

doi:10.3788/gzxb20154409.0910003

基于引导滤波与时空上下文的红外弱小目标跟踪

钱琨¹,周慧鑫¹,秦翰林¹,殷世民²,荣生辉¹,赵东¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院,西安 710071)

(2 桂林电子科技大学 生命与环境科学学院,广西 桂林 541004)

摘要:由于传统的跟踪算法没有充分利用目标与其局部背景的时空相关性,使其不能有效地区分背景边缘和红外弱小目标,从而在跟踪过程中产生偏移现象.针对这一问题,本文在时空上下文学习跟踪的原理基础上,分析了跟踪偏移的原因,并引入图像引导滤波方法,提出了一种引导滤波结合时空上下文的红外弱小目标跟踪算法.该算法首先采用引导滤波对上下文区域进行处理,在保留上下文区域云层边缘的同时剔除目标及噪声,再将其与滤波结果作差.最后利用小目标的“置信图”检测出目标.为了验证该方法的有效性,采用五组红外小目标序列图像进行实验,并与经典时空滤波、改进的模板匹配和移动管道滤波等方法作比较.实验结果表明本文提出的方法在主观视觉和客观评价指标方面均优于其它三种经典方法,且具有更高的目标跟踪精度与较好的实时性.

关键词:红外与夜视技术;目标跟踪;时空上下文;红外图像处理;弱小目标;图像滤波;贝叶斯分类;傅里叶变换

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)09-0910003-6

Infrared Dim-Small Target Tracking Based on Guide Filter and Spatio-Temporal Context Learning

QIAN Kun¹, ZHOU Hui-xin¹, QIN Han-lin¹, YIN Shi-min², RONG Sheng-hui¹, ZHAO Dong¹

(1 School of Technical Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

(2 School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology,

Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Because traditional target tracking algorithm don't take full advantages of spatio-temporal relationships between the target and its local background, small target and edges can not be distinguished effectively, thereby the excursion problem occurs. Based on the Spatio-Temporal Context (STC) learning tracking algorithm, excursion problem was analyzed, and a new IR dim target tracking based on Guided Image Filter and STC is proposed. Guided Filter is adopted to preserve edges and eliminate the noise of context areas, and ideal context prior can be calculated after subtracting the filtering result from original image. Then, an ideal confidence map makes an accurate estimation of target. Several group of experimental results demonstrate that the presented method can track the target effectively, compared with several classical methods, such as improved template matching tracking, temporal-spatial fusion filtering algorithm and moving pipeline filtering algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm performs well in terms of efficiency and accuracy.

Key words: Infrared and night vision technology; Target tracking; Spatio-Temporal context; Infrared image processing; Dim and small target; Image filtering; Bayesian classification; FFT

OCIS Codes: 100.4999; 110.3080; 260.3060; 260.3090

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61401343, 61265006)、陕西省自然科学基金(No. 2011JQ8012)、国家高技术研究发展计划(No. 2014AA8098089C)、航空基金(No. 20120181005)和中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. DZD140202, JDYB140105, WRYB142312)资助

第一作者:钱琨(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为目标检测与跟踪技术. Email: kqian@stu.xidian.edu.cn

导师(通讯作者):周慧鑫(1975-),男,教授,博导,主要研究方向为光电成像与图像处理等. Email: hxzhou@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2015-04-07; **录用日期:**2015-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

红外成像目标探测技术因实时性好、隐蔽性强以及抗干扰能力强等特点,被广泛应用于精确制导、探测告警等武器装备系统中.实际应用中,要求探测系统应尽可能发现远距离目标.但此时目标在视场中是以小目标形态出现的,且复杂背景下目标与背景的对比度低,在图像上表现为淹没在复杂背景中的几个像素点.随着目标机动性能的不不断提高,对于跟踪算法的鲁棒性、实时性也提出了更高的要求^[1-12].

