

基于引导滤波和核相关滤波的红外弱小目标跟踪

赵东, 周慧鑫, 秦翰林, 钱琨, 荣生辉, 成宽洪, 宋尚真

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 为了解决传统跟踪算法不能有效区分背景边缘和红外弱小目标的问题, 基于图像引导滤波和核相关滤波, 提出了一种改进型的红外弱小目标跟踪算法。将采用 6 组红外弱小目标图像序列得到的实验结果与采用经典跟踪算法得到的实验结果进行了比较。实验结果表明, 所提算法在主观视觉和客观评价指标方面均优于传统算法, 具有更高的目标跟踪精度与较好的实时性。

关键词 探测器; 目标跟踪; 弱小目标; 引导滤波; 核相关滤波; 傅里叶变换

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0204004

Infrared Dim-Small Target Tracking Based on Guided Image Filtering and Kernelized Correlation Filtering

Zhao Dong, Zhou Huixin, Qin Hanlin, Qian Kun, Rong Shenghui,

Cheng Kuanhong, Song Shangzhen

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract To solve the problem that the traditional tracking algorithm cannot be used to effectively distinguish the image edges from the infrared dim-small targets, an improved infrared dim-small target tracking algorithm based on guided image filtering and kernelized correlation filtering (KCF) is proposed. Six groups of infrared dim-small target image array are adopted in the experiment, the obtained results are compared with that by the classical tracking algorithms. The experimental results indicate that the proposed algorithm has a better performance than the traditional algorithms on both subjective view and objective evaluating indicators, and the proposed algorithm possesses a higher tracking accuracy and a better real time performance.

Key words detectors; target tracking; dim-small target; guided image filtering; kernelized correlation filtering; Fourier transform

OCIS codes 040.3060; 100.4999; 100.2000; 100.3008

1 引 言

红外监视与跟踪系统因其隐蔽性强和实时性好等特点, 被广泛应用于国防和民用领域。当系统作用距离较远时, 目标只占图像中的少量像素, 缺少细节纹理信息, 且目标通常淹没在复杂背景中, 其信噪比较低。另外, 红外弱小目标机动性能的不提高, 对跟踪算法的稳健性及实时性也提出了更高要求。

近年来, 研究人员针对红外弱小目标提出了许多检测跟踪算法。贾桂敏等^[1]提出了一种自适应模

板更新匹配算法, 该算法根据模板图像各像素到模板中心的距离构造加权函数, 改进了传统归一化相关算法, 取得了较好的效果。但当背景杂波较强时, 该算法较易产生累计误差, 难以保证对小目标长时间准确跟踪。改进的粒子滤波(PF)算法^[2-3]利用非负矩阵分解融合当前与之前的粒子分布权重, 减小了传统 PF 算法退化发散带来的精度误差, 取得了较好的跟踪效果。但改进的粒子滤波算法仅利用目标位置及速度状态进行特征滤波以维持跟踪, 而对形状特征信息无考虑, 故暂不适用于小目标跟踪。

收稿日期: 2017-07-03; **收到修改稿日期:** 2017-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(61401343, 61675160)、国家高技术研究发展计划(2014AA8098089C)、中科院光谱成像技术重点实验室开放基金(LSIT201503)、高等学校学科创新引智计划(B17035)

作者简介: 赵东(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事红外目标检测与跟踪方面的研究。E-mail: dzhao@stu.xidian.edu.cn

导师简介: 周慧鑫(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电成像及图像处理、目标检测跟踪及制导、光电对抗和高光谱异常检测等方面的研究。E-mail: hxzhou@xidian.edu.cn(通信联系人)

基于均值漂移和粒子滤波(MS-PF)的跟踪算法^[3-5],利用图像的统计特性对目标进行描述,在粒子滤波理论框架下,对随机粒子进行重新分配,在均值漂移迭代过程中对样本权值进行更新,一定程度上避免了目标特征信息不足的缺陷,但该方法不能很好地区分小目标和与背景边缘。移动管道滤波(MPF)算法^[6-7]利用相邻帧间位置具有连贯性的特征,建立了一种弱小目标运动方向估计模型,可估计弱小目标的运动方向和轨迹。但当背景云层运动缓慢时,该算法较易产生虚警。He等^[8]提出了权值相关滤波(WCF),利用低秩表示和融合不同目标的多特征函数以进行检测和滤波,从而获取目标位置。但当目标速度较快且超出搜索范围时,该算法并不能再次检测到目标。

核相关滤波(KCF)跟踪算法^[9-12]是目前视觉跟踪领域的一个前沿方向,但其跟踪红外弱小目标存在偏移。本文提出一种基于引导滤波(GIF)和KCF的红外弱小目标跟踪算法以解决偏移问题。实验结果表明,该算法在红外弱小目标跟踪上具有可行性。

2 KCF跟踪算法分析

2.1 KCF跟踪算法

KCF跟踪算法利用循环矩阵在跟踪目标区域密集采样,以构造大量的样本训练分类器,从而得到准确的分类器参数。使用核方法计算新一帧图像搜索区域与跟踪目标的相似度时,选取响应最大的点作为目标的新位置。同时,利用离散傅里叶变换减少分类器训练和跟踪过程中的运算量,提升计算速度。

