

基于 Robinson-Guard 滤波器和像素聚拢度的小目标检测方法

楼晨风^{1,2,3}, 张湧^{1,2*}, 尹佳琪^{1,2,3}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 线列红外推扫探测器扫描帧率低, 存在带状噪声, 为此, 提出一种基于 Robinson-Guard 滤波器和像素聚拢度的小目标检测方法。在红外图像上均匀布置采样窗口, 令采样窗口根据图像亮度梯度聚集到高亮区域。融合红外图像的目标能量信息、局域对比度、目标像素聚拢度等多种特征, 将采样窗口的加权叠加作为目标概率图。使用全局阈值分割获取目标, 最终实现红外小目标的检测。实验结果表明, 该算法可以检测中小尺寸的红外目标, 且有效对抗探测器带来的带状噪声。

关键词 探测器; 图像识别; 红外图像; 小目标检测; Robinson-Guard; 像素聚拢度

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1504001

Small Target Detection Method Based on Robinson-Guard Filter and Pixel Convergence

Lou Chenfeng^{1,2,3}, Zhang Yong^{1,2*}, Yin Jiaqi^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A linear array infrared push scan sensor has low scanning frame rate and belt noise. Therefore, a small target detection method based on Robinson-Guard filter and pixel convergence is proposed. At the first stage, some sample windows are uniformly placed on the infrared image, so that the sample windows can focus on the highlighted region according to the brightness gradient of image. Then, the weighted superposition of the sampling window is used as the target probability map, which combines the target energy information, local contrast, target pixel convergence, and other features of the infrared image. Finally, the target is obtained by global threshold segmentation, and the detection of small infrared target is realized. Experimental results show that the method can detect the small and medium size infrared targets and is effectively resistive to the band noise caused by the detector.

Key words detectors; image recognition; infrared image; small target detection; Robinson-Guard; pixel convergence

OCIS codes 040.1880; 100.3008; 040.3060

1 引 言

随着红外探测器技术和计算机技术的广泛运用, 识别红外图像中目标的手段得到了极大的发展, 但对于复杂背景下的弱小红外目标而言, 提取和跟

踪此类目标依然存在一些困难, 如: 红外图像中目标的空间分辨率较低; 难以获得大量的目标样本用于提取特征; 对于目标识别的准确率要求通常较高等。为识别红外目标, 国内外学者针对这些问题提出了许多有效的算法, 而另一种增强目标识别性能的思想

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-02-24; 录用日期: 2020-04-28

基金项目: 国家十三五国防预研项目(Jzz2016-0404/Y72-2)、上海市现场物证重点实验室基金(2017xcwzk08)

* E-mail: zybyx@sina.com

路是提高原始图像分辨率。例如:红外线列推扫探测器具有分辨率高的优势,可大大增大目标识别的潜力,但代价是输出帧率较低,且存在与扫描方向一致的带状噪声。

由于线列推扫探测器的输出帧率较低,许多需要多帧关联识别的算法^[1-3]应用困难,且会为目标识别带来较大的延迟。为发挥探测器的潜力,本文主要讨论单帧识别算法。

对于中小目标的单帧检测,存在很多经典的方法。基于图像频率^[4]、二维最小均方差(TDLMS)^[5]、简单非线性滤波器^[6-7]、背景估计^[8]的经典背景估计算法运算速度快,形式简洁,但在复杂的背景条件下容易受到高频背景(如云层边缘和海天线)的干扰。Human Visual System^[9]、高斯函数差分(DoG)^[10]、局部对比度估计(LCM)^[11]和各种融合算法^[12-14]通过对比目标和目标周围背景亮度分割目标。这些算法针对固定空间尺度的红外小目标效果较好,但对间断的带状噪声或复杂背景边缘常常存在虚警,且对高分辨率下的中等尺寸红外目标识别性能不佳。基于低秩稀疏表示(LRSR)的识别算法^[15-16],利用稀疏目标模型区分目标、噪声和背景,总体具有较强的识别性能,但其时间复杂度与图像分辨率不是线性关系,对于高分辨率图像而言,实现稳定的实时处理难度较大。基于信息熵^[17-18]的算法可融合各种熵特征以增强图像中的目标,但由背景边缘和带状噪声引起的虚警率较高,需要结合复杂的虚警处理手段。近年来,亦有使用机器学习识别红外目标的案例^[19],但此类方法需要大量数据进行训练,对于极小尺度的目标将完全失效,且运算开销较大,在高分辨率场景下难以投入实用。

红外线列推扫探测器成像时,空间分辨率高,但帧率低,存在带状噪声,需要一种运算速度快、识别能力强且在不同场景下表现稳定的算法,因此本文提出了一种融合 Robinson-Guard 滤波器和像素聚拢度的红外小目标识别方法。该方法通过像素聚拢度尽可能地排除了带状噪声和形状异常的高亮区域的影响,通过大尺度窗口和窗口预搜索解决了小目标的检测问题,通过保护带解决了背景边缘区域的虚警问题,可以在各种复杂场景下对目标实现单帧检测,在实验中表现出了稳健的识别效果。

2 目标特征的设计

2.1 Robinson-Guard 滤波器的优点与不足

Robinson-Guard 滤波器^[20]是一种经典的点目

标检测滤波器,滤波器窗口外圈上设计一个保护带区域 Z ,将其作为背景像素,以对比窗口内的点目标和保护带内背景的亮度差异,其优点在于:通过调节窗口大小,可以适应各种中等尺度的目标,同时依然可以保留对小目标的检测能力,使其不易被背景边缘干扰,且不会带来过大的运算开销。Robinson-Guard 滤波器定义为

$$f_{\text{Robinson}} = \begin{cases} f_{\text{pre}}(x, y) - \max(z), & f_{\text{pre}}(x, y) > \max(z) \\ 0, & f_{\text{pre}}(x, y) \leq \max(z) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为点的坐标; f_{Robinson} 为 Robinson-Guard 滤波器的输出结果; $\max(z)$ 为保护带区域 Z 内像素的最大值; $f_{\text{pre}}(x, y)$ 为窗口内原始像素亮度^[20]; (x, y) 为像素坐标。