近年来,红外小目标的跟踪算法可以分为两类:一类是基于滤波与数据融合的算法.其首先建立一个精确的运动模型,再用适当的滤波方法来提取目标,如管道滤波^[2]、时空滤波^[3](Temporal-Spatial Fusion Filtering, TSFF)、粒子滤波^[4-5]等.管道滤波在低信噪比情况下往往会出现多帧检测不到目标.经典的时空滤波只利用了相邻几帧信息,且由于动态背景的不准确估计,导致频繁的跟踪偏移.粒子滤波在动态系统存有噪声时,粒子快速退化为单一值,从而影响跟踪性能.另一类是基于目标建模与匹配的算法.该类算法通常先建立目标特征的模型,再通过一定的准则来匹配以提取目标,如模板匹配算法^[6-7](Template Matching Tracking, TMT)、光流法^[8-9]、均值漂移法^[10-11]等.模板匹配算法易产生误差累计,很难保证对目标的准确提取.光流法实时性差,且易受光照影响.均值漂移方法无法准确获取目标区域的稳定灰度统计,这成为小目标跟踪的一个瓶颈^[12].而且,上述两类方法只利用了目标的特征或运动信息,却没有考虑目标与其局部背景的空间关系,当目标受背景杂波影响时,跟踪易丢失.

基于时空上下文(Spatio-Temporal Context, STC)^[13]学习的跟踪算法是目前视觉跟踪领域的一个前沿方向,但该算法在红外小目标的跟踪上效果不够理想.本文针对空中红外小目标跟踪问题,提出了基于引导滤波^[14](Guided Image Filter, GIF)的STC的小目标跟踪方法.实验表明,该方法在红外小目标跟踪上具有较高的可行性.

1 时空上下文跟踪算法分析

1.1 STC跟踪算法

STC算法^[13]的核心是通过计算目标似然函数的“置信图”来实现目标跟踪.目标似然函数定义描述为 $c(x) = p(x|o) = \sum_{v(z) \in X^c} P(x|v(z), o) P(v(z)|o)$ (1) 式中, X^c 为上下文特征集, $v(z)$ 是上下文像素的灰度.

1.1.1 上下文先验模型

上下文先验概率可表示为

$$P(v(z)|o) = I(z)\omega_r(z-x^*) \quad (2)$$

式中, ω_r 是一个高斯权重函数,其表达式为

$$\omega_r(d) = \alpha \cdot \exp(-d^2/\sigma^2) \quad (3)$$

式中, α 是归一化常数, σ 表示权重函数的分布幅度,合适的 σ 可使式(3)有效地表征了人眼的视觉系统,即人眼总是更加注意离目标越近的区域.

1.1.2 空间上下文模型

式(1)中条件概率 $P(x|v(z), o)$ 可表示为

$$P(x|v(z), o) = h^{sc}(x-z) \quad (4)$$

式(4)描述的是目标 x 与其局部上下文位置 z 的距离和方向的空间关系.

1.1.3 置信图

若已知当前帧的目标,其“置信图”可表示为

$$c(x) = b \cdot \exp(-|(x-x^*)/\alpha|^\beta) \quad (5)$$

式中, b 为归一化常数, α, β 分别表示尺度参数和形状参数.对于当前帧,其式(5)所表示的“置信图”和式(2)所表示的上下文先验模型已知,主要任务就是学习当前帧的空间上下文模型(即式(4)).结合式(1)、(2)、(4)、(5)可得

$$F(h^{sc}(x)) = F(c(x))/F(I(x)\omega_r(x-x^*)) \quad (6)$$

式中, F 表示傅里叶变换.