2.1.1 循环矩阵

利用置换矩阵 \mathbf{P} 对基样本 \mathbf{x}_1 作循环位移操作,循环位移操作每次移动1位,移位之后的样本为 $\mathbf{P}^s \mathbf{x}_1$,训练分类器样本集为 $\{\mathbf{P}^s \mathbf{x}_1 | s=0,1,\dots,n-1\}$,对 \mathbf{x}_1 移动 n 次便可再次得到 \mathbf{x}_1 。由 \mathbf{x}_1 循环位移操作构造的循环矩阵为 $\mathbf{C}(\mathbf{x}_1)$,利用傅里叶变换, $\mathbf{C}(\mathbf{x}_1)$ 可被对角化^[12],表示为

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_1) = \mathbf{F}_1 \cdot \text{diag}[\mathcal{F}(\mathbf{x}_1)] \cdot \mathbf{F}_1^H, \quad (1)$$

式中 $\mathcal{F}(\cdot)$ 和 $\text{diag}(\cdot)$ 分别表示傅里叶变换和对角化操作, \mathbf{F}_1 是与 \mathbf{x}_1 不相关的常数矩阵, \mathbf{F}_1^H 是 \mathbf{F}_1 的厄米转置。

2.1.2 KCF分类器训练

岭回归是改进以后的正则化最小二乘模型,岭回归对于任意输入都有简单的闭式最优解。利用训练样本 $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$,寻找样本 \mathbf{x}_i 和回归目标 \mathbf{y}_i 最小化

平方误差的函数 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$,其中 T 表示转置操作, \mathbf{w} 为分类器参数。分类器参数 \mathbf{w} 满足

$$\min_{\mathbf{w}} \sum_i [f(\mathbf{x}_i) - \mathbf{y}_i]^2 + \lambda \|\mathbf{w}\|^2, \quad (2)$$

式中 $\min(\cdot)$ 表示最小化操作, $\|\cdot\|$ 表示规范操作, λ 是控制过拟合的正则化参数。

利用核函数可以把(2)式的解表示为输入 \mathbf{x} 的线性组合,即

$$\mathbf{w} = \sum_j^n \alpha_j \varphi(\mathbf{x}_j), \quad (3)$$

式中 α 为线性系数, φ 为特征空间, j 为特征空间标签。线性系数 α ^[11-13]可以被表示为

$$\alpha = (\mathbf{K} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{K} 为核矩阵,并且元素 $K_{ij} = k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$;系数 α 的元素为 α_i ; \mathbf{y} 表示目标位置的先验,元素为 y_i 。 \mathbf{y} 表示为

$$\mathbf{y} = b \cdot \exp(-|\mathbf{D}/\delta|^\beta), \quad (5)$$

式中 b 为归一化常数, \mathbf{D} 为目标与周围像素间的欧式距离, δ 为先验尺度参数, β 为先验形状参数。

\mathbf{K} 具有循环矩阵特性,因此利用(1)式将 \mathbf{K} 对角化,然后对(4)式进行离散傅里叶变换,并代入对角化以后的 \mathbf{K} ,即可得到非线性分类器^[12]:

$$\mathcal{F}(\alpha) = \mathcal{F}(\mathbf{y}) / [\mathcal{F}(\mathbf{x}_1) \mathcal{F}(\mathbf{x}_1) + \lambda]. \quad (6)$$

2.1.3 快速检测

处理第 t 帧图像时,对分类器参数 α^t 和测试基样本 \mathbf{z}_1^t 分别进行更新:

$$\alpha^t = (1 - m_1) \alpha^{t-1} + m_1 \alpha_n^t, \quad (7)$$

$$\mathbf{z}_1^t = (1 - m_2) \mathbf{z}_1^{t-1} + m_2 (\mathbf{z}_n)_1^t, \quad (8)$$

式中 m_1 和 m_2 表示更新参数, α^{t-1} 表示根据(7)式计算的第 $(t-1)$ 帧图像的分类器参数, α_n^t 表示根据(4)式计算的第 t 帧图像的分类器参数, \mathbf{z}_1^{t-1} 表示根据(8)式计算的第 $(t-1)$ 帧图像的测试基样本, $(\mathbf{z}_n)_1^t$ 表示第 t 帧图像的测试基样本。对于第1帧图像, α^1 和 \mathbf{z}_1^1 都为0。

第 t 帧图像测试样本集 \mathbf{z}_j^t 的响应 f^t 可表示为

$$f^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_j^t k(\mathbf{x}_i^t, \mathbf{z}_j^t), \quad (9)$$

式中 \mathbf{x}_i^t 表示第 t 帧图像的训练样本集,其基样本为 \mathbf{x}_1^t 。 \mathbf{z}_j^t 表示第 t 帧图像的测试样本集,其基样本为 \mathbf{z}_1^t 。

对(9)式进行离散傅里叶变换,得到响应 f^t 在频域的表达形式:

$$f^t = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(\mathbf{x}_1^t) \mathcal{F}(\mathbf{z}_1^t) \mathcal{F}(\alpha^t)]. \quad (10)$$

