



·前沿技术与交叉科学·

基于侧窗滤波与时空正则化相关滤波的 红外弱小目标跟踪*

钱 琨, 王久山, 张首金, 沈建露

(江南大学 人工智能与计算机学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 当目标远离红外系统, 其在成像图像上的尺寸较小且信息量较少, 使得小目标的持续精确定位成一项有挑战性的问题。针对这一问题, 在相关滤波跟踪框架上, 引入能够区分红外弱小目标边缘信息与杂波噪声的侧窗图像滤波方法, 提出了一种弱小目标跟踪算法。具体来说, 首先利用时空正则化的相关滤波跟踪模型, 对目标位置附近更大范围的背景进行考虑。然后, 利用侧窗滤波对当前局部搜索区域进行侧窗滤波处理, 达到了保留边缘效果的同时剔除了图像噪声。最后, 通过原始图像与滤波后图像作差, 降低了背景边缘对目标定位错误的影响, 并实现小目标状态估计。为验证本文所提算法性能, 采用六组红外真实弱小目标图像序列进行实验, 并与核相关滤波、空间正则化的相关滤波, 以及时空正则化的相关滤波等经典算法作比较。实验结果表明, 所提算法在多组复杂背景的图像序列上, 获得了较高的跟踪精度, 验证了所提算法能有效应对红外弱小目标跟踪任务中的快速运动、低分辨率和强背景杂波等问题。

关键词: 目标跟踪; 红外弱小目标; 侧窗滤波; 相关滤波; 时空正则化

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230080

Infrared dim small target tracking based on side window filtering and spatial-temporal regularized correlation filters

Qian Kun, Wang Jiushan, Zhang Shoujin, Shen Jianlu

(School of Artificial Intelligence and Computer Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Due to the less information of distant target, it is always challenging to accurately track the target in the task of infrared dim small target tracking. To improve the accuracy, based on correlation filtering framework, the side window filtering method which can extract the edge features of small infrared target is introduced, and an algorithm of distant target tracking is proposed. Specifically, the side window filtering method is used to process the searching area of the current target, this method could restrain the negative influence of background edge on dim small target location. Next, the correlation filters tracking model is constructed with temporal and spatial regularities to achieve accurate target tracking. To verify the performance of the proposed algorithm, six groups of real infrared dim small target image sequences were used for experiments, and the algorithm is compared with other typical algorithms such as KCF, SRDCF and STRCF. The experimental results show that the algorithm could effectively solve the problems of fast motion, low resolution and strong light background in infrared dim small target tracking tasks, getting higher accuracy with image sequences and complex background.

Key words: target tracking, IR dim small target, side window filtering, correlation filters, spatial-temporal regularities

结合机器学习理论, 目标跟踪技术作为计算机视觉领域中的一个重要方向, 获得了长足进步。红外成像技术^[1]因其具有不易受恶劣环境干扰、隐蔽性强以及观测距离长等特点, 被广泛应用在军事和民事等领域中。为提升告警系统的有效性, 目标通常距离成像平面较远。与此同时, 目标所处环境通常较为复杂。由此, 针对红外弱小目标

* 收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-06-05

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目 (21KJA520001); 江苏省国际科技合作项目 (BZ2020069)

联系方式: 钱 琨, kqian@jiangnan.edu.cn。

的精确探测^[2-3]与跟踪^[4-6]仍需进一步完善。

近年来,目标跟踪算法主要有生成式和判决式两大类方法。基于生成式的方法对当前时刻目标状态建立模型,随后在下一时刻的图像中寻找出与目标最相似的区域作为候选区域。该类方法主要包含粒子滤波法^[7-9]、均值漂移法^[10-11]及光流法^[12-13]。粒子滤波法^[7]使用一组随机分布的采样点,运用重要性采样算法,建立概率密度函数,并依据概率密度函数预测下一组粒子分布。但大量的粒子样本导致算法的实时性较差。均值漂移法^[10]使用带有空间信息的颜色直方图描述目标,依据预测区域与已有目标之间的相似度实现迭代跟踪。因此,该类算法在目标快速移动及背景复杂多变的场景中效果不好。光流法^[12]依据像素在时间域上的变化来判断目标的运动轨迹,适合应用于目标小范围移动的场景。该类算法难以应对目标大范围移动的情况。