1.1.4 算法实现

当得到了第 t 帧的 $h_t^{sc}(x)$,跟踪任务就转化为检测问题,即

$$x_{t+1}^* = \arg \max_{x \in \Omega(x^*)} c_{t+1}(x) \quad (7)$$

式中, $c_{t+1}(x)$ 的表达式为

$$c_{t+1}(x) = F^{-1}(F(H_{t+1}^{sc}(x)) \cdot F(I_{t+1}(x)\omega_r(x-x^*))) \quad (8)$$

式中, $H_{t+1}^{sc}(x)$ 通过式(9)来更新.

$$H_{t+1}^{sc}(x) = (1-\rho)H_t^{sc}(x) + \rho h_t^{sc} \quad (9)$$

式中, ρ 表示学习因子,详细的描述参考文献[13].

1.2 “偏移”分析

STC算法是利用图像灰度特征来实现跟踪^[13],但红外弱小目标信噪比低、尺寸小,在运动的过程中易于淹没云层中,即这一特征不足以区分目标与背景.由式(6)知当前帧目标的空间上下文模型仅仅与目标的上下文先验有关,目标属于上下文区域的高频成分,则目标信息映射到空间上下文模型的高频部分.同样,上下文区域的背景信息映射到空间上下文模型的低频部分.但目标在运动过程中,上下文区域存在大量具有高频性质的云层边缘,这些信息最终也映射到空间上下文模型的高频部分.由此,目标的上下文区域中的云层边缘使得其空间上下文模型不够理想,最终导致跟踪偏移.

在STC跟踪过程中,仅由前后两帧图像的灰度信息来估计目标位置.当跟踪开始偏移,更多的背景杂波进入上下文区域,导致偏移累积.即使没有发生偏移,

云层边缘也会对目标的定位形成干扰.因此,获得理想的上下文先验模型是STC小目标跟踪的关键.

要获得理想目标先验,可在滤除上下文区域的云层边缘的同时保留小目标,从而减弱背景杂波对提取空间上下文模型的不利影响.现在最主要的问题是选择一种合适的滤波方法来分离上下文区域中同属高频的云层边缘与小目标.

2 基于引导滤波的STC跟踪算法

基于上述分析,为减弱上下文区域的云层边缘的影响,本文引入引导滤波^[14](Guided Image Filter, GIF)对上下文先验进行处理,而后结合STC算法实现红外弱小目标的跟踪.

2.1 引导滤波

GIF滤波是一种局部线性可变的自适应滤波器^[13],具有保边去噪的特点.给定目标上下文区域 p 的引导滤波结果 q 可表示为

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I') p_j \quad (10)$$

式中, i 和 j 为像素标签, W_{ij} 为核函数,定义为

$$W_{ij}(I') = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k(i,j) \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I'_i - \mu_k)(I'_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \epsilon} \right) \quad (11)$$

式中, μ_k 和 σ_k^2 为引导系数 I' 在局部邻域 ω_k 中的均值和方差, $|\omega|$ 为 ω_k 中的像素个数, ϵ 为正归化参数.

于是,GIF可以抽象为

$$q = G(p) \quad (12)$$

式中, G 为GIF函数.

引入GIF,新的上下文先验可表示为

$$P(v(z)|o) = (I(z) - G(I(z))) \omega_c(z - x^*) \quad (13)$$

由此,可求得较为理想的空间上下文模型.

为进一步说明GIF对上下文先验的影响,进行了仿真实验,实验中将上下文区域作为引导系数,即 $I' = p$,正归化参数设为0.04,局部窗口半径为2.获得的上下文先验结果如图1,其中图1(a)是未经GIF处理的上下文先验,图1(b)是经过GIF处理后获得的上下文先验.

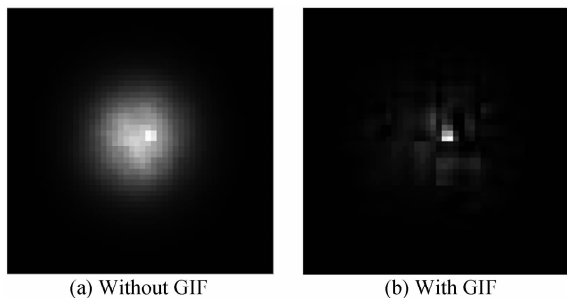


图1 上下文先验图

Fig. 1 Result of context prior

由图1可见,GIF对获得理想的上下文先验贡献较大.未经GIF处理情况下,先验模型中存在高频边

缘,不理想的空间上下文模型将导致跟踪偏移.相反,经过GIF处理后获得的先验模型较为理想,这是因为GIF具有良好的边缘保持和细节增强性能,由此可得到较理想的小目标时空上下文模型.

