

层次卷积滤波红外弱小目标检测方法

陈灿灿 夏润秋 刘洋 刘力双 陈青山

Hierarchical convolution filtering method for infrared dim small target detection

CHEN Cancan, XIA Runqiu, LIU Yang, LIU Lishuang, CHEN Qingshan

引用本文:

陈灿灿, 夏润秋, 刘洋, 等. 层次卷积滤波红外弱小目标检测方法[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 826–833. DOI: 10.5768/JAO202344.0403003

CHEN Cancan, XIA Runqiu, LIU Yang, et al. Hierarchical convolution filtering method for infrared dim small target detection[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 826–833. DOI: 10.5768/JAO202344.0403003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂背景下红外图像弱小目标检测

Dim-small targets detection of infrared images in complex backgrounds

应用光学. 2021, 42(4): 643–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0402002>

基于FPGA的自适应阈值运动目标检测

Moving object detection with adaptive threshold based on FPGA

应用光学. 2017, 38(6): 903–909 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0602001>

多维特征点空间的红外弱小目标检测方法

Multi-dimensional feature point space infrared dim target detection method

应用光学. 2020, 41(6): 1268–1276 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0606002>

复杂红外背景中运动小目标快速跟踪技术

Fast tracking technology of moving dim and small targets under complex infrared background

应用光学. 2021, 42(3): 443–453 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302001>

基于加权LoG算子的红外弱小目标检测方法研究

Infrared small target detection using weighting LoG operator

应用光学. 2017, 38(1): 114–119 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0106003>

一种基于形状的红外图像泄漏气体检测方法

Shape-based infrared image leakage gas detection method

应用光学. 2019, 40(3): 468–472 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0826-08

层次卷积滤波红外弱小目标检测方法

陈灿灿, 夏润秋, 刘 洋, 刘力双, 陈青山

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100092)

摘 要: 针对单帧复杂背景红外图像点目标检测算法存在复杂背景下处理效果不理想、处理时间长的问題, 提出了一种层次卷积滤波检测算法。主要分为两个部分: 第一, 根据红外小目标特性, 设计一种层次卷积滤波的算子, 对图像进行滤波处理, 实现图像中小目标的增效和背景抑制的效果; 第二, 采用基于最大值的自适应阈值方法, 对图像进行二值化操作, 过滤背景杂波, 最终提取到待检测的目标。在大量不同背景红外图像中进行实验, 论文算法在背景抑制因子和信噪比增益的性能量化结果上优于现有 5 种典型红外弱小目标检测算法的性能结果, 且平均处理时间仅为高斯拉普拉斯 (Laplacian of Gaussian, LoG) 滤波算法的 30.42%。通过实验对比, 表明该层次卷积滤波算法可以有效解决在不同复杂背景下的红外图像中对小目标检测的问题。

关键词: 复杂背景; 红外图像; 红外弱小目标检测; 卷积滤波; 自适应阈值

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0403003

Hierarchical convolution filtering method for infrared dim small target detection

CHEN Cancan, XIA Runqiu, LIU Yang, LIU Lishuang, CHEN Qingshan

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100089, China)

Abstract: Aiming at the problems of unsatisfactory processing effect and long processing time in point target detection algorithm of single-frame infrared image with complex background, a hierarchical convolution filtering detection algorithm was proposed. It was mainly divided into two parts: firstly, according to the characteristics of small infrared targets, a hierarchical convolution filtering operator was designed to filter the image, so as to achieve the effect of efficiency increase and background suppression of small targets in the image. Secondly, the adaptive threshold method based on the maximum value was used to binarize the image to filter the background clutter, and finally extracted the target to be detected. Experiments in a large number of infrared images with different backgrounds show that the performance quantization results of background suppression factor and signal-to-noise ratio gain of the algorithm are better than that of the existing five typical infrared dim and small target detection algorithms, and the average processing time is only 30.42% of Laplacian of Gaussian (LoG) filtering algorithm. Through the experimental comparison, the hierarchical convolution filtering method can effectively solve the problem of small target detection in infrared images under different complex backgrounds.