假定保护带区域中的背景是较为均匀的,如果被保护带保护的区域亮度高于保护带,则高亮区域为小目标。然而,受探测器性能的影响,线列推扫探测器成像时容易出现横向的带状噪声。例如,图 1 中的带状噪声强度相较于散粒噪声强度高 7 dB,对目标检出起到了较大的负面影响。图 2 显示,这类带状噪声可令保护带区域内的 $\max(z)$ 异常偏高, f_{Robinson} 偏低,使检测能力下降。为识别中等尺寸目标,增大了 Robinson 滤波器的窗口大小,随着保护带区域的增大,保护带更容易捕获带状噪声和散粒噪声,检测能力将进一步下降。如果单纯通过降低检测阈值来提高灵敏度,则更容易引起由散粒噪声导致虚警率增加的问题。

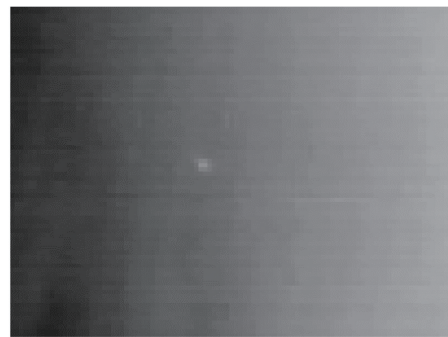


图 1 线列探测器图像中存在的带状噪声

Fig. 1 Belt noise in image shot by linear array sensor

然而,随着窗口的增大,带状噪声、散粒噪声和红外目标显现出空间分布上的特征差异。红外目标通常为光斑状,带状噪声通常为横向的条状,而散粒噪声通常为分散的像素点。从像素聚拢程度上分析,组成红外目标的像素最为聚集,带状噪声次之,散粒噪声最为分散。为此,本文根据噪声和点目标

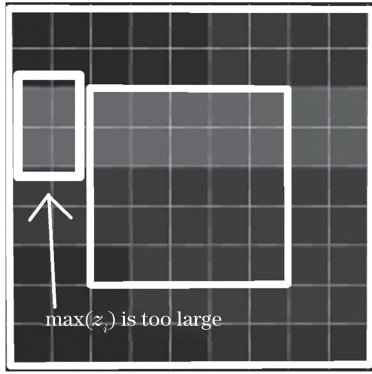


图 2 带状噪声导致 $\max(z)$ 过高

Fig. 2 Belt noise causes $\max(z)$ being too high

的像素聚拢程度不同的特点,提出了一种针对性的小目标识别方法。

2.2 一种衡量像素聚拢程度的指标

受光学条件和红外探测器分辨率限制,红外小目标的视觉形象大多为实心光斑状,组成目标的像素较为聚集。基于这一认知,本文提出一种用于衡量像素聚拢程度的指标。

对于平面直角坐标系中的以坐标原点为圆心的半径为 a 的圆形区域 D ,有

$$x^2 + y^2 < a^2. \quad (2)$$

设 S 为圆形区域 D 的面积,有

$$\frac{\iint_D \sqrt{x^2 + y^2} d\sigma}{S^{3/2}} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}}, \quad (3)$$

式中: $d\sigma$ 为区域 D 上的面积微元。

对于(3)式而言,注意到 $\sqrt{x^2 + y^2}$ 实际上为 $d\sigma$ 到 D 圆心的距离,因而,对于经图像二值化后由 n 个像素构成的目标 D 而言,记目标 D 中的某个像素 p 的坐标为 (x_p, y_p) ,定义质心 C 的坐标为 (x_c, y_c) ,其像素聚拢度 M_C 为

$$\begin{cases} x_c = \left[\frac{\sum_{p \in D} x_p}{n} \right] \\ y_c = \left[\frac{\sum_{p \in D} y_p}{n} \right] \end{cases}, \quad (4)$$

$$M_C = \sum_{p \in D} \frac{r_p}{n^{3/2}}, \quad n > 1, \quad (5)$$

其中

$$r_p = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2}, \quad (6)$$

式中: x_c, y_c 为整数; r_p 为像素到质心 C 的距离; $[\cdot]$ 为取整符号。

特别地,如果存在正整数 R_D :

$$r_p \leq R_D, \quad (7)$$

将所有满足(7)式的像素的坐标集合称为 U ,若 U 恰好与目标像素集合相等,则称该目标为目标半径为 R_D 的圆目标。对于圆目标而言, $R_D \rightarrow \infty$ 时,(6)式为(3)式的离散形式,故 $M_C \rightarrow \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \approx 0.3762$,由此,补充定义

$$M_C = \frac{2}{3\sqrt{\pi}}, \quad n = 1. \quad (8)$$

给定像素数量 n 相同的非圆目标 T_w 和圆目标 T_r ,将目标相叠,使两者质心重合,则 T_w 可以通过依次将 T_r 内的部分像素移动到集合 P 外实现。由于每次移动将增加 M_C 值,易知,对于相同面积的目标而言,圆目标 T_r 的 M_C 值最小。然而,当 R_D 不趋于无穷时, M_C 的误差可能增大,因此下文将讨论 R_D 较小的情形。

