

doi:10.3788/gzxb20134207.0849

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

王玲玲, 辛云宏

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘 要:针对复杂背景下红外小目标的检测与跟踪,提出了一种融合了 top-hat 算法、遗传算法以及粒子滤波器的新方法.该方法首先采用提取副帧的方法去除目标周围部分的背景和噪音,有效地减少了参与运算的像素数目;其次,将具有不同边缘特性的多个结构体应用于 top-hat 检测算法中,提高了副帧中预目标的有效性;接着,利用目标时空运动的相关性,结合阈值判断来去除虚假目标,增强了目标检测的可靠性;最后,将遗传算法引入粒子滤波算法,较好地改善了粒子的多样性,在保障跟踪实时性的同时,提高了粒子滤波的准确度.实验结果表明,该算法在检测准确度、跟踪准确度和鲁棒性都具有一定的优越性.

关键词:形态学滤波算法;遗传算法;粒子滤波;红外小目标;检测和跟踪

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)07-0849-8

A Small IR Target Detection and Tracking Algorithm Based on Morphological and Genetic-particle Filter

WANG Ling-ling, XIN Yun-hong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Aiming at small IR target detection and tracking in complex background, a method based on the top-hat detection algorithm, genetic algorithm and particle filter is presented. Firstly, a sub-frame extracting method is used for the removal of the background and noise around target, which effectively reduces the number of pixels participating in operation; secondly, a few structures with different edge characteristics are introduced in the top-hat algorithm, which greatly improve the efficient for the detection of the pre-target from sub-frame; thirdly, based on the correlation of target movement in time and space domain, a threshold judgment technology is used to remove the false targets; finally, the genetic algorithm is introduced into the particle filtering to enhance the diversity of particles, which can effectively improve the real-time and the precision of target tracking. The experimental results show that the presented algorithm has obvious superiority in detection correctness and tracking accuracy and robustness.

Key words: Morphological filtering algorithm; Genetic algorithm; Particle filter; Infrared small target; Detection and tracking

0 引言

实时红外小目标的检测与跟踪是航空、航天等

领域的一个热点问题^[1-3]. 有效地处理红外目标存在的强度弱小、形变、遮挡、背景干扰等问题^[2], 提高红外小目标检测有效性与跟踪准确度, 一直是红外目

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划工业攻关项目(No. 2012K09-09)和国家自然科学基金(No. 20927001)资助

第一作者:王玲玲(1985-),女,硕士,主要研究方向为目标跟踪、图像处理. Email:casey_wl@126.com

导师(通讯作者):辛云宏(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为微弱信号检测、被动目标定位跟踪、WSN的组网与节点定位技术.

Email:xinyh@snnu.edu.cn

收稿日期:2012-10-29;录用日期:2013-01-10

标检测和跟踪技术领域的重点和难点^[3].

近年来,国内外出现了许多目标检测与跟踪的算法.传统的检测算法有高通滤波^[4]、神经网络^[5]、小波变换^[6]等方法.这些方法在高信噪比情况下目标的检测简单有效,但是在复杂背景下效果不佳,而且检测算法过于复杂不适合实时性的要求,例如文献[5-6]提到的人工神经网络方法和基于双树复数小波变换和支持向量回归的检测方法.文献[7]提出了多层 top-hat 算法,虽然可以抑制杂波背景,然而需要多层次的针对两区域和暗区域进行白 top-hat 和黑 top-hat 变换过程较为繁琐不利于实时性的需求.目前,在红外目标跟踪领域常用的算法有均值漂移 (Mean Shift, MS)^[8-10]、卡尔曼滤波算法 (Kalman Filter, KF)^[11-13]、粒子滤波 (Particle Filter, PF)^[14-15] 以及在它们的基础上延伸的一些改进算法如扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman, EKF)、无迹卡尔曼滤波 (Unscented Kalman Filter, UKF)、无迹粒子滤波 (Unscented Particle Filter, UPF) 等.文献[8-10]提出的基于均值漂移的目标跟踪算法,需要的参量少,在迭代过程中收敛速度快且不需要穷尽搜索,适合于具有实时性要求的场合;但是,当目标所处的背景较为复杂时,跟踪过程容易发生漂移,而且无法适应于快速运动目标的跟踪,另外,它对目标的遮挡问题也较为敏感.文献[11-12]提出的 kalman 滤波和无迹滤波能满足准确度要求不高的状态估计.文献[13]结合了 meanshift 与 kalman 优点在一定程度上很好的提高了目标跟踪的准确度和鲁棒性.近年来,不受模型线性、高斯假设等约束的粒子滤波算法^[14-15]已逐步成为目标跟踪的一个主流方法.文献[14]提出的分层自适应卡尔曼粒子滤波通过分析物体运动,采用分层的估计,他们的组合在准确度和鲁棒性方面已表现出卓越的性能,但它有着繁重的计算量.