2.2 GIF-STC

为解决STC算法跟踪小目标的偏移问题,本文采用上述GIF对先验模型进行处理,并用原图减去滤波后的成分进行GIF-STC跟踪.基于GIF的STC小目标跟踪算法的具体步骤为

1)初始化选取目标(手工选取或检测算法给定),设定上下文区域,计算出空间上下文模型;

a. 初始化目标位置,设定上下文区域;

b. 对第 t 帧目标上下文区域 $p_t(x)$ 进行GIF滤波,并用原图减去滤波结果;

$$g_t(x) = p_t(x) - G(p_t(x)) \quad (14)$$

c. 由 $g_t(x)$ 根据式(13)求得目标先验,由式(6)计算出第 t 帧的空间上下文 $h_t^{SC}(x)$;

2)当下一帧来到时,得到目标的新置信图为

$$c_{t+1}(x) = F^{-1}(F(H_{t+1}^{SC}(x)) \cdot F(g_{t+1}(x) \omega_c(x - x^*))) \quad (15)$$

式中, $H_{t+1}^{SC}(x)$ 为更新的时空上下文;

$$H_{t+1}^{SC} = (1 - \rho) H_t^{SC} + \rho h_t^{SC} \quad (16)$$

3)利用新“置信图”估计并更新目标位置;

4)跳转到2)处进行下一帧的处理

3 仿真结果及分析

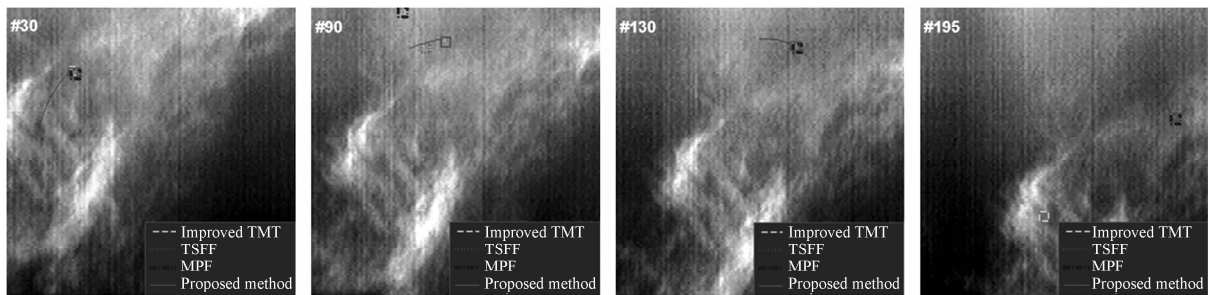
目前非制冷IRFRA器件的分辨率主要包括 640×480 和 320×240 像素^[15].实验中采用五组帧频为25帧/秒的红外图像序列来验证所提算法的性能.其中,图像序列(1)~(4)是将 640×480 像素相机拍摄的图像序列分别截取了中部 256×256 , 200×200 像素大小所构成的图像序列.如图2(a)和2(b)所示,序列(1)和(2)是两组少云和厚云背景下添加仿真运动目标获得的,每组序列为200帧,图像大小为 256×256 像素,目标大小为 2×2 像素,目标运动速度约为3像素/帧,轨迹为以图像中心为圆心的圆弧.如图2(c)和2(d)所示,序列(3)和(4)是两组复杂云层背景下的飞机目标图,每组序列为100帧,图像大小为 200×200 像素,由于光学扩散的影响,目标大小约为 $2 \times 2 \sim 6 \times 6$ 像素.序列(3)的云层边缘与天空背景的灰度对比度较大,且目标的初始位置在云层中,其信噪比低于1.5.序列(4)的目标一直在云层中运动.序列(5)是由一台 720×576 中波IRFPA相机拍摄的50帧图像组成,截取中部 400×450 像素区域进行实验,目标速度约为8帧/秒.仿真软件平台是Matlab2013a,硬件平台是Intel-Core_2.8GHz CPU,4G内存和独立显卡的PC机.并将其与经典的时空滤波算法^[3](TSFF)、改进的模板匹配算