对于圆目标而言,当半径 $R \geq 1$ 时,有 $n \geq 5$ 。图 3 展现了当 $R \geq 1$ 时,圆目标的实际 M_C 值与理论值的绝对偏差率 D_{DR} ,其定义为

$$D_{DR} = \left| \frac{M_C - \frac{2}{3\sqrt{\pi}}}{\frac{2}{3\sqrt{\pi}}} \right|. \quad (9)$$

可见, M_C 不存在非常大的误差,且当 $R > 1$ 时,绝对偏差率迅速收敛至 0.2% 以下。

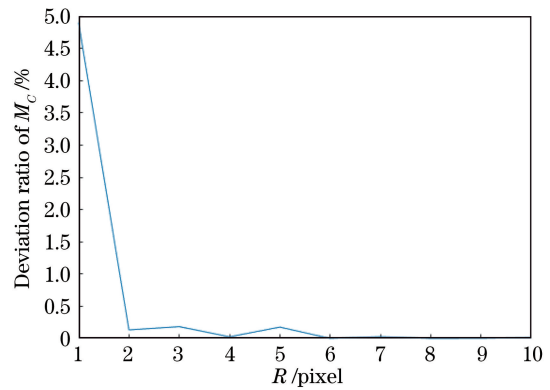


图 3 半径为 R 的圆目标的 M_C 与理想值的偏移率

Fig. 3 Deviation ratio between M_C of circle target with radius of R and ideal value

除此之外,根据由(7)式导出的圆目标定义,不存在像素数为 n 且 $2 \leq n \leq 4$ 的圆目标,然而,在实践中,这一尺寸的红外目标是存在的。因此图 4 构造了三个使 M_C 尽可能小的实心目标,以覆盖所有案例。在图 3 和图 4 中, $n=2$ 时 M_C 出现最大绝对偏差率,偏差率为 6.01%,较为有限。因此 M_C 是一个较为稳定的指标。

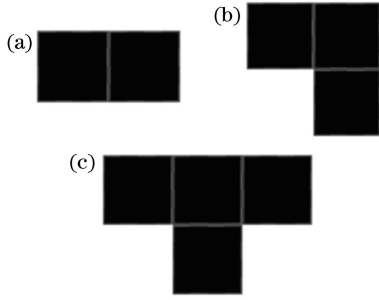


图 4 $2 \leq n \leq 4$ 时 M_C 值最小的目标。(a) $M_C = 0.3536$;
(b) $M_C = 0.3849$; (c) $M_C = 0.3750$

Fig. 4 Targets with minimum M_C when $2 \leq n \leq 4$.

(a) $M_C = 0.3536$; (b) $M_C = 0.3849$; (c) $M_C = 0.3750$

2.3 像素聚拢度的作用

由图 5 可以看出,图 5(a)中像素较可能为目标,图 5(b)中像素较可能为带状噪声,图 5(c)中像素较可能为随机噪声。可见,像素的 M_C 值可以用于代表一组待测像素与红外小目标的相似性。

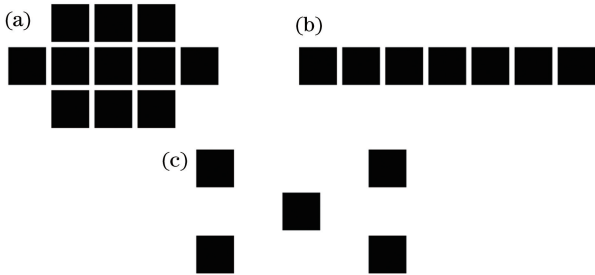


图 5 一些典型像素的 M_C 值。(a) $M_C = 0.4033$;

(b) $M_C = 0.6479$; (c) $M_C = 0.8000$

Fig. 5 M_C of some typical pixels. (a) $M_C = 0.4033$;

(b) $M_C = 0.6479$; (c) $M_C = 0.8000$

本文对 M_C 进行缩放,表达式为

$$\left(\frac{k}{M_C}\right)^m, k = \frac{2}{3\sqrt{\pi}}, \quad (10)$$

将 M_C 转化为百分比值以衡量一组图样的圆度。(10)式中 m 为模型的一个常参数,用于调节像素聚拢度在模型中的影响大小。该参数的取值与使用的窗口大小有关。通过调节 m 的大小,可以修正像素聚拢度的作用强度。当取 $m = 1$ 时,图 5(a)~(c)的 M_C 百分比值分别为 93.28%, 58.06%, 47.03%,进而体现了三个图样相对于圆型图样的差距。因此,像素聚拢度可以有效地抑制带状噪声和随机噪声。

2.4 基于像素聚拢度的扩展 Robinson-Guard 判别器

现有的中长波红外探测器在工作区间内,其输出值和黑体辐射强度通常近似成线性^[21-22]。因此,可以认为像素 p 的输出值 L_p 和该像素接收的目标

辐射功率 P_p 近似满足

$$L_p = k \cdot P_p + b, \quad (11)$$

式中: k 为与探测器性能相关的比例系数; b 为探测器固有的偏置系数。

探测器接收的目标辐射总功率 P_{sum} 是各像素接收的目标辐射功率之和,故

$$P_{\text{sum}} = \sum P_p = \sum \frac{L_p - b}{k}. \quad (12)$$

在(12)式的基础上,对于一帧图像,探测器接收的该疑似目标的能量与相同面积的背景峰值辐射能量之差 E_{target} 可表示为

$$E_{\text{target}} = \frac{1}{k} \sum f_{\text{Robinson}}, \quad (13)$$

即

$$E_{\text{target}} \approx \sum f_{\text{Robinson}}. \quad (14)$$

由此,基于 Robinson-Guard 滤波器设计判别特征 f_{ERG} ,记边长为 $2d + 1$ 的窗口矩阵 \mathbf{A} 中坐标为 (x, y) 的像素为 $A(x, y)$,计算矩阵 \mathbf{A} 中所有像素的 $f_{\text{Robinson}}[A(x, y)]$,取最大值 $\max\{f_{\text{Robinson}}[A(x, y)]\}$,并将结果大于 0 的像素设为目标像素,计目标像素总数为 n ,计算这 n 个像素组成的像素集合的 $M_C(\mathbf{A})$ 。根据(11)式,定义该窗口的扩展 Robinson-Guard 判别器 f_{ERG} 为