基于判别式的目标跟踪方法,主要是采用相关滤波跟踪框架,即将目标和背景区域分别作为正负样本,通过模型的训练获得参数,并作用于后续图像的目标搜索区域。最小输出误差平方和算法^[14](MOSSE)是相关滤波跟踪方法的开山之作,其核心思想是利用最小输出误差平方和训练滤波器模型。但该方法仅考虑了目标区域,从而在目标尺寸较小时精确度不高。基于此,核相关滤波算法^[15](KCF)通过构造循环矩阵扩充训练样本,从而提升模型的分类能力。核技巧也大幅提升算法速度。然而,KCF的边界效应问题,使得目标处于区域边界附近时,大概率无法被检出。为解决边界效应,空间正则化的相关滤波算法^[16](SRDCF)引入了空间正则约束,但也不可避免地增加了算法复杂度。随后,时空正则化相关滤波算法^[17](STRCF)在SRDCF算法的基础上加入了时间正则项,从而抑制了目标遭遇遮挡和发生大形变情况时模型的迅速腐败,进一步提升了算法在视觉跟踪任务上的鲁棒性。该算法使用效率更高的交替方向乘法(ADMM)迭代求解,大大提升了算法执行效率。上述相关滤波的算法在精度和实时性方面皆表现出色,且其对硬件性能的需求相对宽容。但是,在红外弱小目标跟踪场景中,存在着目标的信息量少、目标与背景对比度低,以及目标轮廓模糊等问题。由此,若该类相关滤波算法直接应用于红外图像弱小目标跟踪,通常产生跟踪偏移的问题。事实上,除了上述红外弱小目标普遍存在的特性,部分红外图像还存在快速移动、低分辨率及强背景杂波等问题。

传统的图像滤波技术一般采用盒子滤波方法^[18],将待处理像素置于滤波窗口的中心,经过一系列线性组合计算后实现图像降噪和目标增强。由于在计算过程中掺入了待处理像素四周环绕的其它像素信息,位于待处理像素上的尖锐边缘大概率被处理成平滑模糊的形态,目标丧失较多的边缘特征。针对该问题,具备在较大程度上保留目标边缘特征能力的侧窗滤波算法^[19](SWF)被提出,该方法将待处理像素置于滤波窗口的边缘或顶角,而非中心位置,完全避免了法线方向上窗口外侧像素的干扰,在计算过程中尽可能减少目标信息与背景噪声的融合,在降噪的同时有效保护了目标的边缘特征。

综上所述,本文针对红外弱小目标跟踪问题,在相关滤波跟踪算法的框架上,引入侧窗滤波图像降噪保边技术,提出一种基于侧窗滤波和STRCF的红外弱小目标跟踪算法。实验表明,无论在典型的红外弱小目标跟踪场景中,还是在具有快速移动、低分辨率及强背景杂波等干扰属性的跟踪场景中,都表现出较好的精度和实时性。

1 红外弱小目标跟踪方法

1.1 时空正则化的相关滤波算法

时空正则化的相关滤波算法(STRCF)是在传统相关滤波算法的基础上添置了空间和时间两个正则约束,求出最优的相关滤波模型 f_t^* 表示为

$$f_t^* = \operatorname{argmin}_f \frac{1}{2} \left\| \sum_{d=1}^D x_t^d * f_t^d - y \right\|^2 + \frac{1}{2} \sum_{d=1}^D \|w \cdot f_t^d\|^2 + \frac{\mu}{2} \|f_t - f_{t-1}\|^2 \quad (1)$$

其中, x 和 y 表示样本及其响应, f_t 表示第 t 帧的相关滤波器模型, d 和 D 表示当前和最大特征维度。进一步, $\frac{1}{2} \sum_{d=1}^D \|w \cdot f_t^d\|^2$ 和 $\frac{\mu}{2} \|f_t - f_{t-1}\|^2$ 分别表示空间和时间正则项, w 和 μ 分别为空间和时间正则系数。

基于交替方向乘法(ADMM),可将式(1)转化为以下几个子问题

$$f_t^{(i+1)} = \operatorname{argmin}_f \left\| \sum_{d=1}^D x_t^d * f_t^d - y \right\|^2 + \gamma \|f_t - g + h\|^2 + \mu \|f_t - f_{t-1}\|^2 \quad (2)$$

$$g^{(i+1)} = \operatorname{argmin}_g \sum_{d=1}^D \|w \cdot g^d\|^2 + \gamma \|f_t - g + h\|^2 \quad (3)$$

$$\mathbf{h}^{(i+1)} = \mathbf{h}^{(i)} + \mathbf{f}_i^{(i+1)} - \mathbf{g}^{(i+1)} \quad (4)$$