本文在对复杂背景下红外小目标特性分析的基础上,提出了一种改进的 top-hat 目标检测算法.该算法首先利用膨胀和腐蚀算法中不同结构体边缘特性实现红外小目标检测的目的,然后通过基于遗传算法的粒子滤波方法实现对小目标的有效跟踪.由于采用改进的 top-hat 能更好地滤除单帧图像的大面积的低频背景及噪音,从而保留点状小目标在内的高频分量;粒子滤波算法不受模型线性及高斯假设等约束,所以对红外视频序列中的目标跟踪有一定的稳健性,进而在对粒子滤波算法中重采样引入遗传算法不仅保证了粒子的有效性而且兼顾了粒子的多样性,更加有效地提高了粒子滤波对红外目标跟踪的准确度.

1 红外目标的检测算法

1.1 Top-hat 滤波算法

灰度形态学是在数学形态学基础上发展起来的一种新理论,其计算量小、易于实时实现,目前已被广泛地应用于图像处理领域.灰度形态学^[16]的基本运算是腐蚀、膨胀、开与闭运算.

传统的 top-hat 方法在进行膨胀、腐蚀运算的时候通常都采用相同的结构体,这在一般场景下是有效的,但对于红外小目标而言,将难以实现目标与噪音以及目标区域与云层背景区域的有效划分.为此,本文采用了不同结构体的 top-hat 算法,以期克服经典 top-hat 方法采用单一结构体的缺陷.

1.2 改进的 top-hat 算法

红外小目标在红外图像上往往表现为矩形形状亮点,因此本文中结构元素都采用矩形结构.定义不同长、宽的同轴矩形 B_i 和 B_o .其中, B_o 为大于目标区域尺寸的结构元素,为外部结构元素; B_i 为小于目标区域尺寸的结构元素,为内部结构元素.定义 $\Delta B = B_o - B_i$ 为介于 B_i 和 B_o 之间的环状边缘结构, B_b 是大小介于 B_i 和 B_o 之间的矩形结构体,其相互关系如图 1(a).

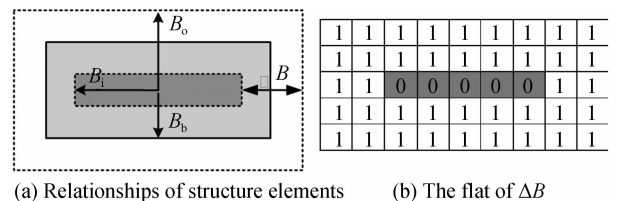


图 1 结构体示意

Fig. 1 The schematic diagram of the structure

考虑到真实的目标与周围环境背景必然存在差异,在图像处理时可以通过将周围区域的像素引入运算来体现这种差异.为此,本文用周围区域的像素替代目标区域的像素,这样就可大大提高对目标区域与其周围区域差异的利用效果.

用结构元素 $\Delta B(u, v)$ 对输入图像 $f(x, y)$ 进行膨胀运算和腐蚀运算为

$$(f \oplus \Delta B)(x, y) = \max_{u, v} (f(x-u, y-v) + \Delta B(u, v)) \quad (1)$$

$$(f \ominus \Delta B)(x, y) = \min_{u, v} (f(x+u, y+v) - \Delta B(u, v)) \quad (2)$$

腐蚀运算和膨胀运算互为对偶运算,定义 $f \blacksquare B_{oi}$ 和 $f \square B_{oi}$ 算子

$$f \blacksquare B_{oi}(x, y) = (f \oplus \Delta B) \ominus B_b \quad (3)$$

$$f \square B_{oi}(x, y) = (f \ominus \Delta B) \oplus B_b \quad (4)$$

式中 B_{oi} 表示 $f \blacksquare B_{oi}$ 和 $f \square B_{oi}$ 中用到的结构元素都与 B_i 和 B_o 有关.于是,改进的 top-hat (NWTN 和