$$f_{\text{ERG}}(\mathbf{A}) = \sum_n \max\{f_{\text{Robinson}}[A(x, y)]\} \cdot \left[\frac{k}{M_C(\mathbf{A})}\right]^m, k = \frac{2}{3\sqrt{\pi}}. \quad (15)$$

当 $n = 1$ 时, f_{ERG} 退化为该像素的 f_{Robinson} 值。

2.5 窗口分布热力图与总体算法

亮度相同、尺寸较大的红外目标理应具有较强的特征。但在 f_{ERG} 的框架下,以图 6 为例,如果目标尺寸接近窗口尺寸,使部分目标落入保护带,反而会导致特征强度被削弱。因此,需要从其他角度进行补偿。另一方面,在一些显然无目标的区域挥霍算力是不明智的。如能将背景区域的检测窗口设法移动到目标上进行叠加检测,则可以减轻以上两个问题。

人们希望窗口的移动原则具有这些特点:如果一个检测窗口内不太可能有目标,它应该往可能有目标的方向移动;而如果窗口落到了疑似目标上,它应该不再移动。而且,这一方法最好对于大尺寸目标更为有效,从而减轻大目标落入保护带引起的负面效应。

因此,使用以下方法移动窗口:设图像为 $P \times Q$

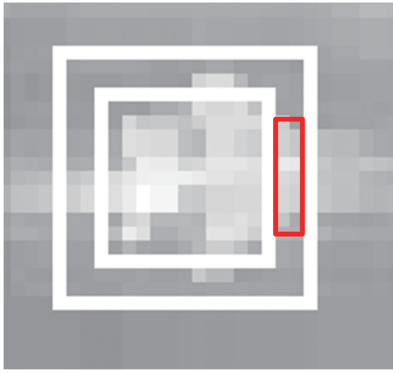


图 6 部分落入保护带的模拟红外目标

Fig. 6 Simulated infrared target in guard band

的二维矩阵,窗口中心坐标为 (x, y) ,窗口内最亮点坐标为 $(x+a, y+b)$,移动窗口,使窗口中心落在 $(x+a, y+b)$ 上,移动次数为有限次。这一方法分下列几种情况:

1) 如果窗口起初包含了目标,窗口将移动到目标上以便识别目标。

2) 对于均匀背景下的点目标而言,如果窗口起初不包含点目标,这些窗口将在背景噪声的作用下随机移动或不移动,一部分窗口在数次移动后将到达点目标上。

3) 对于非均匀背景下的点目标而言,如果窗口起初不包含点目标,这些窗口将在背景强度的作用下向背景强度高的方向移动。由于移动距离有限,部分窗口在最后一次移动后捕获了目标,但目标不处于窗口中心,这会导致窗口偏向背景强度弱的方向,但偏移量不大于半个窗口边长,如图 7 所示。相比于情况 1),此时保护带内的背景强度较低,以位置精确度为代价增强了目标信杂比。

4) 对于大尺寸目标而言,由于目标面积大,将有更多的窗口截获目标,从而增强了识别性能。

5) 对于图像边缘的目标而言,由于能够移动到

目标的窗口较少,算法的处理能力将下降。但对于全景式线列推扫探测器而言,由于不存在图像边缘,这一代价是无需考虑的。

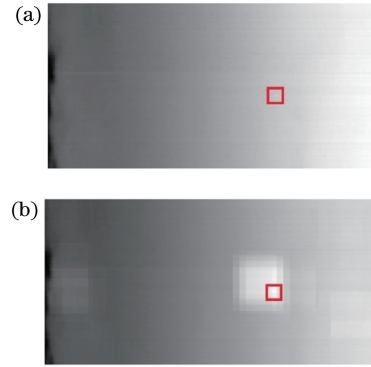


图 7 低信噪比(SNR)下的窗口偏移。(a)原始图像; (b)发生偏移的窗口与原始图像的叠加图

Fig. 7 Window position shift in low SNR condition.

(a) Original image; (b) fusion map of original image and shifted window

最终,本文使用以下步骤对图像进行处理:

1) 在待处理的 $P \times Q$ 图像矩阵上以间距 s 像素(即一个窗口在横或纵方向上移动 s 像素即为它的相邻窗口)放置边长为 $2d+1$ 像素的窗口(该窗口矩阵为 \mathbf{A}_{ij}),窗口中心坐标 (x_i, y_j) 满足

$$\begin{cases} x_i = d + i \cdot s, 0 \leq i \leq \frac{P-d}{s} \\ y_j = d + j \cdot s, 0 \leq j \leq \frac{Q-d}{s} \end{cases} \quad (16)$$

2) 找到每个窗口内的像素最大值,移动窗口,使窗口中心移动到最大值所在的像素上,仍记移动后的窗口矩阵为 \mathbf{A}_{ij} ,中心坐标为 (x_i, y_j) 。