法^[6] (Improved TMT) 和移动管道滤波算法^[16] (Moving Pipeline Filtering, MPF) 的检测性能进行比较。

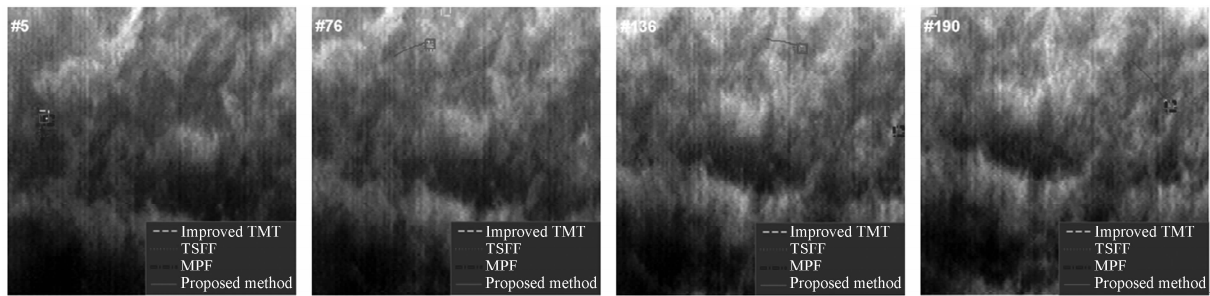
本文选用的跟踪框不小于 8×8 像素, 以使其能完全包含小目标. 为防止引入过多背景, 上下文区域不宜过大, 设为跟踪框的 $5 \sim 10$ 倍. 参考 STC 算法^[13], 式(3)中 $\sigma = (Sh + Sw) / 2$ (Sh, Sw 分别为跟踪框的高和宽), 式(5)中 $\alpha = 2.25, \beta = 1$, 式(16)中 $\rho = 0.075$. 参考 GIF 算法^[14], 正则化参数 $\epsilon = 0.2^2$, 局部邻域的半径为 2.

一组仿真结果如图 2 所示. 经典的时空域滤波算法由于动态背景估计的不准确, 从而导致频繁的错误

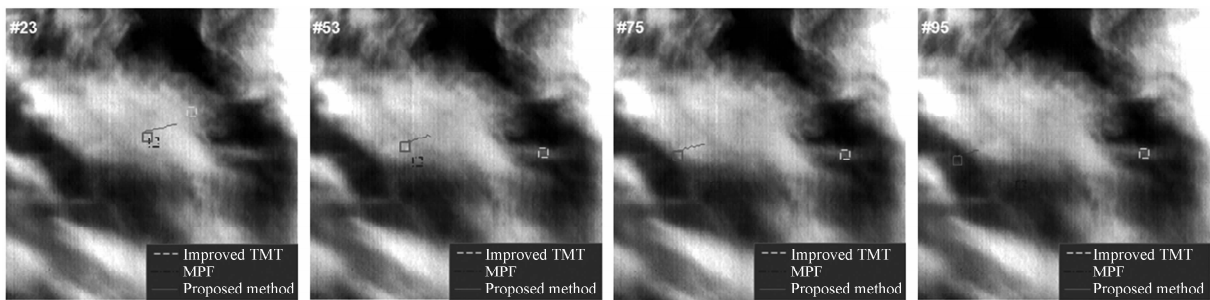
检测, 如图 2(a) 和 2(e) 所示. 改进的模板匹配算法在适应环境的能力较弱, 在匹配的过程中易产生偏移, 最终跟踪失败且不可恢复. 在背景变化不大时, 跟踪效果较好, 如图 2(d) 和 2(e) 所示. 移动管道滤波算法受云层边缘影响较大, 缓慢移动的云边缘像素点较易形成管道, 从而作为目标被检测出, 如图 2(c) 所示. 而本文算法在五组红外序列的目标跟踪上均表现出较优的效果, 这是因为算法不仅考虑了目标的时空域信息, 且尽可能地消除了背景杂波的干扰. 序列(3)中的小目标的初始位置淹没在云层中, 序列(4)中的目标始终在云层中运动, 而所提算法依然表现良好, 由此可知本文提出的方法的抗云层干扰性强.