2.2 偏移分析

KCF算法利用基样本灰度特征实现跟踪,但是红外弱小目标的灰度特征不足以区分出云层背景边

缘和红外弱小目标。由(6)式可知,分类器参数 α 只与 x_1 有关。红外弱小目标属于 x_1 中的高频成分,即映射到 α 中的高频成分,云层背景属于 x_1 中的低频成分,即映射到 α 中的低频成分。但是,在目标运动过程中,样本中存在大量具有高频特征云层边缘信息,这些云层边缘信息也会映射到 α 中的高频成分中,故样本中的云层边缘信息使 α 产生了累计误差,导致偏移积累,最终导致跟踪发生偏移。

因此,为获得理想跟踪效果,滤除基样本云层边缘的同时保留红外弱小目标,从而减弱云层背景杂波的影响,即以合适的滤波方法分离基样本中同属高频成分的云层背景边缘和红外弱小目标。

3 基于 GIF 的 KCF 跟踪算法

为分离同属高频成分的云层背景边缘和红外弱小目标,引入 GIF 对基样本进行处理,然后结合 KCF 算法实现红外弱小目标的跟踪。

3.1 GIF 算法

GIF 是一种局部线性可变的自适应滤波器^[13-16],具有保边去噪的特点。包括引导图像 I' , 输入图像 p' 和输出图像 q' 。其中,引导图像 I' 是需要事先设定的,也可以直接取为输入图像 p' 。输出图像 q' 中第 i' 个像素可表示为

$$q'_{i'} = \sum_{j'} W'_{i'j'}(I') p'_{j'}, \quad (11)$$

式中 i' 和 j' 为像素标签; $W'_{i'j'}$ 为核函数,表示为

$$W'_{i'j'}(I') = \frac{1}{|\omega^2|} \sum_{k'(i',j') \in \omega_{k'}} \left[1 + \frac{(I'_{i'} - \mu_{k'}) (I'_{j'} - \mu_{k'})}{\sigma_{k'}^2 + \epsilon} \right], \quad (12)$$

式中 $\omega_{k'}$ 为第 k' 个核函数窗口, $|\omega|$ 为窗口 $\omega_{k'}$ 内的像素个数, $\mu_{k'}$ 和 $\sigma_{k'}^2$ 分别为引导图像 I' 在窗口 $\omega_{k'}$ 中的

均值和方差, ϵ 为平滑因子。于是, GIF 可以抽象为

$$q' = G(p'), \quad (13)$$

式中 G 表示 GIF 函数。

GIF 简化了输入基样本与输出基样本之间的关系,将输出基样本定义为一个与引导图像有关的局部线性模型,并且使用引导图像来指导输入基样本的滤波过程。输入基样本可被看成是多个局部线性关系的总和,只要分别对每一个局部线性关系滤波,最终就能获得输入基样本的滤波结果。由于局部线性模型是线性的,因此 GIF 输出基样本在梯度上与输入基样本保持一致,从而达到保持边缘的目的。当 $\epsilon > 0$ 时, GIF 在像素灰度变化小的区域作加权均值滤波,去除了高频噪声。在像素灰度变化大的区域,图像平滑的效果弱,有助于保留边缘信息,故 GIF 具有保边去噪的特性。

引入 GIF 以后,根据(6)式, α 在频域的表达形式为

$$\mathcal{F}(\alpha) = \mathcal{F}(y) / [(\mathcal{F}(g_1))^2 + \lambda], \quad (14)$$

式中 g_1 为 x_1 与引导滤波结果的差值,具体为

$$g_1 = x_1 - G(x_1). \quad (15)$$

为进一步说明 GIF 保边去噪的特性,进行了仿真实验,取(12)式中的 ϵ 为 0.04,局部邻域半径为 2 pixel,基样本像素大小为 49 pixel \times 49 pixel。获得的 GIF 处理结果如图 1 所示。图 1(a)所示是以红外弱小目标形心位置为中心,截取的未经 GIF 处理的基样本,放大效果图如图 1(a)右下角所示,图 1(b)所示是经 GIF 处理后获得的基样本,图 1(c)所示是图 1(a)与图 1(b)作差后的残差图像。图 2(a)~(c)所示是图 1(a)~(c)对应的三维图像,其中椭圆圈出的是目标。

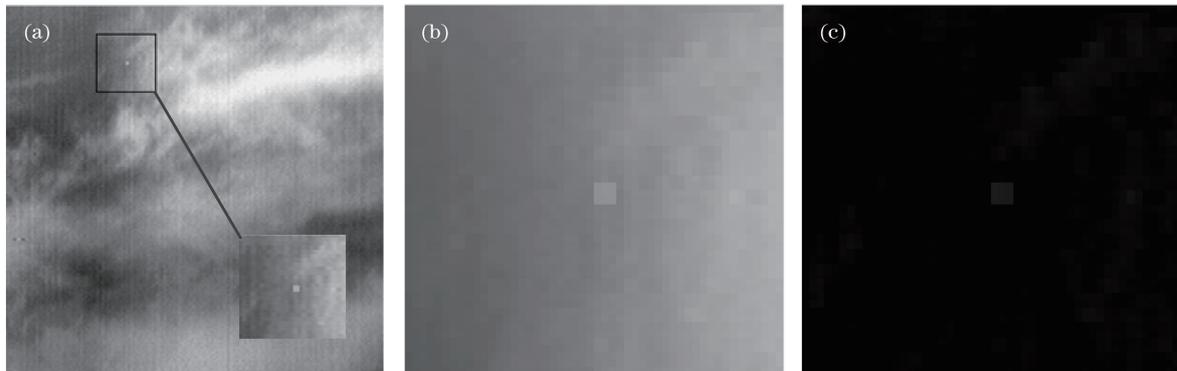


图 1 引导滤波处理示意图。(a)原图;(b)引导滤波处理结果;(c)残差图像

Fig. 1 Schematic of GIF processing. (a) Original image; (b) result by GIF processing; (c) residual image

