

doi: 10.7690/bgzdh.2022.01.014

基于改进滤波器和图像加权局部熵的红外小目标图像处理

刘镇毓, 宋贵宝, 刘 铁, 强裕功

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对传统背景抑制方法虚警率高、检测率低的问题, 提出一种基于改进滤波器和图像加权局部熵的红外小目标图像处理方法。通过改进中值滤波对原始红外图像进行预处理, 分别构建多尺度灰度差异算子、局部图像熵算子, 并将二者进行点积运算得到加权局部熵, 从而能够有效地抑制背景并消除噪声。实验结果表明: 该方法适应性较好, 运算效率相对传统中值滤波算法提升了 20.6%, 有一定的理论与工程应用价值。

关键词: 红外图像; 中值滤波; 多尺度灰度差; 局部熵

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Infrared Small Target Image Processing Based on Improved Filter and Image Weighted Local Entropy

Liu Zhenyu, Song Guibao, Liu Tie, Qiang Yugong

(College of Coast Defense, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the problems of high false alarm rate and low detection rate of traditional background suppression methods, an infrared small target image processing method based on improved filter and image weighted local entropy is proposed. The original infrared image is preprocessed by the improved median filter. The multi-scale gray difference operator and the local image entropy operator are constructed respectively, and the weighted local entropy is obtained by the dot product of the 2 operators, which can effectively suppress the background and eliminate the noise. The experimental results show that the method has good adaptability, and the operation efficiency is improved by 20.6% compared with the traditional median filtering algorithm, which has certain theoretical and engineering application value.

Keywords: infrared image; median filtering; multi-scale gray difference; local entropy

0 引言

相对于其他成像方式, 红外成像有着全天候工作、被动工作、目标识别能力强、抗干扰能力强等优点。随着红外成像技术以及信号处理理论不断发展, 红外技术在现代高科技局部战争中起到了越来越重要的作用^[1]。在实际战场环境中, 对信息处理的实时性要求很高, 从发现、跟踪目标, 直至对目标进行毁伤评估, 每一过程所消耗的时间非常短, 有时甚至是用秒来度量, 体现了对目标红外图像及时获取和处理的重要性。

目前, 红外图像背景抑制的方法主要可以概括为 2 类: 基于滤波器的背景抑制法^[2]和基于背景分类的背景抑制法^[3]。基于滤波器的背景抑制法处理的图像往往背景相对平缓, 目标的局部辐射相对背景辐射而言较高, 灰度变化明显。典型的处理算法有中值滤波法^[4]、Top-hat 变换法^[5]、高斯高通滤波法^[6]等。此类方法的优点是算法运行效率较高, 简单直观且便于硬件的实现, 缺点是面对背景出现剧

烈变化的情况容易出现虚警。基于背景分类的背景抑制法往往通过对图像的变化信息对背景进行估计分类, 以达到背景抑制的效果。典型的处理算法有光流估计法^[7]、背景复杂度分类法^[8]、颜色分布模型法^[9]等。此类方法的优点是能够解决图像中背景存在较强干扰的问题, 缺点是会减弱目标能量, 且计算较复杂, 运行速度慢, 无法满足实时性要求, 在工程上运用较少。

笔者结合以上处理方法的优缺点, 提出一种基于改进滤波器和加权局部熵的红外图像处理方法。通过改进中值滤波算法, 从而抑制变化较缓慢的背景低频成分, 并在此基础上将多尺度灰度差异作为局部图像熵的权重, 得到加权局部图像熵。所得到的加权局部熵有着较高的信噪比增益, 能够有效抑制背景和噪声。

1 红外小目标图像

小目标图像是指目标在图中所占的比例较小, 根据国际光学工程学会的定义, 小目标的成像尺寸

收稿日期: 2021-10-07; 修回日期: 2021-11-28

作者简介: 刘镇毓(1995—), 男, 江苏人, 硕士, 从事飞行器系统工程研究。E-mail: 495291285@qq.com。

通常小于 80 像素，即所占大小小于一张 256×256 图像的 0.12%^[10]。一般情况下，红外小目标图像都是由目标、背景和噪声组成，常用式(1)所示的数学模型来表达^[11]。

$$I(x, y) = I_{\text{target}}(x, y) + I_{\text{back}}(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