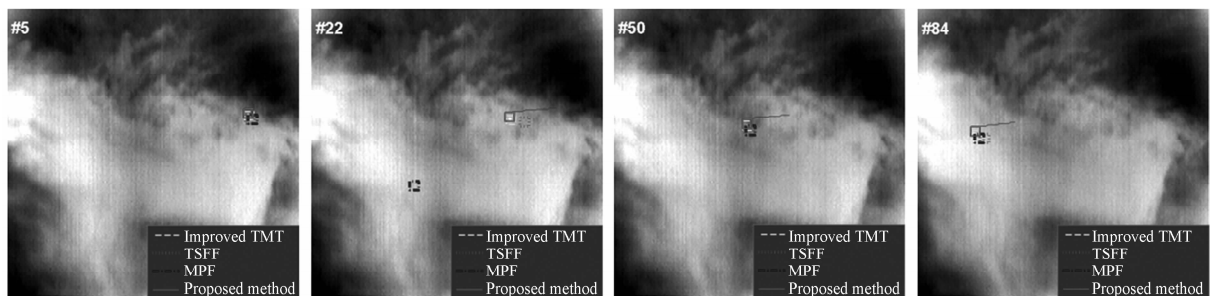
(a) Seq1-Tracking results on little cloud background



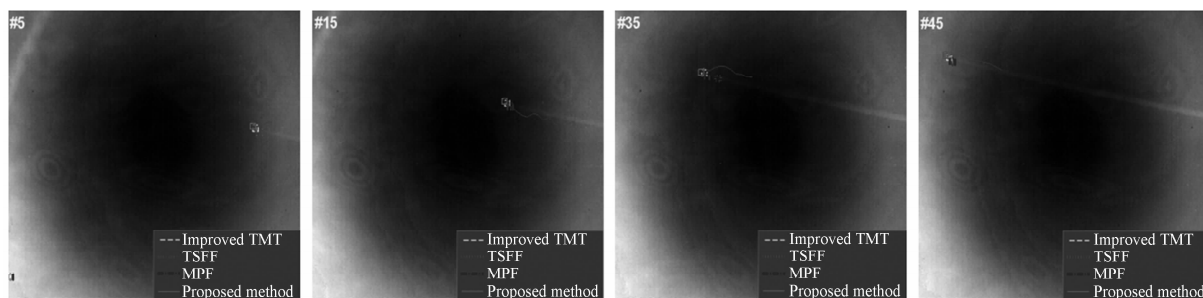
(b) Seq2-Tracking results on thick cloud background



(c) Seq3-Tracking results with plane1



(d) Seq4-Tracking results with plane2



(c) Seq5-Tracking results without cloud

图2 各种背景下的跟踪结果

Fig. 2 Screenshots of some sample tracking results on different backgrounds

为了进一步定量分析跟踪性能,采用类似于文献[13]的评价标准,即采用中心误差、成功率和FPS来对三种算法的性能进行定量的比较分析.中心误差(Center Location Error, CLE)表示估计坐标与真实坐标的欧式距离 d .成功率(Success Rate, SR)定义为 n/m ,其中, m 表示序列总帧数, n 是 $d < 5$ 的帧数. CLE 与

SR 表征算法的精确度,而 FPS(Frame Per Second) 表征算法的实时性.一组实验结果如图 3 和表 1 所示,图 3 显示的是序列(2)和(3)的目标跟踪的 CLE,时空滤波在序列(3)中目标跟踪上误差较大,因此不予考虑.表 1 是各个算法的性能比较.