Key words: complex background; infrared image; infrared dim small target detection; convolution filtering; adaptive threshold

引言

红外探测技术就是以红外目标监测系统为载

体, 利用被检测目标与背景之间红外辐射的差异实现目标检测和识别^[1]。由于红外成像系统可以

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-09-09

基金项目: 国防军工重点计量科研项目 (J*****1)

作者简介: 陈灿灿 (1995—), 女, 硕士, 主要从事红外图像小目标检测算法研究。E-mail: chenc2580@163.com

全天候提供清晰图像,且能够穿透雾、烟和其他大气条件等障碍物,在早期预警、精确制导以及海事监控等领域有着广泛的应用^[2]。根据国际光学工程学会的定义,把面积不大于 9×9 像素大小的红外目标称为红外小目标^[3-4]。在单帧红外图像中小目标缺乏纹理细节等关键信息,而且受背景杂波的影响,信噪比低,复杂多变的背景更是加大了检测难度^[5]。因此,对复杂背景下的红外小目标检测一直是一个具有极大挑战性的研究课题^[6]。

基于单帧图像的红外弱小目标检测算法是近年来主要研究方向之一,该类型算法只需要使用一张红外图像,且不需要任何先验知识,就能提取出目标。当前主流算法包括:基于滤波、基于人类视觉系统、基于图像数据结构和基于深度学习的算法4大类^[7]。

基于滤波的算法是在卷积滤波过程中设计合适的滤波器模板来计算局部对比度信息^[8]。常见算法如高斯拉普拉斯(Laplacian of Gaussian, LoG)滤波器模版^[9]、新型TopHat滤波算法^[10]、基于三阶累积量的目标检测算法等^[11]。该类算法适用于背景变化平缓、杂波小、目标亮度突出的情况。然而,很多红外图像场景中的背景复杂多变,这种算法往往会导致误报。

基于人类视觉系统的方法通过目标与背景的局部差异构建可以突出目标的显著图,进而实现对目标的检测。常见算法有局部对比测量方法(local contrast measure, LCM)^[12]、多尺度斑块对比度测量(multiscale patch-based contrast measure, MPCM)方法^[13]、WLDM(weighted local difference measure)映射方法等^[14]。大多基于人类视觉系统的算法在图像对比度大时有较好的检测结果,但是算法的泛化能力较差,不能很好地适应复杂背景。

基于图像数据结构特征的检测算法,根据目标稀疏性和背景低秩特征将目标与背景分离。常见算法有红外图像块(infrared patch-image, IPI)算法^[15]、将IPI模型中全局恒定的权重用加权IPI模型块图像中的每一列自适应权重代替的方法^[16]、非凸秩逼近最小化与加权L1范数的红外弱小目标检测方法等^[17]。该类算法在图像稀疏分解、字典构造、字典学习等方面往往耗费大量时间,产生大量冗余字典信息,运算效率低下。

近年来,深度学习在计算机视觉^[18]、自然语言处理^[19]以及图学习^[20-21]领域得到了广泛的应用。

受到他们的启发,深度学习模型也被用于红外目标检测中。张汝榛等人在YOLOv3的基础上根据红外数据集的特点进行网络修改以提高红外目标检测的准确率^[22]。LIN L K等人设计了一个7层网络,通过学习采样生成的合成数据来检测小目标^[23]。蔡伟等人提出了YOLO-FCSP检测算法^[24]等。但是现有的基于深度学习方法的红外小目标检测模型大多采取特征提取和分类模型,并且公开数据集很少,导致其仅适用于特定场景下的小目标检测。

针对复杂背景下虚警率高、运算时间长和算法适用性较差的问题,论文提出了层次卷积滤波的检测方法以及基于最大值的自适应阈值的分割方法,提高红外图像中复杂背景下小目标检测的综合效果。

1 提出的算法

论文根据红外图像中的小目标强度分布特性,设计了一种层次卷积滤波器,用于解决红外图像中的小目标增强和复杂背景抑制,并提出一种基于最大值的自适应阈值方法对目标进行二值化提取,最终从原始图像中获取小目标。整体的算法流程如图1所示。

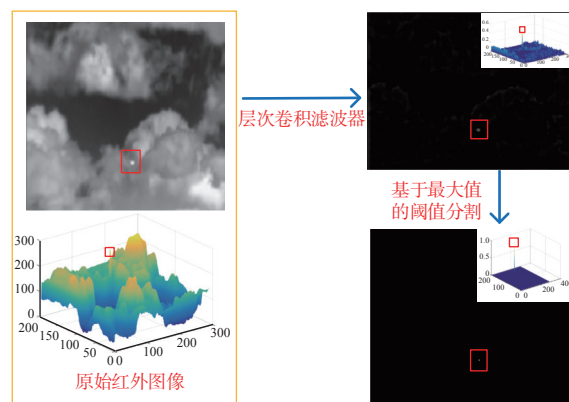


图1 整体算法流程

Fig. 1 Overall flow chart of algorithm

1.1 层次卷积滤波

红外图像中的小目标像素在邻近背景之间通常具有一定的孤立性,且其强度特点符合高斯分布^[25],其小目标强度分布特点如图2所示,其中矩形框内为小目标,从图像中可以看出目标的像素强度比较突出,高于周围背景像素强度。用传统的高通滤波器对该目标进行过滤时,可以使小目标和孤立的噪声点通过,而且需要找到合适的阈值参数对其过滤,而参数的确定较为繁琐,需要人