式中: i 表示迭代次数, γ 是一个步长参数, $\mathbf{g}=\mathbf{f}_i$ 是为了使用 ADMM 方法求解而构造出的辅助变量, $\mathbf{h}=\mathbf{s}/\gamma$ (其中 \mathbf{s} 为拉格朗日乘数)。

根据式(2), 子问题 \mathbf{f}_i 可在傅里叶域中重新表示为

$$\operatorname{argmin}_{\hat{\mathbf{f}}_i} = \left\| \sum_{d=1}^D \hat{\mathbf{x}}_i^d \cdot \hat{\mathbf{f}}_i^d - \hat{\mathbf{y}} \right\|^2 + \gamma \|\hat{\mathbf{f}}_i - \hat{\mathbf{g}} + \hat{\mathbf{h}}\|^2 + \mu \|\hat{\mathbf{f}}_i - \hat{\mathbf{f}}_{i-1}\|^2 \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{f}}_i$ 表示滤波器模型 \mathbf{f}_i 的离散傅里叶变换。从式(5)中可以分析得出, 响应 $\hat{\mathbf{y}}$ 的第 j 个元素只与 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 和 $\hat{\mathbf{f}}_i$ 在所有维度 D 上的第 j 个元素有关, 假设 $V_j(\hat{\mathbf{f}}_i)$ 是 $\hat{\mathbf{f}}_i$ 在所有维度 D 上第 j 个元素组成的向量, 可表示为

$$V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) = \operatorname{argmin}_{V_j(\hat{\mathbf{f}}_i)} \|V_j(\hat{\mathbf{x}}_i)^T V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) - \hat{y}_j\|^2 + \gamma \|V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) - V_j(\hat{\mathbf{g}}) + V_j(\hat{\mathbf{h}})\|^2 + \mu \|V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) - V_j(\hat{\mathbf{f}}_{i-1})\|^2 \quad (6)$$

对式(6)求导并令其导数为0, 可以得到 $V_j(\hat{\mathbf{f}}_i)$ 的近似解为

$$V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) = (V_j(\hat{\mathbf{x}}_i) V_j(\hat{\mathbf{x}}_i)^T + (\mu + \gamma) \mathbf{I})^{-1} (V_j(\hat{\mathbf{x}}_i) \hat{y}_j + \gamma V_j(\hat{\mathbf{g}}) - \gamma V_j(\hat{\mathbf{h}}) + \mu V_j(\hat{\mathbf{f}}_{i-1})) \quad (7)$$

通过 Sherman-Morrison^[20]公式, 可解出 $V_j(\hat{\mathbf{f}}_i)$ 为

$$V_j(\hat{\mathbf{f}}_i) = \frac{1}{\mu + \gamma} \left(\mathbf{I} - \frac{V_j(\hat{\mathbf{x}}_i) V_j(\hat{\mathbf{x}}_i)^T}{\mu + \gamma + V_j(\hat{\mathbf{x}}_i)^T V_j(\hat{\mathbf{x}}_i)} \right) (V_j(\hat{\mathbf{x}}_i) \hat{y}_j + \gamma V_j(\hat{\mathbf{g}}) - \gamma V_j(\hat{\mathbf{h}}) + \mu V_j(\hat{\mathbf{f}}_{i-1})) \quad (8)$$

获得 $\hat{\mathbf{f}}_i$ 后, 进一步通过傅里叶逆变换解出滤波器模型 \mathbf{f}_i 。显然, 式(8)的计算复杂度是低于式(2)的。

1.2 偏移分析

采集图像过程中的镜头抖动会导致目标在图像中短时间产生一定的位移。若目标大幅度偏离原位置, 偏离的目标可能处于搜索区域边缘, STRCF 算法较难检测出目标。此外, 分辨率低的图像, 其目标和背景的轮廓都较为模糊, 图像缺乏纹理特征。进一步, 目标运动至强背景杂波附近时, 强背景杂波中边缘的高频信息与目标信息相似, 模型可能会将边缘区域误判为目标, 从而将背景信息纳入模型中。由此, 模型的污染影响了后续跟踪结果。另外, 受采集过程中的镜头抖动影响, 部分图像存在运动模糊的属性, 上下帧的连贯性减弱, 目标与背景皆发生较大程度的变化, 不利于模型对目标的判别。