3) 重复一次步骤 2)。

4) 计算 \mathbf{A}_{ij} 的 f_{ERG} ,构建 $P \times Q$ 矩阵 \mathbf{M}_{ij} ,其中每个元素 $M_{ij}(x, y)$ 的值为

$$M_{ij}(x, y) = \begin{cases} f_{\text{ERG}}(\mathbf{A}_{ij}), & x_i - d \leq x \leq x_i + d, \quad y_j - d \leq y \leq y_j + d \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

5) 叠加所有 \mathbf{M}_{ij} ,其结果为目标概率图(TPM),即

$$\mathbf{M}_{\text{TPM}} = \sum_{0 \leq i \leq \frac{P-d}{s}, 0 \leq j \leq \frac{Q-d}{s}} \mathbf{M}_{ij}, \quad (18)$$

式中: \mathbf{M}_{TPM} 为目标概率图矩阵。

6) 定义阈值 T_{Thd} 二值化目标概率图以获得目标。其中, $M_{\text{TPM}}^{\text{max}}, M_{\text{TPM}}^{\text{min}}$ 分别为目标概率图中的最大

值和最小值, $k_{\text{th}}, b_{\text{th}}$ 为可变参数,则有

$$T_{\text{Thd}} = \frac{k_{\text{th}} \cdot (M_{\text{TPM}}^{\text{max}} + b_{\text{th}}) + M_{\text{TPM}}^{\text{min}}}{k_{\text{th}} + 1} \quad (19)$$

本文算法流程图如图 8 所示。

在实践中发现,在使用高分辨率探测器的场景下,红外目标的尺度有时可达 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 。为了尽可能覆盖这部分目标,本文使用的窗口边长

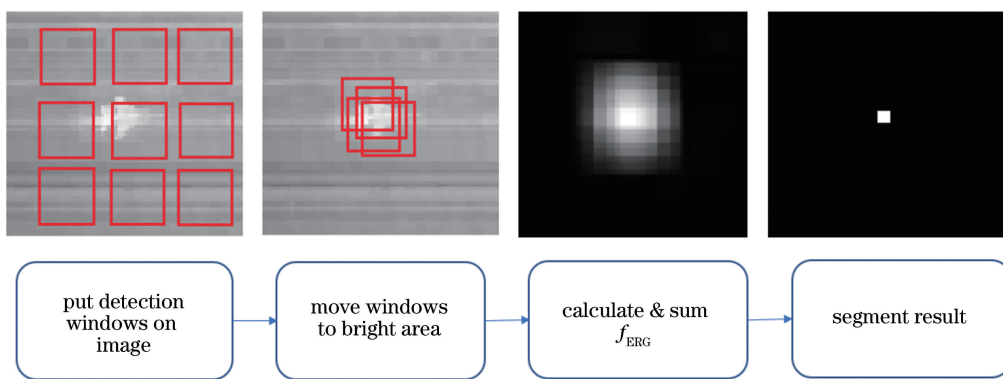


图 8 本文算法流程图

Fig. 8 Flowchart of proposed method

$2d+1$ 为 31 pixel。间距 s 将影响计算时间和最终效果,通过广泛尝试,取间距为 6 pixel 可以在性能和速度之间获得平衡。参考经典的 Robinson-Guard 保护带宽度,取保护带宽度为 2 pixel。为了规避浮点乘方的运算代价, m 宜取整数。经实验, $m=1$ 的效果较为良好。在 8 bit 图像上,本文使用 $k_{th}=1.5, b_{th}=10$ 进行分割。算法的时间复杂度为 $O(n)$,空间复杂度为 $O(1)$,可以在有限内存的设备上进行流水线处理。

图 9 为使用一台中波红外线列探测器拍摄云层中

的飞鸟图像,并用本文算法分割后的结果。当环境温度为 293 K 时,该探测器的温度分辨率为 12.06 mK。选取了典型的多目标红外图像[图 9(a1)、(a2)],并通过人工标注了多个强弱不一的红外目标。图 9(b1)、(b2)为本文算法运行时,窗口移动后所停留位置的热力图,图中的高亮区域代表此处的检测窗口较为密集。图 9(c1)、(c2)是将热力图以 f_{ERG} 加权后得到的最终结果。图 10(a)、(b)分别为图 9(c1)、(c2)的三维表示,可见算法可以有效地提取红外目标,并且抑制了云层背景引起的干扰。

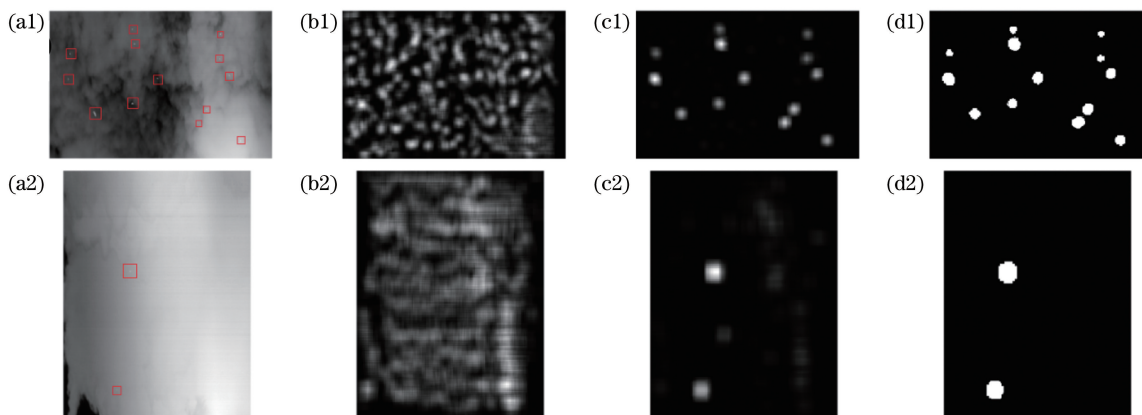


图 9 云层中的红外飞鸟图像处理示意图。(a1)(a2)原始图像;(b1)(b2)窗口分布热力图;(c1)(c2)目标概率图;(d1)(d2)分割结果

Fig. 9 Processing of IR images of birds in clouds. (a1)(a2) Original images; (b1)(b2) heat maps of window distribution; (c1)(c2) target probability maps; (d1)(d2) segmentation results