工参与手工调参。为了解决这一问题,论文设计了一款层次卷积的滤波器,该滤波器结合小目标与背景像素强度的强度分布特性,能够对具有高斯特性的小目标信息进行提取,同时有效抑制平缓的背景信息,最大的优点是该滤波算子无需调参,且运算时间快。

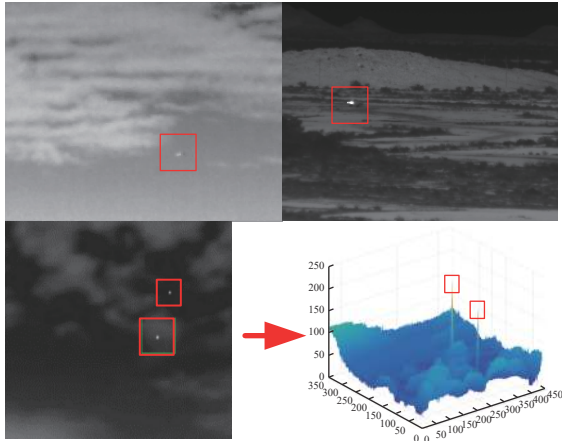


图 2 含有小目标的红外图像

Fig. 2 Infrared image with small targets

根据小目标分布特点,该滤波算子由 3 层圆形组成,如图 3 所示,最里层表示目标区域,用 L_i 表示,其半径为 R_i ;中间层表示从目标到背景的过渡区域,用 L_m 表示,半径为 R_m ;最外层表示目标周围的背景区域,用 L_o 表示,半径为 R_o 。

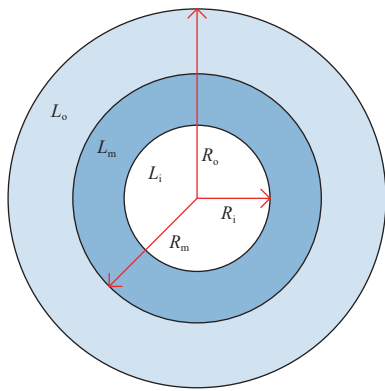


图 3 算子模型介绍

Fig. 3 Introduction of operator model

该滤波器的算子模型 E 表达式如公式(1)。 L_m 层中权重代表对目标元素的增强强度; L_o 层中权重系数设为-1,代表对背景的抑制程度。 L_m 层和 L_o 层权重系数之和为

$$E(i, j) = \begin{cases} e, & (i, j) \in L_i \\ 0, & (i, j) \in L_m \\ -1, & (i, j) \in L_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: e 中元素符合目标的高斯特性,中间数值最大,周围数值依次减小。 $E(i, j)$ 中的所有元素和为 0。

经过算子 E 滤波后的图像 H 表示如公式(2)。

$$H(x, y) = \sum_{i=-[R_o]}^{[R_o]} \sum_{j=-[R_o]}^{[R_o]} S * E(i, j) \cdot I(x+i, y+j), \quad S = \frac{1}{\sum e} \quad (2)$$

式中: (x, y) 代表中心像素坐标; H 代表层次卷积后的图像矩阵; I 表示原始图像; R_o 代表滤波算子半径;“ $*$ ”代表卷积运算;“ $\lfloor \cdot \rfloor$ ”代表向下取整。

关于算子各层大小划分的问题,主要是如何确定各个层次半径参数的问题。接下来根据实际应用中的 4 种情况讨论该算子的处理效果以及如何确定半径参数。具体 4 种情况如图 4 所示,图 4(a)、(b)、(c) 三种情况分别是目标在 L_i 层、目标在 L_i 和 L_m 层、目标在 L_i 、 L_m 和 L_o 层;图 4(d) 中无目标,表示该算子经过平滑背景区域的情况。