上述几种情况都会引起跟踪的偏移。由此, 需要找到一种有效的图像降噪方法, 利用该方法去除背景杂波信息, 并保留弱小目标特征信息。

1.3 侧窗滤波

基于上述分析, 本文引入侧窗滤波(SWF)方法, 对目标图像进行降噪保边的滤波处理。

在传统红外图像降噪方法中, 滤波器总是根据一个像素周围的像素来预估此像素的输出。具体而言, 传统图像降噪方法将待处理像素置于滤波窗口的中心, 对待处理像素和周围像素的线性组合结果来代替原像素。由此, 此类方法无法区分噪声与小目标的信息。而侧窗滤波器是将待处理像素置于滤波窗口的某一边或某一角, 在滤波过程中待处理像素只会与其某一侧或某一角的像素进行线性组合计算。通过最小化输入和输出之间的差距, 滤波器会优先选择包含目标像素的区域作为滤波窗口, 尽可能不选择包含背景或杂波的像素区域作为滤波窗口, 从而在最大程度上减少背景或杂波像素对目标像素的干扰, 实现保边效果。

具体来说, 侧窗滤波枚举了滤波窗口八个可能方向(上、下、左、右、东北、东南、西南以及西北), 前四个方向是将待处理像素置于滤波窗口的某条边上, 后四个方向是将待处理像素置于滤波窗口的某个角上。假设给定像素 k , 在滤波窗口中应用一个滤波核 \mathbf{F} , 则滤波结果可表示为

$$\mathbf{I}_k^{r,\rho,\theta} = \mathbf{F}(\mathbf{q}_k, r, \rho, \theta) \quad (9)$$

式中: \mathbf{q}_k 表示像素 k 所在滤波窗口的输入图像, r 表示滤波窗口半径, ρ 表示像素 k 位于窗口的哪个方位, 于是 ρ 存在2种取值($\rho=0, r$), ρ 取0时表示像素 k 位于窗口的侧窗, ρ 取 r 时表示像素 k 位于窗口的顶角, θ 表示滤波窗口方向, θ 存在4种取值($\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$), ρ 与 θ 的不同组合构成了8种可能的窗口方向。

为保留边缘信息, 需要最小化输入和输出之间的差距, 因此选择与输入 \mathbf{q}_k 具有最小欧式距离的输出 $\mathbf{I}_k^{r,\rho,\theta}$ 作为最终滤波结果

$$I_{\text{SWF}} = \underset{\forall I_k^{\rho, \theta}}{\operatorname{argmin}} \|q_k - I_k^{\rho, \theta}\|_2^2 \quad (10)$$

将本次滤波的输出作为下一次滤波的输入,反复迭代,从而获得增强效果。

为验证侧窗滤波对红外图像的降噪保边能力,对目标所在局部区域进行侧窗滤波处理,滤波窗口半径 r 设为2,滤波迭代次数设为10,侧窗滤波处理前后的侧窗滤波结果如图1所示。由图1可见,在使用侧窗滤波处理图像前,目标的附近存在大量强背景杂波,若直接使用相关滤波模型,则强背景杂波中的高频信号形成强烈干扰。使用侧窗滤波处理图像后,背景中大多数高频信号被抑制,而目标未被滤波处理过程削弱,保留了充足的特征。经侧窗滤波处理,弱小目标具备了更高的识别度,被相关滤波模型检出的机会增加。

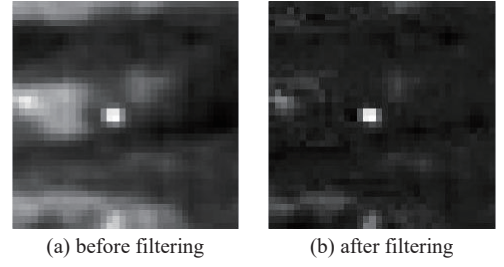


Fig. 1 Side window filtering result

图1 侧窗滤波结果

为改善传统算法在红外弱小目标跟踪上的偏移问题,本文采用上述侧窗滤波方法对输入图像进行降噪保边,利用侧窗滤波处理后的局部特征进行基于相关滤波框架的跟踪。基于侧窗滤波和STRCF的红外弱小目标跟踪算法具体步骤如下。

1.4 基于侧窗滤波和STRCF的红外弱小目标跟踪

为改善传统算法在红外弱小目标跟踪上的偏移问题,本文采用上述侧窗滤波方法对输入图像进行降噪保边,利用侧窗滤波处理后的局部特征进行基于相关滤波框架的跟踪。基于侧窗滤波和STRCF的红外弱小目标跟踪算法具体步骤如下。

(1)在第1帧图像中选取目标(手工选取或检测算法给定),设定采样区域,使用侧窗滤波处理采样区域,提取特征,训练得第1帧图像的相关滤波模型 f_1 ;

(a)初始化目标位置,设定第1帧采样区域 $p_1(x)$;