NBTH)变换有

$$\text{NPTH}(x, y) = f(x, y) - f \blacksquare B_{oi}(x, y) \quad (5)$$

$$\text{NBTH}(x, y) = f \square B_{oi}(x, y) - f(x, y) \quad (6)$$

从定义上可以看出,改进的 top-hat 变换与经典的 top-hat 变换在膨胀和腐蚀的先后顺序上相反,并且,改进的 top-hat 变换采用了两个大小不同但是相互关联的结构元素,利用了结构元素边缘区域 ΔB 的信息。 ΔB 的引入,不仅减少了参与运算的像素数目,而且降低了噪音,很好地突显了目标区域和周围背景区域的差异。另外,利用 B_b 还可以根据需要调节参与运算的目标区域的大小。实践证明,这些措施的采用,极大地提高了红外小目标的检测准确度与效率。

1.3 结构元素的选择

结构元素的选取对于 top-hat 变换的结果影响很大,选用不同形状、不同类型及不同大小的结构元素将得到不一样的效果。在本文实验中,目标近似为矩形,所以选取矩形 flat 模型的结构体。结构体选择越小,其滤除低频背景就越彻底,所能保留的目标尺寸就越小。对于改进的 top-hat 运算来说,要想增强对噪音的滤除功能,就需要增加 B_b 的半径同时减小 ΔB 的边缘宽度, B_b 大小要选取和目标大小相当。本文实验中红外序列 I、II 中的目标大概为 4×8 、 8×3 ,因此选的矩形结构体大小如表 1。以序列 I 为例的结构体示意图和 ΔB 的 flat 模型如图 1(b)。

表 1 结构体大小
Table 1 The size of structure

	B_o	B_i	B_b	ΔB
Sequence I	5×9	3×7	3×7	5×9
Sequence II	9×5	7×3	7×3	9×5

2 红外小目标的跟踪算法

2.1 粒子滤波算法

粒子滤波是一种有效目标跟踪的方法,主要思想是利用一组带权值的随机采样粒子 $\{X_k^i, \omega_k^i\}_{i=1}^N$ 逼近后验概率密,并基于这些粒子和加权值 ω_k^i 来估计后验概率密度 $p(X_k | Z_{1:k})$,以样本均值代替积分运算,从而获得状态最小方差估计的过程。则有

$$p(X_k | Z_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^N \omega_k^i \delta(X_k - X_k^i) \quad (7)$$

式中: ω_k^i 已被归一化,即: $\sum_{i=1}^N \omega_k^i = 1$; $\delta(\cdot)$ 表示单位脉冲函数。权值更新公式为

$$\omega_k^i \propto \omega_{k-1}^i \frac{p(Z_k | X_k^i) p(X_k^i | X_{k-1}^i)}{q(X_k^i | X_{k-1}^i, Z_k)} \quad (8)$$

为了方便计算,通常取 $q(X_k^i | X_{k-1}^i, Z_k) = p(X_k^i | X_{k-1}^i)$,代入式(8)得

$$\omega_k^i \propto \omega_{k-1}^i p(Z_k | X_k^i) \quad (9)$$

权值归一化处理: $\omega_k^i = \omega_k^i / \sum_{i=1}^N \omega_k^i$ 。

一旦获得了加权粒子集合 $\{X_k^i, \omega_k^i\}_{i=1}^N$,状态估计由最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)估计为

$$\hat{X}_k = E[X_k | Z_{1:k}] = \sum_{i=1}^N X_k^i \omega_k^i \quad (10)$$

粒子滤波有一个缺陷,即粒子退化问题。为了有效解决这个问题,本文将遗传算法引入粒子滤波方法中,通过将遗传算法中的选择、交叉、变异等操作引入到粒子滤波的重采样过程,从而有效地改善了这方面的性能。

2.2 遗传粒子滤波算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法。将遗传机制应用于粒子的重采样,为解决粒子退化问题提供了重要的指导思想,遗传机制不仅仅通过选择算子遴选优良个体,还可以通过交叉算子与变异算子操作产生新的个体^[17]。本文提出的遗传粒子滤波算法(GA Particle Filter, GAPF),通过将遗传算法引入到粒子滤波的重采样,既保证了粒子有效性,同时兼顾了粒子的多样性,有效地提高了粒子滤波器的性能,极大地增强了红外目标检测与跟踪的效果。算法的流程如图 2。

从 GAPF 算法的流程框图可以看出,算法主要包括预选目标提取、GAPF 算法跟踪、阈值判断等几个部分,其基本处理过程为:

1) 预选目标 PF 根据 $k-1$ 时刻的估计状态预测出 k 时刻状态,并根据预测状态找出预测目标位置为中心的大小为 $\text{size_subframe} \times \text{size_subframe}$ 的局部范围,称之为副帧。对副帧进行改进的 top-hat 运算,找出预选目标。

2) 阈值判定 即判断 k 时刻预选目标模型和 $k-1$ 时刻的目标模型是否满足条件:模型灰度均值 $|\text{Mean_灰度}(k, k-1)| < T_1$, 距离的差的绝对值 $|D(k, k-1)| < T_2$ 。若符合条件则认为是跟踪的目标,否则就必须重新进行预选目标提取。其中,阈值 T_1 、 T_2 的具体数值需根据不同序列的实验效果设置。

GAPF 算法 以提取出的目标位置作为 GAPF 算法的输入,并由其计算粒子初始权值,此时的预测状态和权值就组成了遗传算法选择算子的父代,而重选择运算后的子代就是交叉运算的父代。同样,交叉运算后的子代则为变异的父代粒子群,变异运算后得到的子代就是我们重选择后的粒子集。对重选后的粒子集求期望,即为 k 时刻的 GAPF 算法的估计值。

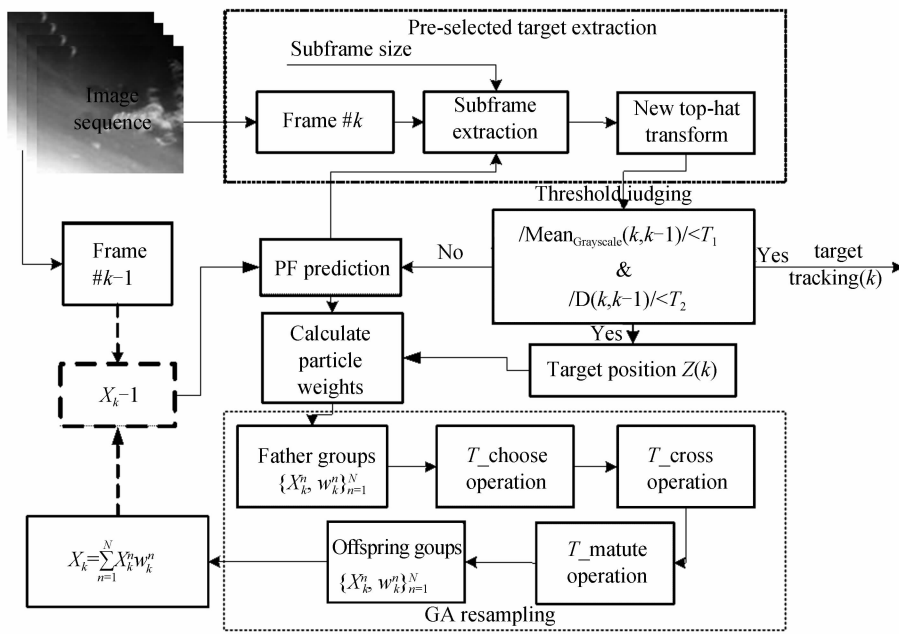


图2 GAPF 算法流程

Fig. 2 The block diagram of the GAPF algorithm

GAPF 方法的实现步骤:

步骤 1 初始化参量

1) 在第一帧图像中手动选取目标, 以选定目标为中心确定一个大小合适的副帧。

2) 根据先验分布, 建立初始状态样本集合

$$\left\{ X_0^n, \frac{1}{N} \right\}_{n=1}^N.$$

3) 设置遗传算法中的选择概率 P_choose (本文中实验设 $P_choose=1$), 交叉概率 P_cross , 变异概率 P_mutate .

步骤 2 预测

根据状态转移模型, 确定 k 时刻目标的状态 X_k 的样本集 $\{X_k^n, w_k^n\}_{n=1}^N$.

步骤 3 计算权值

根据式(16)和(17)计算粒子的归一化权值 w_k^n .

步骤 4 选择性重采样

重采样的条件: 设 $N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (w_k^i)^2}$ 如果 $N_{eff} \leq$

N_{th} 则进行重采样, 否则直接转到步骤 5.

一般情况下 $N_{th} = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}\right)N$.

对于 k 时刻加权的粒子集 $\{X_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N$, 采用轮盘赌算法进行重采样, 重采样的个数为 $N * P_choose$.