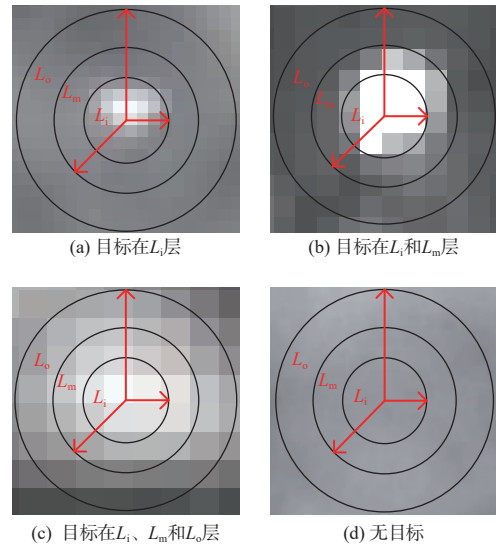


图 4 该算子的不同应用情况

Fig. 4 Different applications of proposed operator

当该算子对图 4(a) 做卷积运算时, L_i 层亮度大于 L_o 层,经过卷积操作, L_i 层中的目标的亮度显著增加,并平滑 L_o 层的背景亮度,提高目标和背景之间的强度对比,达到增强目标的效果,同时抑制背景;当该算子对图 4(b) 做卷积运算时,由于过渡区域 L_m 层中有少量目标像素存在,会导致卷积之后的目标减小,不能够完全增强目标;当该算子对图 4(c) 做卷积运算时,由于目标包含于整个算子内部,经过卷积运算时,由于算子区域内的像素强度彼此接近,会把目标当作连续背景处理,又由于

该算子滤波器的系数之和为 0, 因此滤波后的结果接近于 0, 不会增加目标亮度, 反而起到背景抑制的效果; 图 4(d) 背景区域的卷积效果和图 4(c) 情况相同。

因此根据以上不同情况下该算子不同处理效果的分析, 该算子在实际应用中要保证目标在 L_i 层区域内, 目标在 L_i 层占比越高, 对目标的增强效果就越好。因此中间层半径的确定取决于红外图像中要检测目标的大小。由于小目标大小不超过 9×9 像素, 所以 L_i 层区域的最大直径应不超过 9。论文验证的是不超过 3×3 的小目标的提取, 所以论文中 L_i 的直径为 3。 L_m 和 L_o 的直径的大小需要结合公式(1)的约束条件而设置, 满足整个算子值为 0 的条件即可。论文中 L_m 的直径为 5, L_o 的直径为 9, 且 $S=1/64$ 。

1.2 基于最大值的自适应阈值

经过层级卷积滤波后的图像 H 中会过滤掉连续的背景, 并留下目标区域和少量随机噪声以及背景。由于随机噪声通常以单个像素的形式出现, 并且它不是高斯型的, 因此它的亮度将小于真实目标的亮度。此刻对 H 采取自适应阈值分割可以提取小目标, 且自适应阈值的计算如公式(3)。

$$T_h = M - k * \mu - \sigma, \quad k \geq \frac{M - \sigma}{\mu} \quad (3)$$

式中: T_h 是计算的阈值; M 、 μ 和 σ 分别为 H 图像中像素值的最大值、平均值和方差。 k 是一个实数系数, 本实验中对于单目标的检测 k 的取值为 1。对多目标而言, 适当增加 k 值可降低漏检的概率。

通过阈值判断, 最后输出二值化图像 $H_{out}(x, y)$ 如公式(4)所示。

$$H_{out}(x, y) = \begin{cases} 1, & H(x, y) \geq T_h \\ 0, & H(x, y) < T_h \end{cases} \quad (4)$$

2 实验结果与分析

为了检验论文算法的有效性, 使用了大量包含小目标的红外单帧图像和红外序列图像进行实验验证, 同时选择了 TopHat、LoG、LCM、IPI、MPCM 五种现有的经典红外小目标检测算法作为对比算法。论文中所有的实验运行环境为 Windows10、2.40 GHz Intel i5-1135G7CPU、16GB RAM 的电脑环境上进行, 算法代码在 MATLAB R2016b 软件平

台中实现。

首先, 选择 5 组不同背景的红外图像, 其中 Seq.1 是海天背景, Seq.2~3 是天空背景, Seq.4 是建筑背景, Seq.5 是林木背景, 对这些包含无人机小目标的红外单帧图像进行不同算法的对比实验。其中具有代表性的实验结果如图 5 所示。