(b)对采样区域 $p_1(x)$ 进行侧窗滤波得到 $G(p_1(x))$,并使用采样区域 $p_1(x)$ 减去侧窗滤波结果 $G(p_1(x))$,得到采样区域与侧窗滤波结果的差值

$$g_1(x) = p_1(x) - G(p_1(x)) \quad (11)$$

对 $g_1(x)$ 提取特征,训练得到相关滤波模型 f_1 ;

(2)第 $t(t > 1)$ 帧到来,使用 $t-1$ 帧训练得到的相关滤波模型 f_{t-1} 求解第 t 帧目标位置;

(a)设定搜索区域 $p_t(x)$;

(b)对搜索区域 $p_t(x)$ 进行侧窗滤波得到滤波结果 $G(p_t(x))$,使用搜索区域 $p_t(x)$ 减去 $G(p_t(x))$,得到搜索区域与侧窗滤波结果的差值 $g_t(x)$

$$g_t(x) = p_t(x) - G(p_t(x)) \quad (12)$$

(c)对 $g_t(x)$ 提取特征,送入相关滤波模型 f_{t-1} ,求解响应图 s_t , s_t 最大值所在位置记为第 t 帧目标位置;

(3)根据第 t 帧目标位置训练得到第 t 帧图像的相关滤波模型 f_t ;

(4)跳转至(2)处进行下一帧处理。

所提算法流程如图2所示。

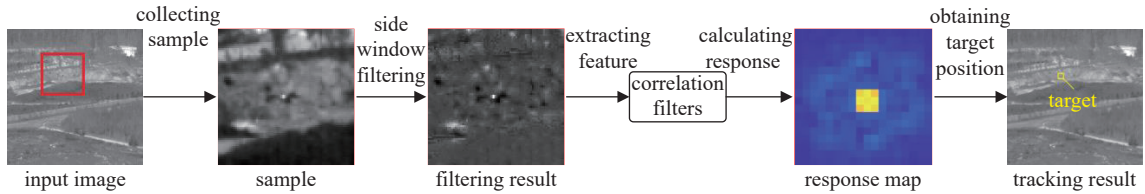


Fig. 2 Algorithm flow chart

图2 算法流程图

2 实 验

2.1 实验数据及参数设置

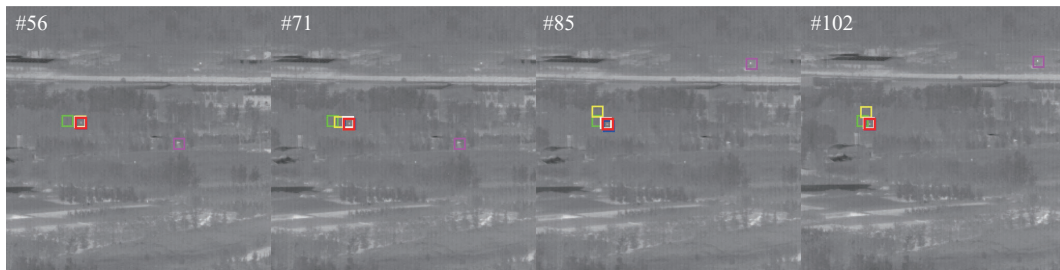
为评估所提算法性能,采用了6组256×256的红外图像序列进行仿真,将所提算法与KCF^[15]、SRDCF^[16]、STRCF^[17]、IPIM^[21]以及SVD-KCF^[22]算法进行比较。图像序列来源于公开的“地/空背景下红外图像弱小飞机目标

检测跟踪数据集^[23]”, 本文所使用的图像序列中, 目标在图像内占几个到几十个像素。

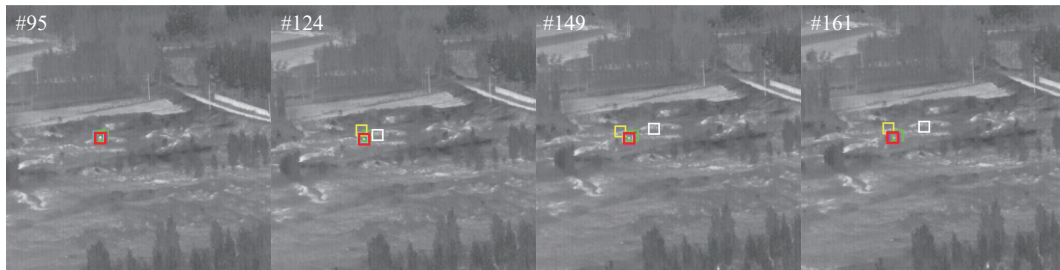
为防止掺入过多背景, 同时包含目标所有信息, 本文跟踪框的尺寸设为 10×10 , 采样区域和搜索区域设置为跟踪框的 4 倍, 侧窗滤波窗口半径 r 设为 2 个像素, 迭代次数设为 10。仿真平台为 MatlabR2020a, 计算机硬件配置为 CPU 主频 2.1 GHz, 内存 16 GB。(可共享相关算法代码)