1) T_choose ——轮盘赌算法。

a) 根据生成 N 个随机数, $u_i = \frac{(i-1)+r}{N}$, 其中

$r \sim U[0, 1]$

b) 如果 $\sum_{i=1}^{m-1} \bar{w}_k^{(i)} < u_i \leq \sum_{i=1}^m \bar{w}_k^{(i)}$ 直接拷贝 m 粒子

$X^{(i)}$ 为重采样粒子 $\hat{X}^{(i)}$

2) T_cross ——交叉操作. 从粒子集中随机的选取两个粒子 $(x_k^m, x_k^n)_{m,n=1}^N$ 按照以下方法进行交叉操作, 则进行交叉的粒子数为 $0.5 * N * P_choose * P_cross$.

$$\tilde{x}_k^m = \alpha x_k^m + (1-\alpha)x_k^n + \eta \quad (11)$$

$$\tilde{x}_k^n = \alpha x_k^n + (1-\alpha)x_k^m + \eta \quad (12)$$

式中, $\eta \sim N(0, \Sigma)$, $\alpha \sim U(0, 1)$, $N(0, \Sigma)$ 是正态分布, $U(0, 1)$ 是均匀分布。

交叉准则: 如果 $P(Z_k | \tilde{x}_k^m) > \max\{P(Z_k | x_k^m), P(Z_k | x_k^n)\}$ 则接受粒子 \tilde{x}_k^m 否则放弃. 接受或放弃 \tilde{x}_k^n 的方法和 \tilde{x}_k^m 相同。

3) T_mutate ——变异操作. 从粒子集中随机的选取一个粒子 $(x_k^j)_{j=1}^N$ 按照以下方法进行交叉操作, 那么进行变异的粒子数是 $N * P_choose * P_mutate$.

$$\tilde{x}_k^j = x_k^j + \eta, \text{ 其中 } \eta \sim N(0, \Sigma).$$

变异准则: 如果 $P(Z_k | \tilde{x}_k^j) > P(Z_k | x_k^j)$ 则接受粒子 \tilde{x}_k^j 否则放弃。

步骤 5 估计

$$\hat{X}_k = \sum_{n=1}^N X_k^n w_k^n.$$

步骤 6 令 $k = k + 1$, 返回步骤 2.

3 实验结果及分析

本文仿真所使用的红外视频序列均使用武汉高德的 ThermoproTM TP8 系列红外热像仪采集获得. 红外视频序列的分辨率为 288×348 像素, 算法

采用 Matlab 语言编程.

序列 I:天空背景下小目标(飞机)匀速运动的红外视频序列.该视频共有 310 帧,1~171 帧中的目标在无遮挡的天空飞行,但是从 172~310 帧飞机进入云层,并且在 211~238 帧目标完全被遮挡在云层后面.

序列 II:复杂背景下选定人物不规则运动的红外视频序列.该视频共有 700 帧,第 1 帧~225 帧目标基本为匀速运动,从 226~432 帧目标被周围行人部分遮挡并且处于等待状态直至 433 帧完全与遮挡的行人分开,再从 433~700 帧都基本处于匀速

状态.

图 3 给出了对视频序列 I 中第 170 帧的小目标采用不同算法的检测结果.其中,图 3(a)为第 170 帧的原图,图 3(b)、(c)分别为采用传统 top-hat 与改进 top-hat 滤波之后的效果图.图中用白色框图选中的白点就是本文要检测跟踪的目标和已经检测出来的目标.图(d)~(f)分别为图(a)~(c)对应的灰度三维图.从图(b)、(c)以及图(e)、(f)可以很清楚地看出,与传统的 top-hat 相比,改进 top-hat 能够更好地抑制噪音信号和杂波信号.