式中： (x, y) 为图像中某像素点的坐标； $I_{\text{target}}(x, y)$ ， $I_{\text{back}}(x, y)$ ， $n(x, y)$ 分别为目标、背景和噪声的灰度值。

红外小目标图像的背景 $I_{\text{back}}(x, y)$ 通常为天空、海面等，背景所在区域相关性较好，变化较平缓，在图像中属于低频信号，但也时常出现云层、海浪等高频信号。红外图像的噪声 $n(x, y)$ 往往是由红外传感器的抖动以及恶劣天气造成的，在图像中属于高频信号，与目标的频率接近，易造成虚警^[12]；因此，对图像进行预处理操作，抑制背景和噪声，改善图像的视觉效果，是后续对目标进行检测和评估研究的基础。

信噪比常常被用来评价目标在红外图像中的显著程度，信噪比越大，则目标在图像中越显著，与

背景区分度越高。信噪比的定义如式(2)所示^[13]。

$$S_{\text{SNR}} = (I_{\text{max}} - I_{\text{mean}}) / \sigma \quad (2)$$

式中： I_{max} 为图像中的最大灰度值； I_{mean} 为图像中的灰度均值； σ 为图像的灰度均方差。

2 红外小目标图像处理方法

红外图像只有成像大小和灰度的信息特征，笔者首先运用改进中值滤波算法进行噪声滤除，对目标红外图像进行预处理，改进后的滤波方法能够降低算法对灰度信息进行处理的时间，提高算法的实时性；此后分别构建多尺度灰度差异图、局部图像熵图，达到去除大量噪声的效果；最后通过二者的点积运算得到加权局部图像熵图，有着较高的信噪比增益，能够较好地达到抑制目标图像背景，增强目标的效果。该方法不依赖参数选择和图像模型，明显优于目前现有的一些红外图像处理方法；因此，笔者重点研究中值滤波以及局部熵算法的改进。其流程如图 1 所示。

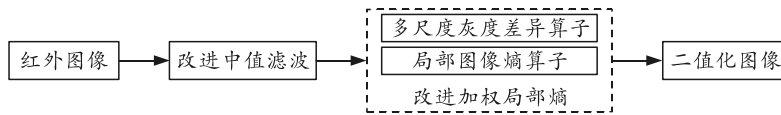


图 1 基于改进滤波器和加权局部熵的图像处理流程

2.1 改进中值滤波算法研究

针对空中小目标红外图像分辨率低、质量差、噪声多且目标与背景灰度差异不大的特点，通常采用的预处理方法是中值滤波和均值滤波^[14]。常规的中值滤波方法是对窗口内的所有像素灰度值进行排序并求取中值，算法的运算量会随着窗口的增大而增加。均值滤波方法只要求取像素点邻域灰度值的平均值，尽管滤波效果有时一般，但运算速度较快。

为了能同时兼顾有效去除噪声、抑制背景且保证算法具备实时性，笔者结合中值滤波和均值滤波

的优点，设计了改进中值滤波算法。该算法采用 5×5 的滤波器进行平均中值滤波，滤波器的模板如图 2 所示，算法如式(3)、(4)所示。

$f(x-2, y+2)$	$f(x-1, y+2)$	$f(x, y+2)$	$f(x+1, y+2)$	$f(x+2, y+2)$
$f(x-2, y+1)$	$f(x-1, y+1)$	$f(x, y+1)$	$f(x+1, y+1)$	$f(x+2, y+1)$
$f(x-2, y)$	$f(x-1, y)$	$f(x, y)$	$f(x+1, y)$	$f(x+2, y)$
$f(x-2, y-1)$	$f(x-1, y-1)$	$f(x, y-1)$	$f(x+1, y-1)$	$f(x+2, y-1)$
$f(x-2, y-2)$	$f(x-1, y-2)$	$f(x, y-2)$	$f(x+1, y-2)$	$f(x+2, y-2)$