2.2 实验结果及分析

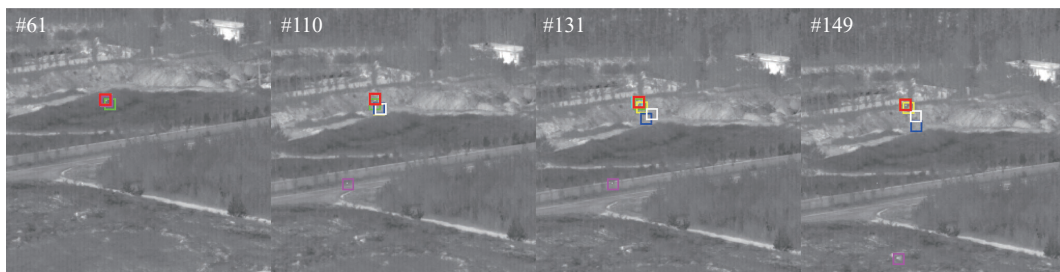
针对图像中存在的多种干扰属性, 分别测试 KCF^[15]、SRDCF^[16]、STRCF^[17]、IPIM^[21]、SVD-KCF^[22] 及本文所提算法的跟踪性能。一组仿真结果如图 3 所示。所提算法在各个序列上均表现出较优的性能。如图 3(a) 所示, 序列 1 主要包含目标尺度小和信噪比低的属性。其它算法均产生较大偏移。所提算法利用侧窗滤波抑制了目标周围的噪声, 保留更多特征信息, 在目标弱小的情况下依然能精准跟踪。如图 3(b) 和图 3(c) 所示, 序列 2 和序列 3 主要包含强背景杂波属性。当图 (b) 中目标进入丘陵地带上空、图 (c) 目标进入山坡上空, 由于紫外辐射骤然上升, 在地表形成强背景杂波, 其中包含大量与目标区域相似的高频信号。部分对比算法错误地将背景高频信号识别为目标并更新至模型中, 导致模型腐化并迅速产生跟踪偏移。而所提算法在模型中加入了时间正则约束, 有效减缓



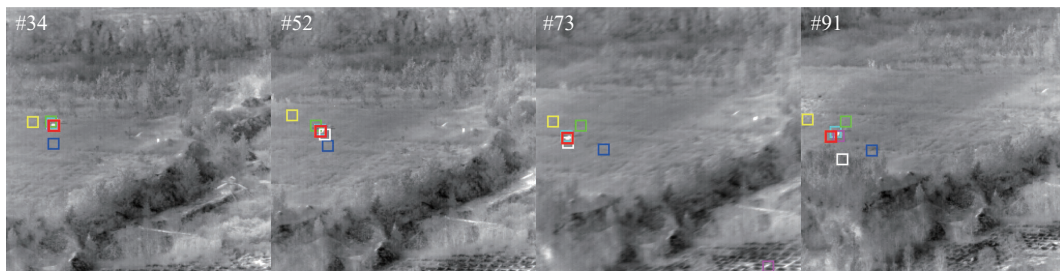
(a) simulation result of sequence 1



(b) simulation result of sequence 2



(c) simulation result of sequence 3



(d) simulation result of sequence 4

□ truth □ KCF □ SRDCF □ STRCF □ IPIM □ SVD-KCF □ this paper

Fig. 3 Simulation results

图 3 仿真结果

了模型腐化,跟踪效果明显优于其它算法。如图3(d)所示,序列4主要包含运动模糊和快速移动属性,此类图像具备失真和不连贯特性,目标尺度、形态以及位置皆大幅度改变。其它算法均产生了不同程度的偏移。在侧窗滤波的作用下,背景边缘信息被削弱,目标特征得到加强,滤波器模型始终对目标保持敏感,所提算法表现出更好的跟踪效果。

为了精准评价算法性能,参考文献[24]的评价标准,采用精度(Precision)和成功率(Success rate)对各算法进行定量分析和比较。精度与中心位置误差 E 有关。中心位置误差是指目标预测中心位置与目标真实中心位置的欧氏距离。设置中心位置误差阈值,若某时刻跟踪结果的中心位置误差不超过某阈值,则认为该时刻跟踪成功。随后,依照此规则计算出图像序列中所有跟踪成功的时刻所占比例,该比例即为某阈值下的精度。精度的取值范围为0~1。