由图 1 可见, GIF 对获得理想的基样本贡献较大。如图 1(a)、2(a)所示,未经处理的基样本中存

在云层背景高频边缘,云层背景高频边缘会使分类器参数产生累计误差,最终导致跟踪发生偏移。如

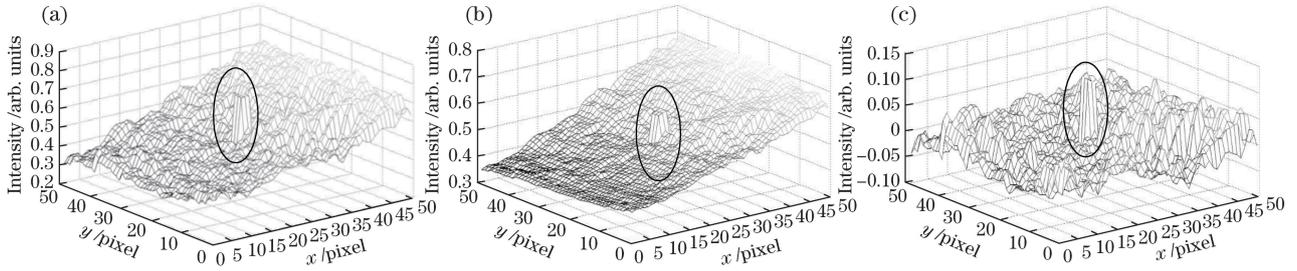


图 2 与图 1(a)~(c)对应的三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional views corresponding to Figs. 1(a)~(c)

图 1(b)、2(b)所示,经过 GIF 处理的基样本变得平滑,这是由于 GIF 具有保持边缘增强细节的特性。如图 1(c)、2(c)所示,残差图像中目标信噪比明显增大,将残差图像作为新的基样本训练分类器就可以得到较好的分类器参数,进而达到理想的跟踪效果。

3.2 GIF-KCF

为解决 KCF 算法跟踪红外弱小目标的偏移问题,采用上述 GIF 对基样本进行处理,并用基样本减去滤波后的结果进行 GIF-KCF 跟踪。基于 GIF 和 KCF 的红外弱小目标跟踪算法的具体步骤如下。

第一步,跟踪初始化。

a) 在第 1 帧中手动选取目标,目标图像块像素大小是 7 pixel×7 pixel,图像块中心代表目标位置,手动选取原则一般是使目标形心在图像块中心。

b) 初始化基样本大小,以及(2)式中的正则化参数 λ , (5)式中先验尺度参数 δ 和先验形状参数 β , (7)、(8)式中的更新参数 m_1 和 m_2 和(12)式中的平滑因子 ϵ 。

第二步,当处理第 $(t-1)$ 帧图像时,经 GIF 处理以后的基样本 \mathbf{x}_1^{t-1} 与训练基样本 \mathbf{g}_1^{t-1} 的关系为

$$\mathbf{g}_1^{t-1} = \mathbf{x}_1^{t-1} - G(\mathbf{x}_1^{t-1}), \quad (16)$$

根据(14)式计算红外弱小目标分类器参数 α_n^{t-1} 满足

$$\mathcal{F}(\alpha_n^{t-1}) = \mathcal{F}(\mathbf{y}) / \{[\mathcal{F}(\mathbf{g}_1^{t-1})]^2 + \lambda\}. \quad (17)$$

第三步,当处理第 t 帧图像时,所有输入测试样本集 \mathbf{z}^t 的响应 \mathbf{f}^t 为

$$\mathbf{f}^t = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(\mathbf{g}_1^t)\mathcal{F}(\mathbf{z}^t)\mathcal{F}(\alpha^t)], \quad (18)$$

式中 \mathbf{g}_1^t 是第 t 帧的训练基样本。并根据(7)、(8)式对 α^t 和 \mathbf{z}_1^t 进行更新。

第四步,使用 \mathbf{f}^t 获得目标第 t 帧图像中的位置信息。

第五步,重复步骤二,对下一帧进行处理。

4 实验结果及分析

为验证所提跟踪算法的有效性,采用 6 组帧频为 25 frame/s 的红外弱小目标图像序列来验证所提算法的性能。6 组实验图像序列指标统计见表 1。

表 1 实验图像序列指标统计

Table 1 Statistics of experimental image sequence candidates

Item	Bright colud	Thick cloud 1	Thick cloud 2	Plane 1	Plane 2	Plane 3
Image size /(pixel×pixel)	320×320	560×400	400×400	256×256	320×240	570×320
Sequence length /frame	300	340	300	120	500	375
Object size /(pixel×pixel)	3×3	3×3	3×3	2×2-6×6	3×3-7×7	3×3-7×7
Noise scale	Large	Very large	Very large	Very large	Large	Little
Speed /(pixel·frame ⁻¹)	0.5	1	1	0.4-0.8	0.4-0.8	0.4-0.8
Motion trail	Curve	Straight	Straight	-	-	-