图 2 改进中值滤波模板

$$\left. \begin{aligned} m_1(x, y) &= \text{med}_{(x,y) \in p(x,y)} [f(x-2, y), f(x-1, y), f(x, y), f(x+1, y), f(x+2, y)] \\ m_2(x, y) &= \text{med}_{(x,y) \in p(x,y)} [f(x, y+2), f(x, y+1), f(x, y), f(x, y-1), f(x, y-2)] \\ m_3(x, y) &= \text{med}_{(x,y) \in p(x,y)} [f(x-2, y+2), f(x-1, y+1), f(x, y), f(x+1, y-1), f(x+2, y-2)] \\ m_4(x, y) &= \text{med}_{(x,y) \in p(x,y)} [f(x-2, y+2), f(x+1, y+1), f(x, y), f(x-1, y-1), f(x-2, y-2)] \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

$$f_{\text{avg}}(x, y) = \frac{1}{4} [m_1(x, y) + m_2(x, y) + m_3(x, y) + m_4(x, y)] \quad (4)$$

式中： $f(x, y)$ 为目标红外图像； $f_{\text{avg}}(x, y)$ 为经过改进中值滤波方法处理后的图像； $p(x, y)$ 为改进中值滤波的模板区域； med 为取集合的中值。

改进方法进行预处理后的图像能够保证在噪声

衰减的同时不模糊目标信号的边缘信息，平滑处理效果较好。在算法执行效率上，相对常规的中值滤波方法对滤波窗口内每个像素值都进行排序求取中值。该方法能够减少排序求取中值的次数，保证了算法的实时性，在一定程度上兼顾了处理效果与效率。

2.2 加权局部熵处理方法研究

近年来，部分学者相继提出了图像局部处理的一些方法，充分利用像素点的领域信息，构建局部灰度调整方法，典型的方法有自适应对比度增强算法^[15]、自适应直方图均衡算法^[16]等，这类算法能够充分利用像素点周围的灰度分布特性，取得了较好的处理效果，也使利用领域信息处理红外图像成为研究重点。

由于空中小目标在红外图像中的尺寸较小，目标的像素点对图像整体的纹理变化贡献较少，但是目标在出现时会导致局部图像纹理发生较大改变；因此，在改进中值滤波算法的基础上，提出基于改进局部熵的图像处理方法。该方法通过构建多尺度差异算子和局部熵算子，将二者进行点积运算得到加权局部熵图，以达到抑制背景、增强目标的效果。

2.2.1 多尺度灰度差异算子

在目标红外图像中，假设某一像素点处的灰度值为 $I(x_0, y_0)$ ，该像素点的最大领域空间 Ω_{\max} 的大小为 $L_{\max} \times L_{\max}$ ，其中 L_{\max} 为大于 1 的奇数。在该像素点最大领域空间内的所有领域空间 Ω_k 的大小为 $(2k+1) \times (2k+1)$ ， $K = \{k | (2k+1) \leq L_{\max}\}$ 且 $k \in K$ ，则该像素点处的多尺度灰度差异算子 $D(x_0, y_0)$ 为：

$$D(x_0, y_0) = \max_{\Omega_k} \left\{ |D| = (M_1 - M_2)^2 \right\}。 \quad (5)$$

$$M_1 = (1/N_{\Omega_k}) \cdot \sum_{(x,y) \in \Omega_k} I(x, y),$$

$$M_2 = (1/N_{\Omega_{\max}}) \cdot \sum_{(x,y) \in \Omega_{\max}} I(x, y)。 \quad (6)$$