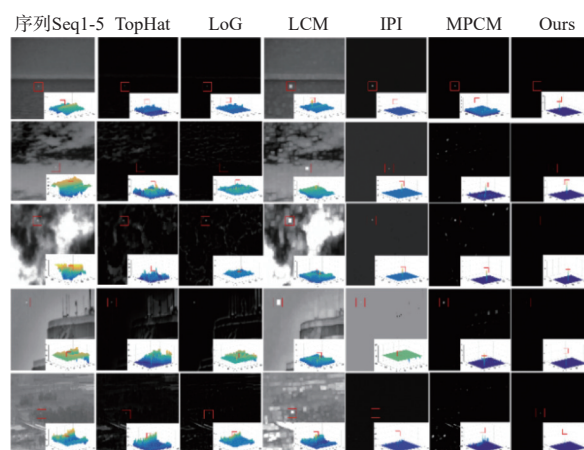


图 5 6 种算法处理后的单帧图像

Fig. 5 Single-frame images processed by six algorithms

在 Seq.1-4 图像中, 其背景分布特点是变化平缓, 干扰杂波比较少。从图 5 中的处理结果可以看出 IPI、MPCM 和论文所提出的算法都能够对目标准确提取, 并对背景的抑制效果较好; TopHat 和 LoG 算法也能提取出目标, 但是不能有效清除背景杂波, 使得处理效果欠佳; LCM 算法对目标的增强效果显著, 但是背景抑制能力较差。因此, 在背景变化平缓的红外图像中, 其他的 5 种算法在一定程度上都能够提取出目标, 但同时还存在不同程度的杂波干扰, 而论文的算法能够准确提取出目标并有效抑制背景。在背景变化复杂、杂波较多的林木背景 Seq.5 图像中, 对算法的背景抑制和目标增强能力具有一定的挑战性, 进而选择复杂多变的林木背景序列图像 Seq.6~10 对 6 种算法的能力进一步验证。

为了进一步验证论文中的算法在背景变化复杂、杂波较高的红外图像中对小目标的检测能力, 选取了 5 组 (Seq.6~Seq.10) 不同林木背景的红外序列图像进行实验对比验证, 并对每组序列图像算法进行性能评估。表 1 是关于 5 组序列图像的详细信息。6 种算法处理后的图像如图 6 所示。其中, TopHat、LoG、LCM、MPCM 处理后的图像结果为相同阈值分割方法后的二值化图像。

表 1 红外序列图像信息

Table 1 Infrared sequence image information

图像序列	帧数	图像大小	目标数量	目标尺寸
Seq.6	325	256×256	1	3×3
Seq.7	597	256×256	1	3×3
Seq.8	266	256×256	1	3×3
Seq.9	276	256×256	1	3×3
Seq.10	290	256×256	1	3×3

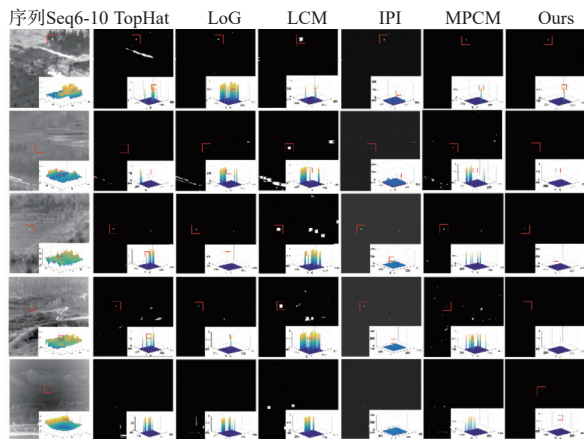


图 6 6 种算法处理后的序列图像

Fig. 6 Sequence images processed by six algorithms

从图 6 可以看出, TopHat、LoG、LCM、MPCM 算法对 Seq.6~9 中的目标都能够检测出来,但同时伴随着大量虚假目标的背景噪声; Seq.10 中并未检测出真实目标,同时产生大量虚假目标;在 IPI 算法中,能够在 Seq.6~9 中准确分离出目标,且伴随少量虚假目标,但是在 Seq.10 中未能检测出准确目标;在经过论文所提出的算法处理后,从图 6 中的 3D 图中可以明显看出, Seq.6~10 处理之后可以在没有任何虚假警报的情况下成功检测到真实目标,相比之下处理效果要好于前几种算法。

同时,使用背景抑制因子(background suppression factor, BSF)^[26]和信噪比增益(signal-to-clutter ratio gain, SCRG)^[27]、虚警率^[28]和检测率^[28]量化指标来评价不同算法的处理性能。BSF 的值越高,表示该检测方法对目标信号背景抑制的性能越好。SCRG 数值越大,表示该检测方法对目标信号的增强性能越好。BSF、SCRG 的定义如公式(5)和公式(6)。

$$f_{\text{BSF}} = \frac{\sigma_{\text{in}}}{\sigma_{\text{out}}} \quad (5)$$

式中: σ_{in} 和 σ_{out} 分别表示输入原始图像和处理后图像中完整背景强度的标准差。

$$f_{\text{SCRG}} = \frac{f_{\text{SCRGout}}}{f_{\text{SCRGin}}} \quad (6)$$

$$f_{\text{SCR}} = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\sigma_b} \quad (7)$$

式中: f_{SCR} 的定义如公式(7)所示,其中 μ_t 表示目标区域的平均像素值; μ_b 和 σ_b 分别表示背景区域的平均像素值和标准差。

6 种算法的 SCRG 和 BSF 平均数值如表 2、表 3 所示,加粗值表示为最大值。同时,不同算法的平均处理时间如表 4 所示,加粗值表示为平均处理时间最短。