实验中使用的红外相机工作波段为 8~14 μm , 分辨率为 625 pixel×480 pixel。图像序列 Bright cloud、Thick cloud 1 和 Thick cloud 2 是在真实红外复杂天空背景图像序列中按照仿真红外弱小目标图像序列的图像尺寸、总帧数、目标大小、目标信噪比、目标运动速度和目标运动轨迹生成的仿真红外

弱小目标图像序列^[17]。图像序列 Bright cloud 中目标沿曲线运动,且由简单背景区域运动至亮云背景区域,其他指标见表 1 第 2 列。图像序列 Thick cloud 1 和 Thick cloud 2 是厚云图像序列,云层背景复杂,目标沿直线运动,视觉上目标淹没在背景之中,其他指标见表 1 第 3 列和第 4 列。图像序列

Plane 1、Plane 2 和 Plane 3 是真实红外天空背景下飞机目标图像序列。飞机目标呈小目标特点,在图像中所占像素较少,并且在 Plane 1 和 Plane 2 图像序列中,天空背景也较复杂,目标运动轨迹近似为直线,运动速度在 0.5 pixel/frame 左右,统计指标见表 1 第 5 列和第 6 列。在 Plane 3 图像序列中,天空背景简单,目标信噪比较低,运动速度在 0.5 pixel/frame 左右,统计指标见表 1 第 7 列。

使用所提算法对红外弱小目标图像序列中弱小目标进行跟踪,分析跟踪性能,并与经典的 MPF^[7]、KCF^[9]、MS-PF^[4]、WCF^[8] 和 GIF-STC^[13] 的跟踪性能进行比较。

目标的初始位置由手动框出,跟踪框大小为

7 pixel×7 pixel,以使其能完全包含小目标,跟踪框中心就是目标的位置,样本大小设为跟踪框的 5~8 倍。参考 KCF 算法^[12], (2) 式中 λ 为 0.01, (5) 式中 σ 为 2.25, β 为 1, (7)、(8) 式中 m_1 和 m_2 均为 0.075。参考 GIF 算法^[16], (12) 式中 ϵ 为 0.04, 局部邻域半径为 2 pixel。

仿真结果如图 3 所示,在 Bright cloud 图像序列中,在第 30 帧和第 100 帧处,6 种算法都可以对弱小目标准确跟踪;在第 200 帧和 250 帧处,当目标运动到较亮云层背景时,目标从较简单云层背景运动到复杂云层背景,从而引入背景杂波,导致 MPF、KCF、MS-PF 和 WCF 算法跟踪结果出现虚警,只有 GIF-STC 和 GIF-KCF 能够有效跟踪。

