周永康, 朱尤攀, 曾邦泽, 等. 宽动态红外图像增强算法综述[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 718-726.
ZHOU Yongkang, ZHU Youpan, ZENG Bangze, et al. A Review for High Dynamic Range Infrared Image Enhancement Algorithms[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(5): 718-726.