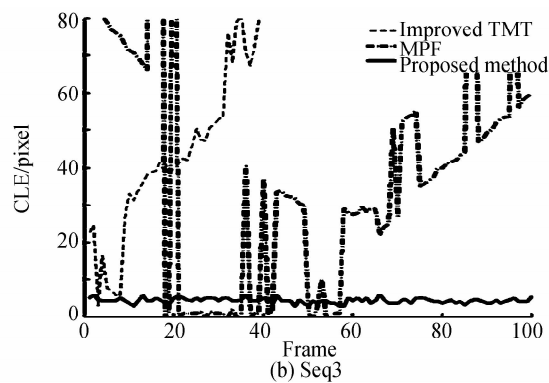
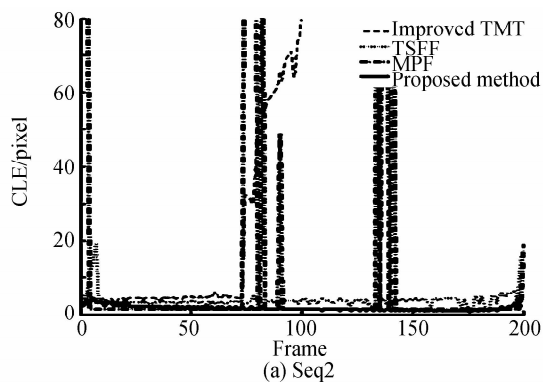


图3 中心误差

Fig. 3 Center Location Error

由图 3(a)可以看出,云层边缘不明显时,初始几十帧,四种算法都能准确的估计出目标.模板匹配由于模板更新不理想,累计误差导致跟踪失败.而当云层边缘

较明显时,时空滤波与管道滤波易误将缓慢运动的云边缘作为目标,增加了虚警率,如图 3(b)所示.

表 1 跟踪算法性能比较

Table 1 Performance comparison of tracking algorithms

Sequence	SR				FPS			
	TMT	TSFF	MPF	GIF-STC	TMT	TSFF	MPF	GIF-STC
Seq1	16	66	91	99	23	7	4.1	56
Seq2	36	89	90	100	22	7	4.3	59
Seq3	5	—	29	93	26	—	5.9	55
Seq4	73	80	94	100	24	7.2	6.4	60
Seq5	60	34	76	100	15	3	2.5	35
Average	38	67	74	98.4	22	6	4.6	53

由表 1 可知,虽然移动管道滤波算法的 SR 指标较好,但其处理速度较慢.而本文算法中对每帧图像只进行 3 次 FFT 和 2 次 GIF 处理,在 Matlab2013a 软件仿真平台时,处理速度可以达到 60 帧/秒(设上下文区域大小为 $M \times N$,则算法的复杂度为 $O(M \times N \times \log(M \times N))$),且算法的 SR 可达到 1.

综上所述,在主观视觉和客观评价指标方面本文算法的效果都更好,验证了本文算法能够更好地实现红外弱小目标的探测.实际应用时,可采用灵活的 FPGA+DSP 架构分别处理 GIF 滤波和 FFT 变换,以提高算法的执行效率.