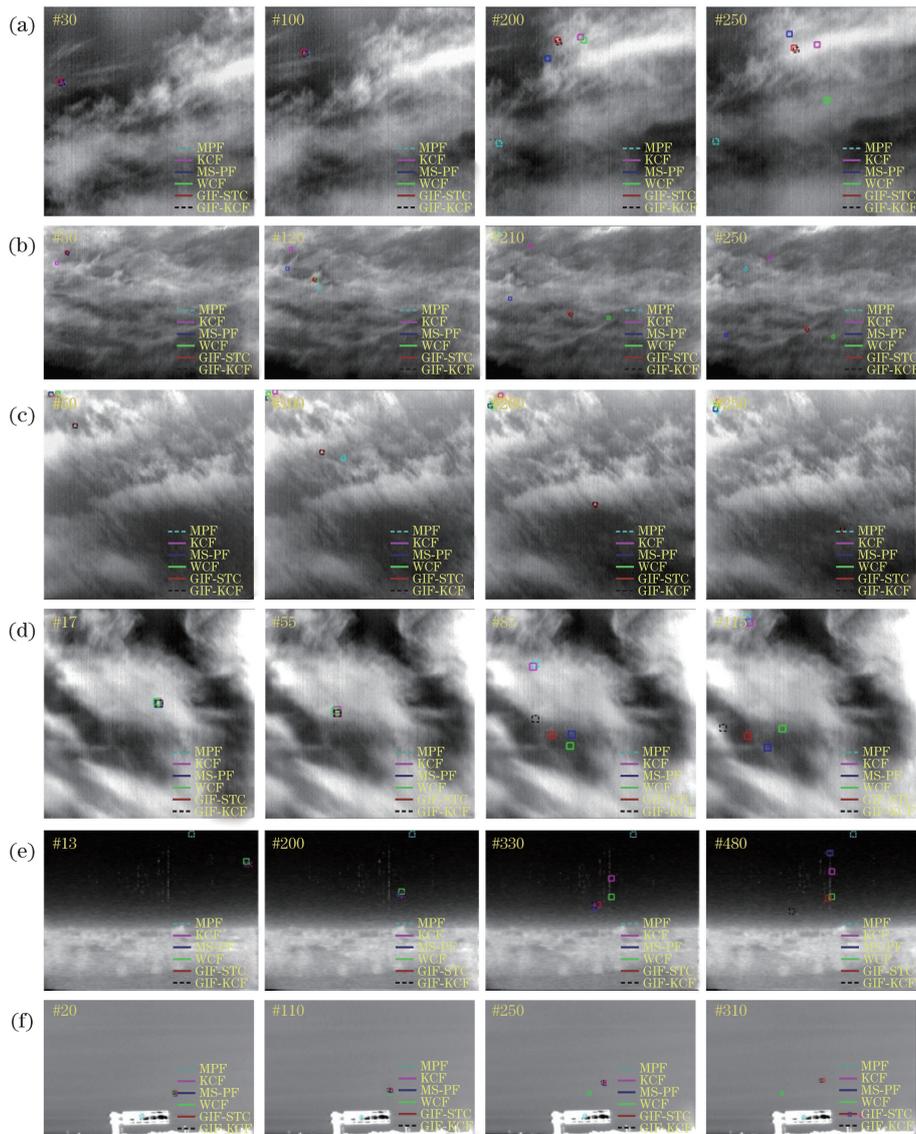


图 3 不同背景下的跟踪结果。(a) Bright cloud; (b) thick cloud 1; (c) thick cloud 2; (d) plane 1; (e) plane 2; (f) plane 3
 Fig. 3 Tracking results under different backgrounds. (a) Bright cloud; (b) thick cloud 1; (c) thick cloud 2; (d) plane 1; (e) plane 2; (f) plane 3

在 Thick cloud 1 图像序列中,云层背景复杂,并且小目标运动较快。在第 50 帧处,除了 KCF 其他 5 种算法都可以对目标准确跟踪,在第 120 帧、210 帧和 250 帧处,当目标运动到图像云层边缘变化明显区域时,MPF 将图像中其他高频点误认为目标,导致跟踪失败;目标淹没在复杂云层背景中,导致 KCF、MS-PF 和 WCF 算法失效,而 GIF-STC 和 GIF-KCF 能够克服复杂云层背景对目标进行有效跟踪。

在 Thick cloud 2 图像序列中,云层背景非常复杂,并且小目标运动也较快。在第 50 帧、100 帧、200 帧和 250 帧处,目标沿着图像左上角到右下角的对角线运动,由于图像左上角处背景云层复杂,杂波强烈,目标淹没在云层背景中,导致 MPF、KCF、MS-PF 和 WCF 无法对小目标进行有效跟踪。

在 Plane 1 图像序列中,在第 17 帧处,目标在均匀灰度背景中,6 种算法都有效,在第 55 帧、第 85 帧和 115 帧处,当目标在图像上的像素坐标为(72, 127)时,云层背景灰度变化剧烈,目标淹没在背景中,导致 MPF、KCF、MS-PF 和 WCF 算法相继失效。在 Plane 1 图像序列中的第 63 和 64 帧之间,目标运动很快,上下文区域内引入较多背景杂波,导致跟踪发生偏移。

在 Plane 2 图像序列中,由于真实图像的晃动,MPF 算法失效。在第 330 帧处,当目标在图像上的像素坐标为(186, 96)时,图像背景上存在固定噪

声,导致 KCF、WCF 跟踪失败。当目标由较暗云层背景运动进较亮云层背景时,MS-PF 跟踪失败。GIF-STC 克服了图像上的固定噪声,但当目标继续运动到第 450 帧时,目标运动较快,上下文区域内引入较多背景杂波,导致后续跟踪全部发生偏移,但是 GIF-KCF 跟踪效果较好。

在 Plane 3 图像序列中,天空背景较简单,图像中包含了一部分复杂地面目标,MPF 将地面目标中某个高频点作为目标,出现虚警。在第 20 帧和第 110 帧处,其他 5 种算法都能够对目标实现有效跟踪,在第 250 帧和第 310 帧处,目标信噪比较低,导致 WCF、KCF 和 MS-PF 相继失效。GIF-STC 和 GIF-KCF 能对目标实现有效跟踪,算法适应性较好。

为进一步定量分析算法的跟踪性能,参考文献[13]评价标准,即从中心误差 ϵ_{CL} 、成功率 R_S 、平均成功率 \bar{R}_S 和平均帧频 \bar{f}_{frame} 角度对 6 种算法的性能进行比较分析。 ϵ_{CL} 为获取坐标与真实坐标的欧式距离 r ; R_S 定义为 N_{real_num}/N_{num} , N_{num} 为序列总帧数, N_{real_num} 为 $r < 6$ 的帧数; \bar{R}_S 为同一种算法对 6 组图像序列 R_S 的平均值; \bar{f}_{frame} 为同一种算法对 6 组图像序列每秒处理帧数的平均值。 ϵ_{CL} 、 R_S 和 \bar{R}_S 表征算法的精确度,而 \bar{f}_{frame} 表征算法的实时性。使用 6 种不同算法对 6 组不同红外弱小目标图像序列进行跟踪实验,统计 R_S 、 \bar{R}_S 、 \bar{f}_{frame} 和 ϵ_{CL} , 实验结果分别如表 2 和图 4 所示。