成功率与覆盖度 O 相关,覆盖度体现的是预测目标框与真实目标框的重合程度,将预测目标框与真实目标框的交集区域的面积记为 A_1 ,将预测目标框与真实目标框的并集区域的面积记为 A_2 ,覆盖度可表示为 $O = A_1/A_2$ 。若某一时刻跟踪结果的覆盖度不低于某阈值,则认为该时刻的算法跟踪成功。随后,依照此规则计算出该图像序列中所有跟踪成功的时刻所占比例,该比例即为某阈值下的成功率。成功率的取值范围为0~1。

对六组图像序列仿真计算出各算法的精度和成功率,精度和成功率皆是对六组图像序列的仿真结果取均值而得到。各算法的精度和成功率如图4所示。

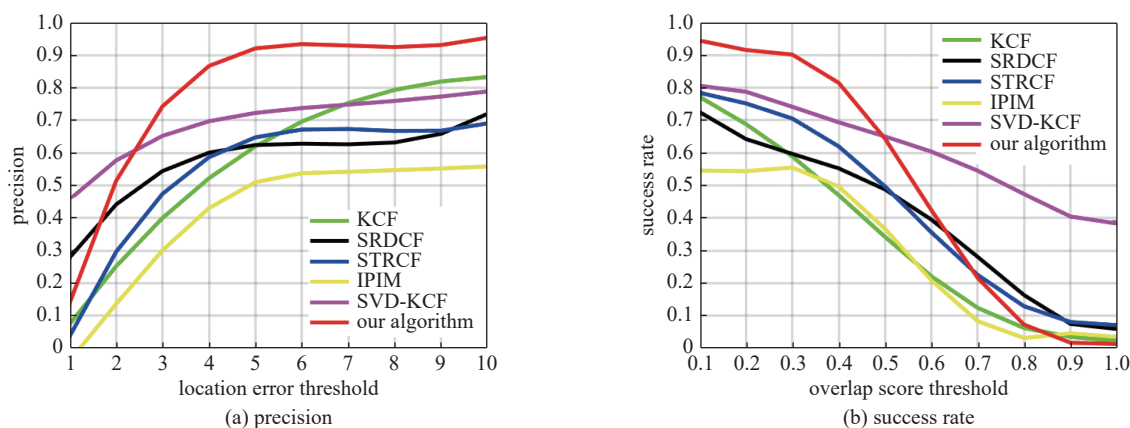


Fig. 4 Precision and success rate

图4 精度和成功率

图4(a)展示了各算法的精度,横坐标为中心位置误差阈值,纵坐标为精度。从图中可看出,仅当中心位置误差阈值为1和2时,所提算法精度低于其它算法,当阈值超出2后,所提算法的精度持续领先其它算法。图4(b)展示了不同算法的跟踪成功率,横坐标为覆盖度阈值,纵坐标为成功率。在覆盖度阈值达到0.6前,所提算法的成功率领先多数其它算法,阈值超过0.6后,所提算法的成功率逐渐落后,但与多数其它算法的差距较小。

算法性能对比如表1所示,表中“ $E=5$ ”表示中心位置误差等于5。由表1可知,所提算法在大多数情况下的跟踪效果比其它算法更好。跟踪实时性可采用每秒处理帧数(FPS)来衡量,KCF、SRDCF、STRCF和本文算法的FPS分别为大于300、162、168、36。由于添置了侧窗滤波图像降噪模块,因此所提算法慢于STRCF,但仍能够达到实时跟踪的效果。

综上所述,在主观评价和客观评价方面,所提算法的跟踪效果都更好,验证了所提算法能更好地实现针对红外弱小目标的跟踪。

3 结 论

本文提出了基于侧窗滤波和STRCF的红外弱小目标跟踪算法。侧窗滤波的降噪保边的功能,增强了目标与背景的分度,并降低高频边缘杂波对目标定位的影响,解决了STRCF时空正则化方法在弱小目标跟踪领域中的

表1 算法性能对比

Table 1 Comparison of algorithm performance

| sequence | precision/%($E=5$) | | | |
|------------|----------------------|-----------|------------|------------|
| | KCF | SRDCF | STRCF | this paper |
| sequence.1 | 35 | 65 | 98 | 99 |
| sequence.2 | 81 | 58 | 95 | 95 |
| sequence.3 | 82 | 98 | 64 | 94 |
| sequence.4 | 97 | 98 | 17 | 98 |
| sequence.5 | 31 | 9 | 15 | 58 |
| sequence.6 | 62 | 32 | 100 | 100 |
| average | 65 | 60 | 65 | 91 |