图 11 为人工合成的 4 张信噪比不同的图片,采用本文算法进行识别。当信噪比 R_{SNR} 达到 0.5 时,本文算法可以较为有效地提取目标。

3 算法效果与评价

为横向对比本文算法的目标检测性能,本节使用公开数据集,选择 930 张图像数据对各种方法进

行对比与评价。图 12(a1)~(a5)为从云层中飞出的空中小目标^[3],图 12(b1)~(b5)为简单空中背景下的的大目标^[23],图 12(c1)~(c5)为复杂空地背景下的小目标^[23]。所用的代码、公开数据和运行结果均已上传至 <https://github.com/ln93/DENTIST> 供审阅和复现。

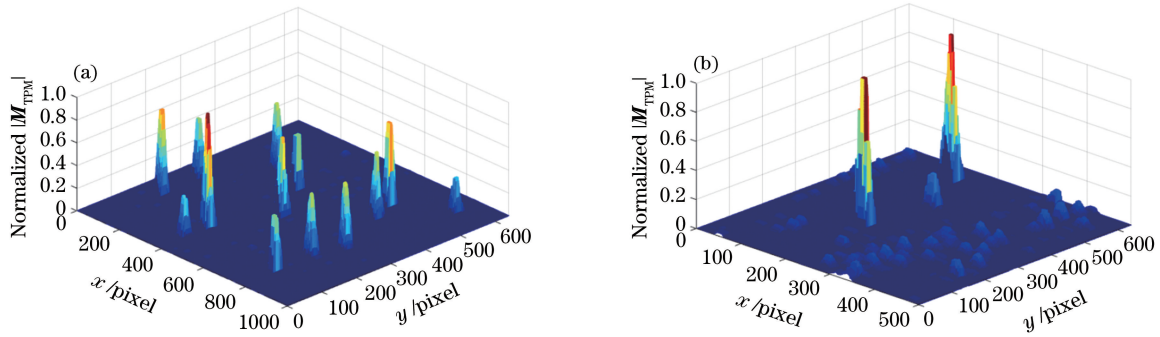


图 10 对图 9(c1)、(c2) 目标概率图进行归一化后的三维表示。(a) 对应图 9(c1); (b) 对应图 9(c2)

Fig. 10 Three-dimensional projection of normalized $|M_{\text{TPM}}|$ in Figs. 9(c1) and 9(c2). (a) Projection of Fig. 9(c1); (b) projection of Fig. 9(c2)

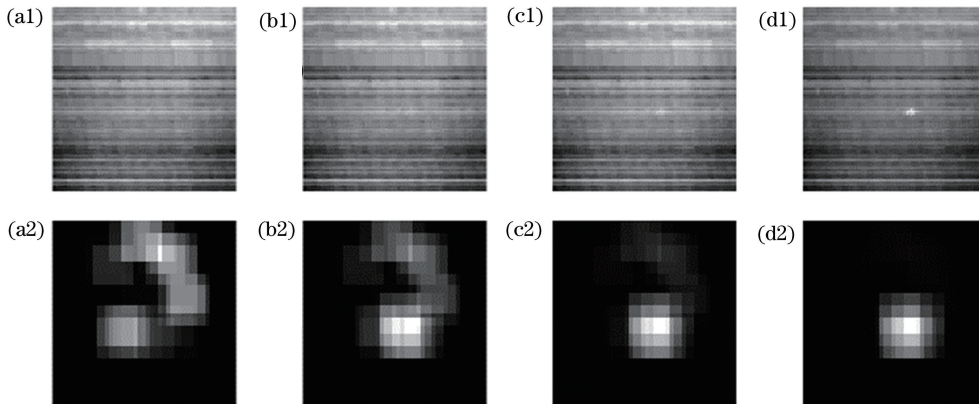


图 11 不同信噪比下的模拟图和目标概率图。(a1) $R_{\text{SNR}}=0.2$ 的模拟图; (b1) $R_{\text{SNR}}=0.5$ 的模拟图; (c1) $R_{\text{SNR}}=1$ 的模拟图; (d1) $R_{\text{SNR}}=3$ 的模拟图; (a2) $R_{\text{SNR}}=0.2$ 的 M_{TPM} ; (b2) $R_{\text{SNR}}=0.5$ 的 M_{TPM} ; (c2) $R_{\text{SNR}}=1$ 的 M_{TPM} ; (d2) $R_{\text{SNR}}=3$ 的 M_{TPM}

Fig. 11 Simulated images and M_{TPM} for different SNR. (a1) Simulated image with $R_{\text{SNR}}=0.2$; (b1) simulated image with $R_{\text{SNR}}=0.5$; (c1) simulated image with $R_{\text{SNR}}=1$; (d1) simulated image with $R_{\text{SNR}}=3$; (a2) M_{TPM} with $R_{\text{SNR}}=0.2$; (b2) M_{TPM} with $R_{\text{SNR}}=0.5$; (c2) M_{TPM} with $R_{\text{SNR}}=1$; (d2) M_{TPM} with $R_{\text{SNR}}=3$