表 2 跟踪算法的性能比较

Table 2 Performance comparison of tracking algorithms

Item	MPF	KCF	MS-PF	WCF	GIF-STC	GIF-KCF
R_S for bright cloud	0.16	0.62	0.59	0.63	1	1
R_S for thick cloud 1	0.15	0.13	0.24	0.53	1	1
R_S for thick cloud 2	0.25	0.01	0	0.01	1	1
R_S for plane 1	0.21	0.52	0.53	0.60	0.53	1
R_S for plane 2	0	0.53	0.83	0.52	0.85	0.99
R_S for plane 3	0	0.54	0.63	0.53	1	1
\bar{R}_S	0.13	0.39	0.47	0.47	0.90	0.99
$\bar{f}_{frame} / (\text{frame} \cdot \text{s}^{-1})$	6	72	25	33	52	71

从表 2 可知,MPF 算法的跟踪平均正确率最小,在 13%左右,这是由于 MPF 对每一帧图像全局进行检测,而天空背景图像序列中的云层边缘等高频部分经常被误认为目标,产生虚警,且当相机剧烈晃动导致目标图像序列剧烈晃动时,MPF 无法检测到目标。KCF 在背景较简单时一般有效,但是当云

层背景复杂时,分类器容易受云层边缘影响,导致跟踪失败。MS-PF 在背景较简单时一般有效,但是在目标淹没在云层杂波背景中以后,算法无法获得灰度统计特性,导致跟踪失误。当目标运动较快且超出搜索范围时,WCF 出现虚警。GIF-STC 对上下文区域进行了 GIF 处理,故能够较好适应复杂云层

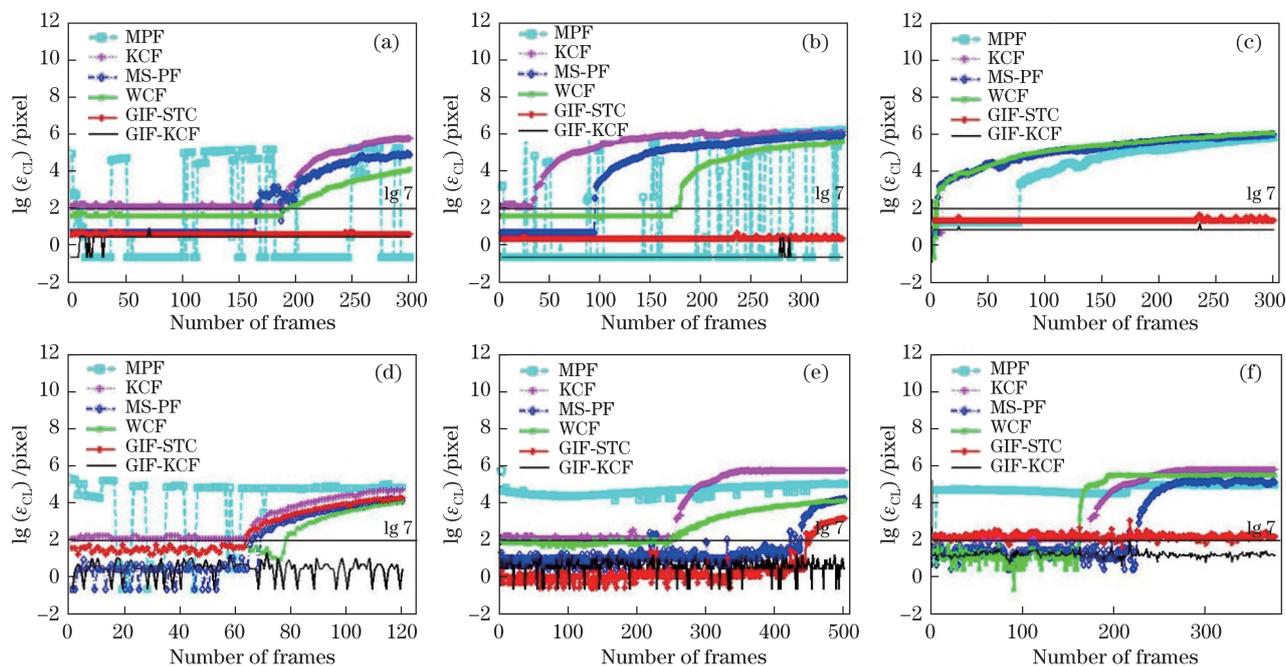


图 4 不同背景下的中心误差。(a) Bright cloud; (b) thick cloud 1; (c) thick cloud 2;
(d) plane 1; (e) plane 2; (f) plane 3

Fig. 4 Center location errors under different backgrounds. (a) Bright cloud; (b) thick cloud 1;
(c) thick cloud 2; (d) plane 1; (e) plane 2; (f) plane 3

背景下的弱小目标跟踪,但是当目标发生快速移动,上下文区域内引入较多背景杂波时,跟踪也会失效。GIF-KCF 算法跟踪平均正确率最大,这是因为使用 GIF 对基样本进行了处理,弱化了云层边缘杂波的影响。GIF-KCF 平均帧频仅次于 KCF,这是因为其在频域处理基样本,实时性较好。并且减小搜索范围以后,所提算法的实时性可以更好。