表 2 6 种方法在 Seq.6~10 上的 SCRG 值比较

Table 2 Comparison of SCRG values of six methods on Seq.6~10

算法	图像序列				
	Seq.6	Seq.7	Seq.8	Seq.9	Seq.10
TopHat	1 501.57	78.90	0.93	1 062.44	12.55
IPI	24 184.64	332.68	8.66	70.49	19.08
LCM	7 971.7	512.41	4.09	8 441.12	29.78
MPCM	10 099.61	61.68	10.67	10 891.93	55.73
LoG	3 613.22	81.99	2.2	2 967.2	15.06
Ours	30 663	734.65	28.14	16 763.96	57.51

表 3 6 种方法在 Seq.6~10 上的 BSF 值比较

Table 3 Comparison of BSF values of six methods on Seq.6~10

算法	图像序列				
	Seq.6	Seq.7	Seq.8	Seq.9	Seq.10
TopHat	268.01	228.77	265.74	246.53	639.97
IPI	25.19	10.48	10.35	14.87	12.84
LCM	165.27	134.29	173.25	193.29	178.09
MPCM	124.59	327.89	227.86	207.17	563.92
LoG	555.63	421.91	493.86	506.00	1 182.76
Ours	888.35	1 503.29	8 004.54	1 231.68	3 992.90

表 4 6 种方法在 Seq.6~10 中平均运行时间

Table 4 Average running time of six methods on Seq.6~10

算法	图像序列				
	Seq.6	Seq.7	Seq.8	Seq.9	Seq.10
TopHat	0.010 0	0.010 6	0.010 5	0.010 9	0.011 6
IPI	6.925 6	7.152 9	7.287 3	7.041 5	8.189 0
LCM	0.081 5	0.083 0	0.081 4	0.084 2	0.086 0
MPCM	0.068 3	0.068 2	0.066 7	0.068 9	0.068 8
LoG	0.019 2	0.020 7	0.020 6	0.020 0	0.020 9
Ours	0.006 4	0.006 4	0.005 9	0.005 6	0.006 5

1 s

从实验结果可以看出, 论文中提出的算法在 Seq.6~10 复杂背景的红外序列图像中能够实现 SCRG 和 BSF 值最大, 表示论文提出的算法在背景抑制和目标信号增强方面都优于其他 5 种比较算法。其次, 结合表 4 平均处理时间可以看出, IPI 虽然在背景抑制能力上稍有优势, 但是其处理时间最长。相比之下, 论文中提出的算法处理时间相比较其他 5 种算法最快, 且仅为 LoG 滤波算法处理时间的 30.42%。

最后, 通过接受者操作特性(receiver operating characteristic curve, ROC)曲线来描述红外小目标检测过程中检测率与虚警率之间的关系。检测率(P_d)和虚警率(P_a)的定义如公式(7)和公式(8)。

$$P_d = \frac{n_t}{N_t} \quad (8)$$

$$P_a = \frac{n_f}{N} \quad (9)$$

式中: n_t 、 N_t 、 n_f 和 N 分别指示图像序列中检测到的目标个数、真实目标总数、检测到的假目标数和整个图像中的像素总数。

ROC 曲线是以检测概率(true positive rate, TPR)为纵坐标、虚警概率(false positive rate, FPR)为横坐标的绘制曲线, 在 ROC 曲线中曲线越靠左上, 说明算法的检测性能越好^[29]。图 8 表示了 6 种算法在 Seq.6~10 序列图像中的 ROC 曲线, 从图中可以看出, 和其他 5 种算法相比, 论文提出的算法能够获取最大的面积, 且能够在虚警率较低的同时保持较高的检测率, 优于其他 5 种算法, 具有更好的检测性能。通过上述实验结果可以看出, 在与其他经典的 5 种检测算法相比中, 论文提出的方法在复杂背景的红外图像中, 具有更有效的复杂背景抑制、目标增强的能力, 以及在更低的虚警率下具有更高的检测率。其总体的处理效果要优于其他经典的 5 种检测算法, 具有更高的鲁棒性。