在使用默认参数的条件下使用本文方法、MDTDLMS-RDLCM^[11]方法、NIPPS方法^[3]、RIPT方法^[3]对比识别率(R_{DR})与虚警率(R_{FA}),结果如图12、表1、表2所示。识别率与虚警率的定义为

$$\begin{cases} R_{\text{DR}} = \frac{N_{\text{D}}}{N_{\text{T}}} \\ R_{\text{FA}} = \frac{N_{\text{F}}}{N_{\text{D}} + N_{\text{F}}} \end{cases}, \quad (20)$$

式中: N_{D} 为算法正确检测的目标数; N_{F} 为算法误检的虚假目标数; N_{T} 为样本中存在的实际目标数。所有方法的可调参数使用原始论文的默认参数。其中,MDTDLMS-RDLCM方法在场景c下出现了大量的带状或片状虚警,已经无法统计虚警率,因此表2中对应场景虚警率记为N/A。

所有的算法在a,b,d场景下均具有较好的识别率,然而在最为复杂的c场景下,除本文算法外,其

表 1 不同方法的识别率

Table 1 Detection rates of different methods

Scene	NIPPS	RIPT	MDTDLMS-RDLCM	Proposed method
a	1.000	1.000	0.467	0.667
b	1.000	1.000	1.000	1.000
c	0.726	0.551	0	0.615
d	1.000	0.852	0.773	0.784

表 2 不同方法的虚警率

Table 2 False alarms of different methods

Scene	NIPPS	RIPT	MDTDLMS-RDLCM	Proposed method
a	0.891	0.794	0	0
b	0.959	0.913	0	0
c	0.946	0.996	N/A	0.566
d	0.962	0.989	0.715	0.492

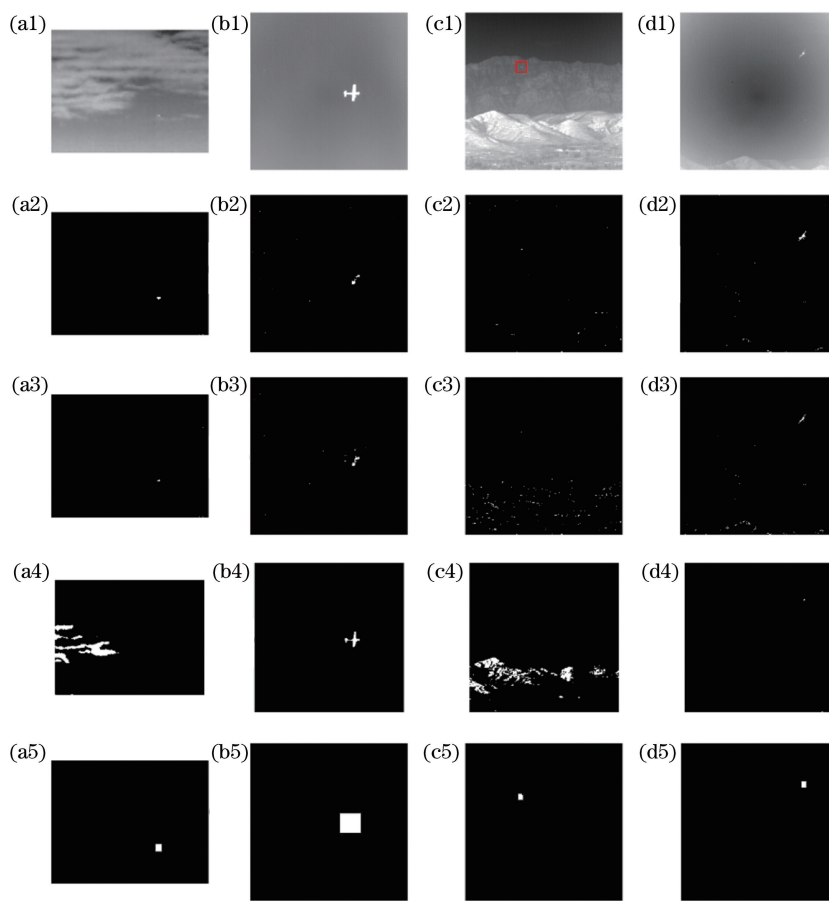


图 12 各种目标检测方法对比。(a1)(b1)(c1)(d1)场景 a,b,c,d;(a2)(b2)(c2)(d2) NIPPS;(a3)(b3)(c3)(d3) RIPT;
(a4)(b4)(c4)(d4) MDTDLSM-RDLCM;(a5)(b5)(c5)(d5)本文方法

Fig. 12 Comparison of several target detection methods. (a1)(b1)(c1)(d1) Scenes a, b, c, and d; (a2)(b2)(c2)(d2) NIPPS;
(a3)(b3)(c3)(d3) RIPT; (a4)(b4)(c4)(d4) MDTDLSM-RDLCM; (a5)(b5)(c5)(d5) proposed method

余算法均存在大量虚警,无法正常完成探测工作。从表 1、表 2 中亦可见,本文算法在所有算法中具有最低的虚警率和中等水平的探测率。NIPPS 和 RIPT 方法尽管具有较高的识别率,但在大多数场景下均有极高的虚警率,难以进行实际运用。

为了进一步衡量各种算法的识别率/虚警率的性能,本文选择每组场景中最后一张图片,调节各算法阈值,在图 13 中测量并绘制各种算法的接收者操作特性曲线(ROC 曲线)。在 ROC 曲线中,纵轴为识别率(R_{DR}),横轴为虚警率(R_{FA}),偏向左上方的曲线具有较好的性能。由图 13 可见,综合 4 种场景,本文算法综合性能较佳。