在图 4 中,6 个子图的纵坐标表示中心误差 ϵ_{CL} 的对数值,横坐标表示帧数,其中黑色直线是 $\epsilon_{CL}=7$ 的参考线。在初始几十帧时,6 种算法一般都能够有效跟踪目标,这是因为云层边缘特征简单。但是当云层边缘变化明显时,目标信噪比降低,KCF、MPF、MS-PF 和 WCF 容易将云层边缘误认为目标,产生虚警。而 GIF-STC 和 GIF-KCF 算法对目标局部区域进行了 GIF 处理,故跟踪效果较好,但是 GIF-STC 不适用于发生机动的红外弱小目标,而 GIF-KCF 适应性更好。

综上所述,在主观视觉和客观评价指标方面,所提算法效果较好,所提算法能够较好地实现红外弱小目标的跟踪。

5 结 论

针对红外复杂天空背景中红外弱小目标跟踪的偏移问题,提出了一种基于引导滤波和核相关滤波

的跟踪算法,该算法首先利用具有保边去噪特性的图像引导滤波来处理基样本,从而获得较为准确的分类器参数,最后利用小目标的响应图来估计出目标位置。实验结果表明,该算法具有较高的准确率和较好的实时性。

参 考 文 献

- [1] Jia G M, Wang X J, Zhang S H. Target tracking algorithm based on adaptive template update in complex background[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 659-663.
贾桂敏, 王向军, 张世海. 复杂背景下基于自适应模板更新的目标跟踪算法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 659-663.
- [2] Ye Y S, Liu S F, Sun Q, *et al.* Application of improved particle filter algorithm in deep space infrared small target tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(8): 1503-1512.
叶有时, 刘淑芬, 孙强, 等. 改进粒子滤波算法在深空红外小目标跟踪中的应用[J]. 电子学报, 2015, 43(8): 1503-1512.
- [3] Wang L L, Xin Y H. A small IR target detection and tracking algorithm based on morphological and genetic particle filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(7): 849-856.
王玲玲, 辛云宏. 基于形态学与遗传粒子滤波器的红

- 外小目标检测与跟踪算法[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 849-856.
- [4] Wei K, Zhao Y Q, Pan Q, *et al.* IR target tracking based on mean shift and particle filter[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2008, 19(2): 213-217.
魏坤, 赵永强, 潘泉, 等. 基于均值漂移和粒子滤波的红外目标跟踪[J]. 光电子·激光, 2008, 19(2): 213-217.
- [5] Zhang Y F, Tian Y, Yang F, *et al.* Infrared dim target tracking based on improved mean-shift[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2164-2169.
张一帆, 田雁, 杨帆, 等. 基于改进 Mean-Shift 算法的红外小目标跟踪[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2164-2169.
- [6] Zhao X M, Yuan S F, Ma X L, *et al.* Research on infrared small target detection technique based on moving pipeline filtering[J]. Infrared Technology, 2009, 31(5): 295-297.
赵小明, 袁胜春, 马晓丽, 等. 基于移动式管道滤波的红外小目标检测方法研究[J]. 红外技术, 2009, 31(5): 295-297.
- [7] Dong W K, Zhang J Q, Liu D L, *et al.* Pipeline filter algorithm based on movement direction estimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(4): 471-474.
董维科, 张建奇, 刘德连, 等. 基于运动方向估计的管道滤波算法[J]. 光子学报, 2013, 42(4): 471-474.
- [8] He Y J, Li M, Zhang J L, *et al.* Infrared target tracking via weighted correlation filter[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 103-114.
- [9] Yang D D, Cai Y Z, Mao N, *et al.* Long-term object tracking based on kernelized correlation filters[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 2037-2047.
杨德东, 蔡玉柱, 毛宁, 等. 采用核相关滤波器的长期目标跟踪[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2037-2047.
- [10] Shen Q, Yan X L, Liu L F, *et al.* Multi-scale correlation filtering tracker based on adaptive feature selection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515001.
沈秋, 严小乐, 刘霖枫, 等. 基于自适应特征选择的多尺度相关滤波跟踪[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515001.
- [11] Yang R, Zhen Z W. Extended kernelised correlation filter tracking[J]. Electronics Letters, 2016, 52(10): 823-825.
- [12] 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.
- [13] Qian K, Zhou H X, Qin H L, *et al.* Infrared dim-small target tracking based on guide filter and spatio-temporal context learning[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 091003.
钱琨, 周慧鑫, 秦翰林, 等. 基于引导滤波与时空上下文的红外弱小目标跟踪[J]. 光子学报, 2015, 44(9): 091003.
- [14] Li Z G, Zheng J H, Zhu Z J, *et al.* Weighted guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 120-129.
- [15] Zhao F, Zhao J, Zhao W D, *et al.* Guide filter-based gradient vector flow module for infrared image segmentation[J]. Applied Optics, 2015, 54(33): 9809-9817.
- [16] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [17] He Y J, Li M, Zhang J L, *et al.* Infrared small target detection method based on correlation filter[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0512001.
何玉杰, 李敏, 张金利, 等. 基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0512001.