4 结论

红外探测系统的检测性能常受到复杂背景的影响. 本文提出了引导滤波结合时空上下文学习的红外小目标跟踪算法, 利用 GIF 的保边去噪的特性可以获得理想的时空上下文模型. 该时空上下文模型不仅提取了目标的空间信息, 而且同时考虑了目标在时间维度上的信息, 进一步抑制了噪声的影响. 实验结果表明, 该弱小目标跟踪算法具有较高的准确度和较好的实时性, 这为后续的目标识别和尽早准确打击不利目标奠定了良好的基础, 后续将进一步优化算法, 使其移植于硬件上, 最终实现工程化.

参考文献

- [1] LI Zheng-zhou, DAI Zhen, FU Hong-xia, *et al.* Dim moving target detection algorithm based on spatio-temporal classification sparse representation[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **67**: 273-282.
- [2] DONG Wei-ke, ZHANG Jian-qi, LIU De-lian, *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.
- [3] WANG Wei-hua, NIU Zhao-dong, CHEN Zeng-ping. Temporal spatial fusion filtering algorithm for small infrared moving target detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(6): 714-718.
王卫华, 牛照东, 陈曾平. 基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(6): 714-718.
- [4] LI Cui-yun, JI Hong-bing. IR dim target tracking and detection based on new genetic particle filter[J]. *Journal of Xidian University*. 2009, **36**(4): 619-623.
李翠芸, 姬红兵. 新遗传粒子滤波的红外弱小目标跟踪与检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, **36**(4): 619-623.
- [5] WANG Ling-ling, XIN Yun-hong. 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.
- [6] LIU Rui-ming, LU Yan-hong, GONG Cheng-long, *et al.* Infrared point target detection with improved template matching[J]. *Infrared Physics and Technology*. 2012, **55**(4): 380-387.
- [7] SONG Hai-feng, CHEN Xing-wu, WANG Lei, *et al.* Capture of dim target in moving background[J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 2006, **18**(10): 1625-1628.
宋海峰, 陈兴无, 王磊, 等. 运动背景下弱小目标的提取算法[J]. 强激光与粒子束. 2006, **18**(10): 1625-1628.
- [8] LIU Lei, HUANG Zhi-jian. Improved motion information-based infrared dim target tracking algorithms[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, **67**: 341-349.
- [9] QIN Jian, QIAN Wei-xian, CHEN Jian. A detection algorithm for dim and small infrared target based on the optical flow estimation and the adaptive background suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 476-482.
秦剑, 钱惟贤, 陈钱. 基于光流估计和自适应背景抑制的弱小目标检测[J]. 光子学报, 2011, **40**(3): 476-482.
- [10] WANG Shou-feng, BAI Jun-qi. Bandwidth-adaptive mean shift infrared target tracking algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0510003.
王寿峰, 白俊奇. 带宽自适应的均值漂移红外目标跟踪算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0510003.
- [11] CHENG Jian, YANG Jie. Novel infrared object tracking method based on mean shift [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*. 2005, **24**(3): 231-235.
程建, 杨杰. 一种基于均值移位的红外目标跟踪新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, **24**(3): 231-235.
- [12] ZHANG Yi-fan, TIAN Yan, YAN Fan, *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.
- [13] ZHANG Kai-hua, LEI Zhang, LIU Qing-shan, *et al.* Fast visual tracking via dense spatio-temporal context learning [M]. Germany: Springer International Publishing. 2014: 127-141.
- [14] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397-1409.
- [15] FENG Tao, JIN Wei-qi, SI Jun-jie. Uncooled infrared FPA-A review and forecast[J]. *Infrared Technology*. 2015, **37**(3): 177-184.
冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. 红外技术, 2015, **37**(3): 177-184.
- [16] ZHAO Xiao-ming, YUAN Sheng-chun, MA Xiao-li, *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.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61401343, 61265006), the Natural Science Basic Plan in Shanxi Province of China (No. 2011JQ8012), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2014AA8098089C), the Aeronautical Science Foundation of China (No. 20120181005) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Nos. DZD140202, JDYB140105, WRYB142312)