本文在 i7-4980HQ 处理器平台上,使用 Matlab R2015b 实现并统计了文中所提及的各种算法处理 4 张 256 pixel \times 256 pixel 的 8 bit 灰度图像所需的时间,结果如表 3 所示,其中 Max-median

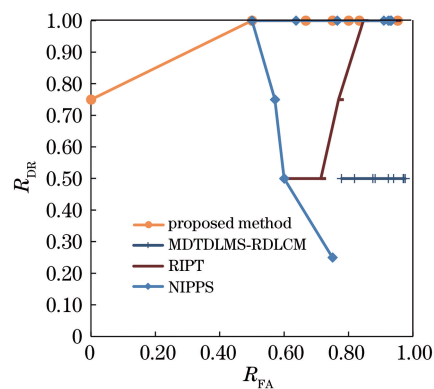


图 13 各种算法的 ROC 曲线

Fig. 13 ROC curves of different algorithms

滤波器使用 Matlab 自带函数实现。本文算法的窗口排列稀疏,可以有效减少计算量,由表 3 可见,本文算法的运行速度明显优于其他方法,接近 Max-median 滤波器,容易在常见的运算平台上实现实时处理。

表 3 不同目标检测方法的运行时间

Table 3 Running time of several target detection methods

s

Method	Max-median	NIPPS	RIPT	MDTDLMS-RDLCM	Proposed method
Time per 256 pixel×256 pixel	0.52	24.59	8.60	11.39	0.89

4 结 论

提出了一种基于 Robinson-Guard 滤波器和像素聚拢度的改进算法,实验结果表明,文中提出的方法可以有效地识别各种尺度的目标。在天空背景与复杂空地背景下,均具有较高的目标识别率和较低的虚警率。相较于文中提及的算法,本文算法在虚警率和运算速度上具有明显的优势。

参 考 文 献

- [1] Henriques J F, Caseiro R, Martins P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 583-596.
- [2] Zhang K, Li X G. Infrared small dim target detection based on region proposal[J]. Optik, 2019, 182: 961-973.
- [3] Dai Y M, Wu Y Q. Reweighted infrared patch-tensor model with both nonlocal and local priors for single-frame small target detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(8): 3752-3767.
- [4] Yang L, Yang J, Yang K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background[J]. Electronics Letters, 2004, 40(17): 1083-1085.
- [5] Hadhoud M M, Thomas D W. The two-dimensional adaptive LMS (TDLMS) algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(5): 485-494.
- [6] Deshpande S D, Er M H, Venkateswarlu R, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3809: 74-83.
- [7] Bai X Z, Zhou F G, Xie Y C. New class of top-hat transformation to enhance infrared small targets[J]. Journal of Electronic Imaging, 2008, 17(3): 030501.
- [8] Guan Z Q, Chen Q, Qian W X, et al. An adaptive background adjusting algorithm for dim target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2163-2168.
管志强, 陈钱, 钱惟贤, 等. 一种背景自适应调整的弱点目标探测算法[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2163-2168.
- [9] Kim S, Yang Y, Lee J, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system for IRST [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(9): 994-1011.
- [10] Wang X, Lv G, Xu L Z. Infrared dim target detection based on visual attention [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 513-521.
- [11] Han J H, Liang K, Zhou B, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 612-616.
- [12] Lu F X, Chen X, Chen G L, et al. Dim and small target detection based on background adaptive multi-feature fusion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(3): 269-275.
陆福星, 陈忻, 陈桂林, 等. 背景自适应的多特征融合的弱小目标检测 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 269-275.
- [13] Han J H, Liu S B, Qin G, et al. A local contrast method combined with adaptive background estimation for infrared small target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(9): 1442-1446.
- [14] Wu Y F, Wang Y J, Liu P X, et al. Infrared LSS-target detection via adaptive TCAIE-LGM smoothing and pixel-based background subtraction [J]. Photonic Sensors, 2019, 9(2): 179-188.
- [15] He Y J, Li M, Zhang J L, et al. Small infrared target detection based on low-rank and sparse representation [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 68: 98-109.
- [16] Gao S J, Jhang S T. Infrared target tracking using multi-feature joint sparse representation [C]// Proceedings of the International Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems-RACS'16, October 11-14, 2016, Odense, Denmark. New York: ACM Press, 2016: 40-45.
- [17] Bai X Z, Bi Y G. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2452-2466.
- [18] Li Y, Li P C, Shen Q. Real-time infrared target tracking based on ℓ_1 minimization and compressive features [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6518-6526.
- [19] Xie J R, Li F M, Wei H, et al. Enhancement of

- single shot multibox detector for aerial infrared target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0615001.
- 谢江荣, 李范鸣, 卫红, 等. 用于空中红外目标检测的增强单发多框检测器方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0615001.
- [20] Chen Z, Gu G H. Point detection algorithm based on Robinson filter's dual patterns matching and merging [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(6): 340-344.
- 陈喆, 顾国华. 基于 Robinson 双模板匹配及融合的点目标检测算法 [J]. *红外技术*, 2011, 33(6): 340-344.
- [21] Cao L H, Li N, Yang C Y, et al. Radiance calibration for 3-5 μm infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864.
- 曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3~5 μm 红外探测器的辐射定标 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 858-864.
- [22] Nan T L, Shen H H, Yang M Y, et al. Fast radiometric calibration method for long wave infrared detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122501.
- [23] Hui B W, Song Z Y, Fan H Q, et al. A dataset for dim-small target detection and tracking of aircraft in infrared image sequences [EB/OL]. (2019-10-28) [2019-12-31]. https://www.researchgate.net/publication/341402455_BIRDSAI_A_Dataset_for_Detection_and_Tracking_in_Aerial_Thermal_Infrared_Videos.