式中： $N_{\Omega_{\max}}$ 为最大领域空间 Ω_{\max} 内像素点的个数； N_{Ω_k} 为领域 Ω_k 内像素点的个数。

该算子模板在目标红外图像上从上至下、从左至右不断移动，以此获得多尺度灰度差异图 D 。

2.2.2 局部熵算子

在目标红外图像中，假设某一像素点处的灰度值为 $I(x_0, y_0)$ ，该像素点的领域空间大小为 $m \times n$ ，则该像素点的局部熵算子 $E(x_0, y_0)$ 可表示为：

$$E(x_0, y_0) = \sum_{i=x_0-(m-1)/2}^{x_0+(m-1)/2} \sum_{j=y_0-(n-1)/2}^{y_0+(n-1)/2} p(I(i, j)) \cdot \log_2(p(I(i, j)) + \varepsilon),$$

$$p(I(i, j)) = \frac{I(i, j)}{\sum_{i=x_0-(m-1)/2}^{x_0+(m-1)/2} \sum_{j=y_0-(n-1)/2}^{y_0+(n-1)/2} I(i, j)}。 \quad (7)$$

式中 ε 为一个很小的正常数，常设 $\varepsilon=10^{-6}$ 。

该算子模板在目标红外图像上从上至下、从左至右不断移动，以此获得局部熵图 E 。

2.2.3 加权局部熵

将多尺度灰度差异算子 $D(x_0, y_0)$ 作为权重，与局部熵算子 $E(x_0, y_0)$ 进行点积运算，得到加权局部熵 $H(x_0, y_0)$ 式为：

$$H(x_0, y_0) = D(x_0, y_0) \cdot E(x_0, y_0) = -D(x_0, y_0) \cdot \sum_{i=x_0-(m-1)/2}^{x_0+(m-1)/2} \sum_{j=y_0-(n-1)/2}^{y_0+(n-1)/2} p(I(i, j)) \log_2(p(I(i, j)) + \varepsilon)。 \quad (8)$$

当目标出现时会破坏红外图像的纹理特征，而小目标对于整幅红外图像的熵值贡献也相对较小，会存在较多的背景纹理残余。运用加权局部熵方法，小目标在局部窗口内会导致局部纹理及局部熵算子的较大变化，加权局部熵方法能够体现局部窗口的纹理变化情况，在复杂背景下也能较好地检测出小目标。

2.2.4 自适应阈值

用上文所采用方法处理图像得到的 $H(x_0, y_0)$ 求解自适应阈值，并通过阈值来对图像进行二值化处理，以检测出目标。自适应阈值的确定方法如下：

$$S_{\text{SNR}} = (H_{\max} - m) / \sigma, \quad T = c S_{\text{SNR}} \sigma + mm。 \quad (9)$$

式中： σ 为加权局部熵图 H 的标准差； m 为 H 的均值； H_{\max} 为 H 的最大值； c 为正常数。





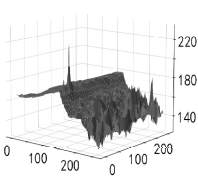
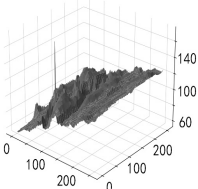
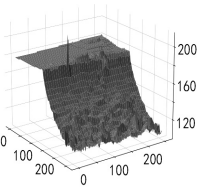
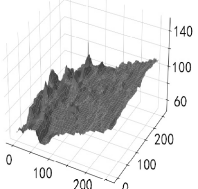
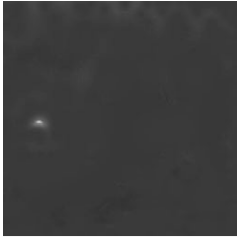
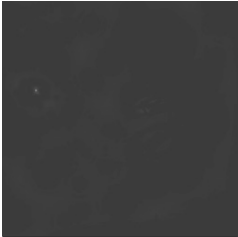