跟踪误差累积问题。实验结果表明,该红外弱小目标跟踪算法在所采用公开数据集上具有较高精度,且也有一定的实时性,为后续的相关研究奠定了良好的基础。将来的工作在于进一步优化跟踪模型,增加目标丢失再检测模块,提升算法鲁棒性。

参考文献:

- [1] Jennings D E, Jhabvala M D, Tucker C J, et al. Compact thermal imager: a flight demonstration of infrared technology for Earth observations[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(14): 4215-4225.
- [2] Zhang Landan, Peng Zhenming. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 382.
- [3] Qiu Zhaobing, Ma Yong, Fan Fan, et al. A pixel-level local contrast measure for infrared small target detection[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(9): 1589-1601.
- [4] Wan Minjie, Ye Xiaobo, Zhang Xiaojie, et al. Infrared small target tracking via Gaussian curvature-based compressive convolution feature extraction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 7000905.
- [5] Dong Xiabin, Huang Xinsheng, Zheng Yongbin, et al. Infrared dim and small target detecting and tracking method inspired by Human Visual System[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 62: 100-109.
- [6] Ding Lianghai, Xu Xin, Cao Yuan, et al. Detection and tracking of infrared small target by jointly using SSD and pipeline filter[J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 110: 102949.
- [7] Tian Mengchu, Chen Zhimin, Wang Huifen, et al. An intelligent particle filter for infrared dim small target detection and tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6): 5318-5333.
- [8] Chen Zhimin, Tian Mengchu, Bo Yuming et al. Improved infrared small target detection and tracking method based on new intelligence particle filter[J]. *Computational Intelligence*, 2018, 34(3): 917-938.
- [9] Chen Jian, Lin Yanming, Huang Detian, et al. Robust tracking algorithm for infrared target via correlation filter and particle filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 111: 103516.
- [10] Wang Zhile, Hou Qingyu, Hao Ling. Improved infrared target-tracking algorithm based on mean shift[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5051-5059.
- [11] 侯晴宇, 卞春江, 逯力红, 等. 红外图像中快速小目标的均值移位跟踪[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(4): 79-83. (Hou Qingyu, Bian Chunjiang, Lu Lihong, et al. Mean shift tracking for fast small target in IR imagery[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(4): 79-83)
- [12] Kwan C, Budavari B. Enhancing small moving target detection performance in low-quality and long-range infrared videos using optical flow techniques[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 4024.
- [13] Soolmaz A, Mehdi R. Visual object tracking using similarity transformation and adaptive optical flow[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(24): 33455-33473.
- [14] Bolme D S, Beveridge J R, Draper B A, et al. Visual object tracking using adaptive correlation filters[C]//Proceedings of 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2010: 2544-2550.
- [15] 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.
- [16] Danelljan M, Häger G, Khan F S, et al. Learning spatially regularized correlation filters for visual tracking[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer Vision. 2015: 4310-4318.
- [17] Li Feng, Tian Cheng, Zuo Wangmeng, et al. Learning spatial-temporal regularized correlation filters for visual tracking[C]//Proceedings of 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 4904-4913.
- [18] Bins J, Dihl L L, Jung C R. Target tracking using multiple patches and weighted vector median filters[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2013, 45(3): 293-307.
- [19] Yin Hui, Gong Yuanhao, Qiu Guoping. Side window filtering[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2019: 8750-8758.
- [20] Pedersen M S, Baxter K, Templeton B, et al. The matrix cookbook[M]. Denmark: Technical University of Denmark, 2008: 7-15.
- [21] Gao Chenqiang, Meng Deyu, Yang Yi, 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.
- [22] Qian Kun, Zhou Huixin, Rong Shenghui, et al. Infrared dim-small target tracking via singular value decomposition and improved Kernelized correlation filter[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 18-27.
- [23] 回丙伟, 宋志勇, 范红旗, 等. 地/空背景下红外图像弱小飞机目标检测跟踪数据集[J]. *中国科学数据*, 2020, 5(3): 291-302. (Hui Bingwei, Song Zhiyong, Fan Hongqi, et al. A dataset for infrared detection and tracking of dim-small aircraft targets under ground/air background[J]. *China Scientific Data*, 2020, 5(3): 291-302)
- [24] Liu Qiao, He Zhenyu, Li Xin, et al. PTB-TIR: a thermal infrared pedestrian tracking benchmark[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2020, 22(3): 666-675.