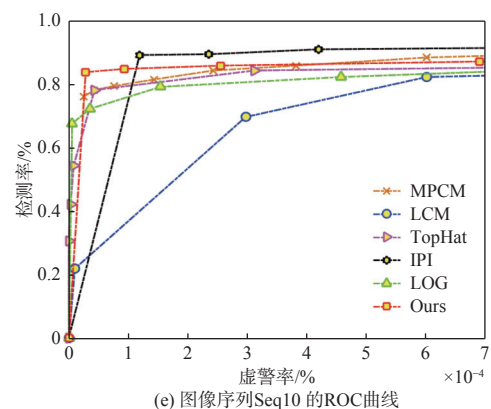
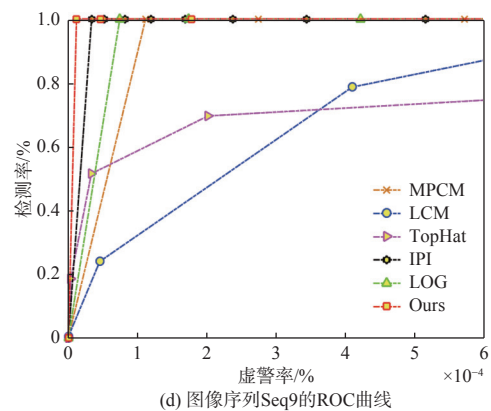
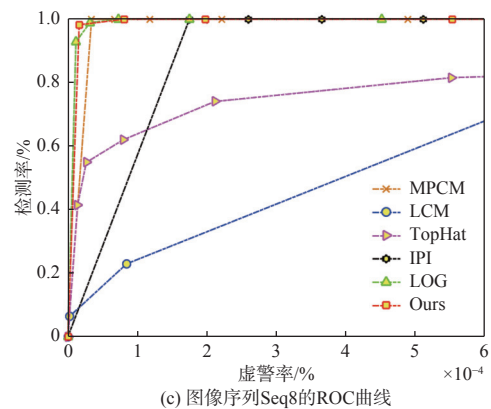
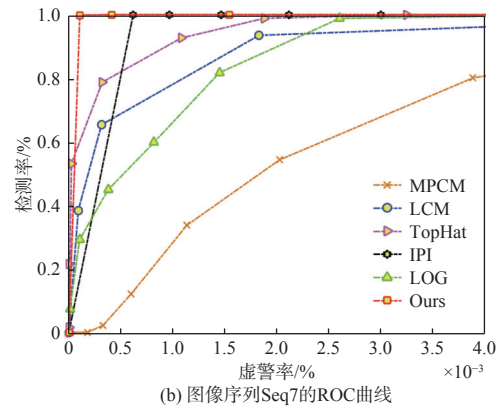
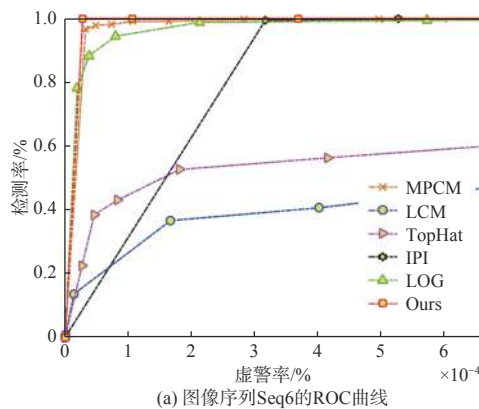


图 8 不同算法的 ROC 曲线图

Fig. 8 ROC curves of different algorithms

3 结论

论文提出了层次卷积滤波的红外小目标检测算法,包括两个部分:一是结合红外小目标的高斯特性,设计一种层次卷积滤波器,去除连续背景,提取目标;二是对滤波后的图像采用基于最大值的自适应阈值分割方法,去除背景杂波的影响,准确提取出目标。并在不同复杂背景下的红外图像数据集上进行了定性和定量实验。实验结果表明,该算法在复杂背景的图像中具有最少的处理时间、较高的检测精度和良好的鲁棒性,优于其他 5 种典型的检测方法,且平均处理时间仅为 LoG 滤波算法的 30.42%,具有鲁棒性。

参考文献:

- [1] 王好贤,董衡,周志权. 红外单帧图像弱小目标检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 114.
WANG Haoxian, DONG Heng, ZHOU Zhiquan. Review on dim small target detection technologies in infrared single frame images[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 114.
- [2] 何巍,安博文,潘胜达. 局部对比度先验下基于低秩模型的红外小目标检测方法[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 17.
HE Wei, AN Bowen, PAN Shengda. Infrared small target detection method based on low rank model with local contrast prior[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 17.
- [3] 任向阳,王杰,马天磊,等. 红外弱小目标检测技术综述[J]. 郑州大学学报(理学版), 2020, 52(2): 1-21.
REN Xiangyang, WANG Jie, MA Tianlei, et al. Review on infrared dim and small target detection technology[J]. *Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition)*, 2020, 52(2): 1-21.
- [4] 范鹏程,张卫国,刘万刚,等. 基于嵌入式GPU的红外弱小目标检测算法[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1089-1095.
FAN Pengcheng, ZHANG Weiguo, LIU Wangang, et al. Infrared weak small target detection algorithm based on embedded GPU[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 1089-1095.
- [5] 李佳. 低慢小无人机目标红外成像探测关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LI Jia. Research on the key technology of infrared imaging detection for low-slow-small UAV[D]. Xi' An: Xidian University, 2020.
- [6] 张祥越,丁庆海,罗海波,等. 基于改进LCM的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2017(7): 270-276.
ZHANG Xiangyue, DING Qinghai, LUO Haibo, et al. Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017(7): 270-276.
- [7] LIU C, XIE F Y, DONG X M, et al. Small target detection from infrared remote sensing images using local adaptive thresholding[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 1941-1952.
- [8] 李俊宏,张萍,王晓玮,等. 红外弱小目标检测算法综述[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(9): 1739-1753.
LI Junhong, ZHANG Ping, WANG Xiaowei, et al. Infrared small-target detection algorithms: a survey[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2020, 25(9): 1739-1753.
- [9] SHAO X P, FAN H, LU G X, et al. An improved infrared dim and small target detection algorithm based on the contrast mechanism of human visual system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(5): 403-408.
- [10] MARVASTI F S, MOSAVI M R, NASIRI M. Flying small target detection in IR images based on adaptive toggle operator[J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(4): 527-534.
- [11] 王笛,沈涛. 基于三阶累积量的红外弱小目标单帧检测算法[J]. 电光与控制, 2020, 27(10): 27-30.
WANG Di, SHEN Tao. Single-frame detection algorithm for infrared dim target based on third-order cumulant[J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27(10): 27-30.
- [12] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574-581.
- [13] WEI Y T, YOU X G, LI H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2016, 58: 216-226.
- [14] DENG H, SUN X P, LIU M L, et al. Small infrared target detection based on weighted local difference measure[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4204-4214.
- [15] GAO C G, MENG D Y, YANG Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 4996-5009.
- [16] DAI Y M, WU Y Q, SONG Y. Infrared small target and background separation via column-wise weighted robust

- principal component analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016(77): 421-430.
- [17] KONG X, YANG C P, CAO S Y, et al. Infrared small target detection via nonconvex tensor fibered rank approximation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021(99): 1-21.
- [18] YANG X H, HU X C, ZHOU S H, et al. Interpolation-based contrastive learning for few-label semi-supervised learning[J/OL]. *arXiv*, [2022-06-22]. <https://arxiv.org/abs/2202.11915>.
- [19] ZHOU W C S, XU C W, MCAULEY J L. BERT learns to teach: Knowledge distillation with meta learning[C]// *Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics Dublin, Ireland: Association for Computational Linguistics*, 2022: 7037-7049.
- [20] LIU Y, TU W X, ZHOU S H, et al. Deep graph clustering via dual correlation reduction[C]// *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Vancouver, Canada: AAAI, 2022: 7603-7611.
- [21] LIU Y, YANG X H, ZHOU S H, et al. Simple contrastive graph clustering[J/OL]. *arXiv*, [2022-06-26]. <https://arxiv.org/abs/2205.07865>.
- [22] 张汝榛, 张建林, 祁小平, 等. 复杂场景下的红外目标检测[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 128-137.
- ZHANG Ruzhen, ZHANG Jianlin, QI Xiaoping, et al. Infrared target detection and recognition in complex scene[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 128-137.
- [23] LIN L K, WANG H Y, TANG Z X. Using deep learning to detect small targets in infrared oversampling images[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(5): 71-76.
- [24] 蔡伟, 徐佩伟, 杨志勇, 等. 复杂背景下红外图像弱小目标检测[J]. *应用光学*, 2021, 42(4): 643-650.
- CAI Wei, XU Peiwei, YANG Zhiyong, et al. Dim-small targets detection of infrared images in complex backgrounds[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 643-650.
- [25] 杜鹏. 复杂背景条件下红外弱小目标检测关键技术研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2020.
- DU Peng. Research on key technology of infrared detection of dim and small target under complex background conditions[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2020.
- [26] PANG D D, SHAN T, LI W, et al. Facet derivative-based multidirectional edge awareness and spatial-temporal tensor model for infrared small target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-15.
- [27] LI Q, NIE J Y, QU S C. A small target detection algorithm in infrared image by combining multi-response fusion and local contrast enhancement[J]. *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 241(3): 166919.
- [28] 陈紫强, 梁晨. 低虚警率的红外弱小目标检测算法[J/OL]. *电讯技术*, [2022-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1267.TN.20211117.0837.002.html>.
- CHEN Ziqiang, LIANG Chen. Infrared dim target detection algorithm with low false alarm rate[J/OL]. *Telecommunication Engineering*, [2022-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1267.TN.20211117.0837.002.html>.
- [29] 韩金辉, 蒋亚伟, 张小件, 等. 采用三层窗口局部对比度的红外小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 244-253.
- HAN Jinhui, JIANG Yawei, ZHANG Xiaojian, et al. Infrared small target detection using tri-layer window local contrast[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 244-253.