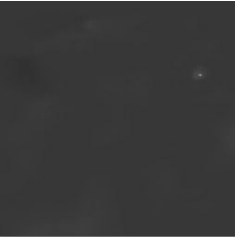
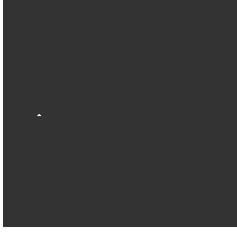
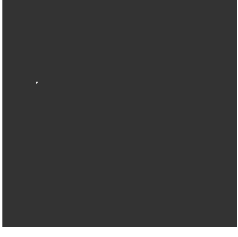
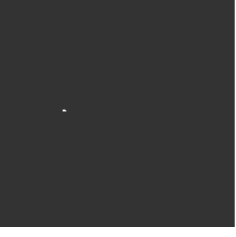
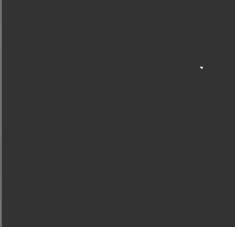
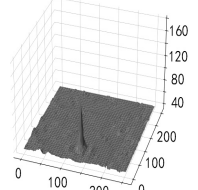
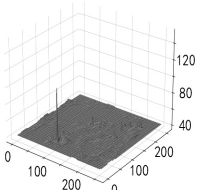
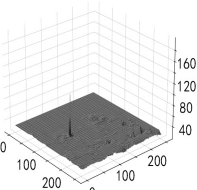
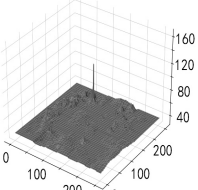
3 实验结果分析

通过实验来验证基于改进滤波器和图像加权局部熵方法的正确性和有效性。实验的环境是 Intel(R) Core (TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz Processor, 512G HD, 4.00GB RAM, 仿真软件为 Python 3.9。实验数据用 TC388 红外摄像头进行采集，图像的存储格式为 png。

为验证笔者设计方法的普遍性，选用不同场景下的小目标红外图像进行处理，每个序列有 50 帧图像，主要为海空背景和天空背景，图像的大小均为 256×256 。实验效果如表 1 所示，场景 1 是海空背景下的图像序列，目标的位置不随帧数变化而变化，图中海空交界附近杂波不多，海面杂波较多；场景 2 是以天空为背景的小目标图像序列，目标的位置不随帧数变化而改变，该图像序列中噪声干扰较强，有许多虚假目标，容易造成误判；场景 3 是海空背景下的图像序列，目标的位置随帧数变化而变化，

海空线交界附近杂波较多，海面杂波较少；场景 4 是以天空为背景的图像序列，目标的位置随帧数变化而变化，该图像序列中目标周围云层干扰较多，目标清晰度不高。

表 1 笔者设计方法在不同场景下的处理结果

实验内容	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
原始图像				
灰度分布原始图				
本文中处理结果				
二值化结果				
灰度分布结果图				

为了验证笔者设计方法的适应性，将该方法与最大中值滤波算法、基于背景分类的背景抑制方法进行比较。具体操作：针对同一组图像序列中的同一帧进行方法处理，处理后的结果以及处理后的二值图像、3 维灰度分布图如表 1 所示。通过对表 1 的分析不难看出，中值滤波的方法容易受到剧烈背景的影响，适应性不高。笔者设计的方法和基于背景分类的方法有着较好的抗强背景能力，能够有效地消除图中大部分背景，处理结果明显优于中值滤波方法。

笔者采用均方误差 (mean square error, MSE)、

背景抑制因子 (background suppression factor, BSF) 2 个定量指标来比较 3 种方法在背景抑制方面的性能，比较结果如表 2 所示。从表中可以发现：笔者设计的方法能够明显降低原始图像的 MSE 和 BSF，即噪声被抑制的程度更深，说明了该方法较其他 2 种方法有着明显优势。

为验证笔者设计方法的实时性，将 30 帧红外图像处理时间的平均值作为近似看作每一帧的处理时间，对 3 种方法的处理时间进行比较。选择 3 段红外视频进行实验，实验结果如表 3 所示，验证了该方法的实时性有着明显优势。

表 2 不同方法的性能比较

组号	原始图像 (SNR)	最大中值滤波		背景分类法		本文中方法	
		MSE	BSF	MSE	BSF	MSE	BSF
1	0.081 5	18.84	6.63	11.16	7.69	9.73	3.88
2	1.148 2	19.22	7.15	13.53	7.95	9.65	4.76
3	2.684 7	15.19	7.26	12.18	9.23	9.52	4.41
4	3.636 5	15.22	6.68	11.21	7.26	9.62	5.39

表 3 不同方法处理时间比较

组号	最大中值滤波法	背景分类法	本文中算法
1	10.9	20.09	9.12
2	11.2	20.03	9.19
3	11.1	20.06	9.32

结合以上实验结果可以发现：最大中值滤波法的虚警现象比较严重，对细节的处理有待提高；背景分类法能够滤除噪声，对目标的保留效果也不错，但是该方法实时性不够，运行时间较长，如应用于工程还需改进；笔者设计的方法一方面能够有效滤除噪声，保护目标信息，另一方面运算时间相对较短，较最大中值滤波提升了 20.6%，较背景分类法提升了 117.8%。综上所述，该方法的处理效果更好。

4 结论

针对传统红外图像处理方法的不足，笔者设计了基于改进滤波器和加权局部熵的红外图像处理方法。通过改进中值滤波，加快了方法的处理速度，并由多尺度灰度差异算子和局部图像熵算子的点积运算得到加权局部熵，从而抑制背景和噪声。实验结果表明：该方法有着较高的普遍性和适应性，鲁棒性较好，执行效率较高，能够实时处理问题，为在工程上的应用打下了基础。

参考文献：

[1] LI H, WANG Q, WANG H, et al. Infrared small target detection using tensor based least mean square[J]. Computers and Electrical Engineering, 2021, 91: 106994.
 [2] 孟炜皓, 张浩楠, 崔新. 自适应滤波器在数字图像处理中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2015(20): 97.
 [3] 花思齐, 赵伟, 刘建业. 基于改进滤波器和图像多尺度变换的背景抑制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(8): 1679-1684.

[4] 王正家, 吕召锐, 刘文超, 等. 基于 FPGA 的时序优化中值滤波算法研究[J]. 电子器件, 2020, 43(6): 1374-1378.
 [5] 王保曾, 万晓冬, 付琳. 天空背景下红外目标的检测[J]. 电光与控制, 2015, 22(6): 44-46.
 [6] 范灵. 基于混合滤波算法的数字图像去噪方法研究[J]. 信息技术, 2019, 43(8): 79-82, 87.
 [7] 祖曰然, 包秀国, 唐文忠, 等. 深度光流估计方法研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(2): 310-320.
 [8] 程俊华, 曾国辉, 刘瑾. 基于深度学习的复杂背景图像分类方法研究[J]. 电子科技, 2020, 33(12): 59-66.
 [9] 陈昭炯, 叶东毅, 林德威. 基于背景抑制颜色分布新模型的合成式目标跟踪算法[J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 630-640.
 [10] XU Y L, WANG W H. A method for single frame detection of infrared dim small target in complex background[J]. Journal of physics: Conference series, 2020, 1634(1): 012063.
 [11] 丁畅, 董丽丽, 许文海. 海面目标的红外景象增强技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 122-130.
 [12] LI X, XU G L, WU Q. An Infrared small target detection method based on local contrast measure and gradient property[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1748(4): 042052.
 [13] 王加, 周永康, 胡健钊, 等. 一种基于粗糙集的红外图像多维降噪算法[J]. 红外技术, 2021, 43(1): 44-50.
 [14] 王笛, 沈涛. 复杂天空背景下的红外弱小目标检测算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 103-110.
 [15] LUQUE-CHANG A, CUEVAS E, PÉREZ-CISNEROS M, et al. Moth Swarm Algorithm for Image Contrast Enhancement[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 212: 106607.
 [16] WANG J J, LI Y, CAO L H, et al. Range-restricted pixel difference global histogram equalization for infrared image contrast enhancement[J]. Optical Review, 2021, 28: 145-158.