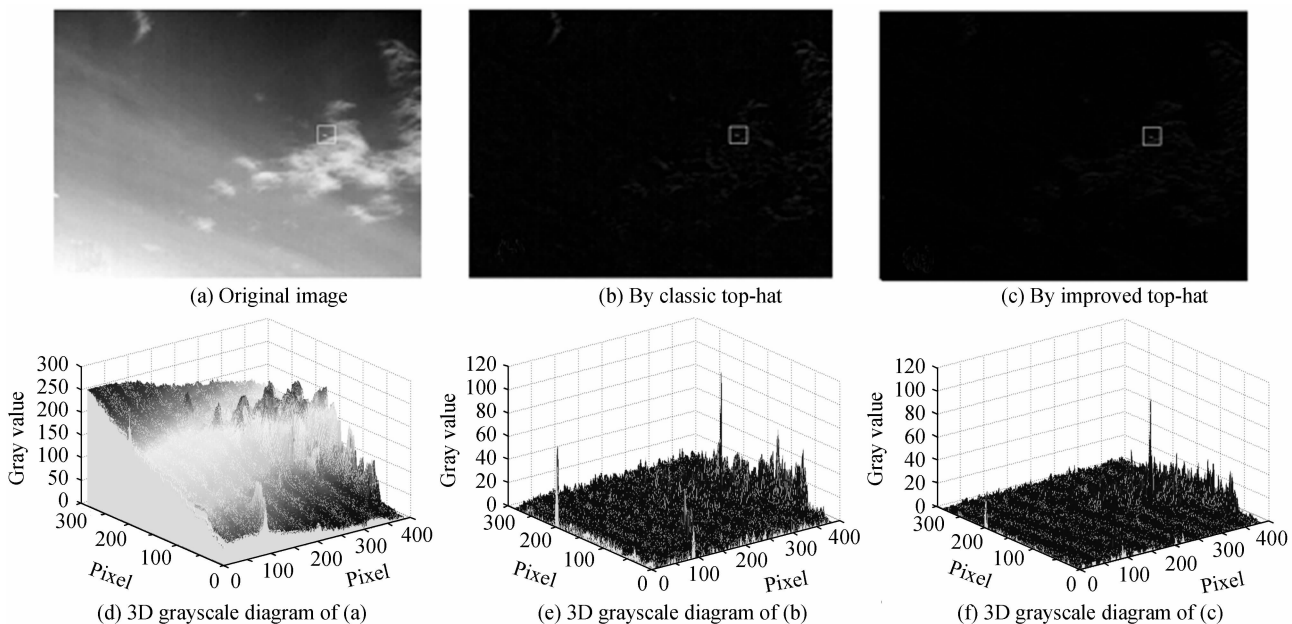


图 3 单帧红外图像中小目标的检测结果

Fig. 3 The detection results of the small IR target in a single frame

由于本算法不是直接对原图,而是通过预测值对原图截取了 19×19 的副帧进行处理的,所以能够规避副帧之外的建筑物背景或者其他噪音对检测效果的影响.图 4 显示了对 170 帧原图截取的副帧以及对副帧经过改进 top-hat 运算之后的效果图.

跟踪的目标,其中白框标记出的飞机就是我们要跟踪的目标.图 5(b)为红外小目标从第 2 帧至第 310 帧的实际运动轨迹和 GAPF 算法和 PF 算法的跟踪轨迹图,白框标记的是 310 帧 GAPF 跟踪的目标.图 5(c)为视频最后一帧显示跟踪目标的具体状态.同样,图 5(d)~(f)为序列 II 的第 1 帧跟踪效果图、跟踪轨迹对比图以及最后第 700 帧的跟踪效果图.从图 5(b)、(e)可以看出本文所用的目标跟踪算法与对比算法相比有更好的检测和跟踪效果.

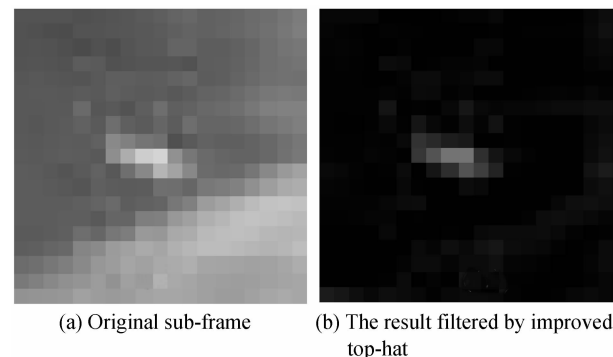


图 4 副帧图

Fig. 4 The sub-frame diagram

图 5 给出了红外视频序列中小目标的跟踪轨迹示意图.其中,图 5(a)为序列 I 第 1 帧开始检测和

图 6(a)~(d)分别选取了序列 I 中目标在运动过程进入云层前第 94 帧,进入云层后第 205 和 217 帧的跟踪图,以及在出了云层后 262 帧的跟踪图直观的展示了本文算法在厚重云层背景下红外小目标的跟踪效果.同样,图 6(e)~(h)则选取了序列 II 中跟踪目标在运动第 70 帧、第 200 帧、第 433 帧以及第 553 帧的跟踪图展示了在复杂背景下的跟踪效果.

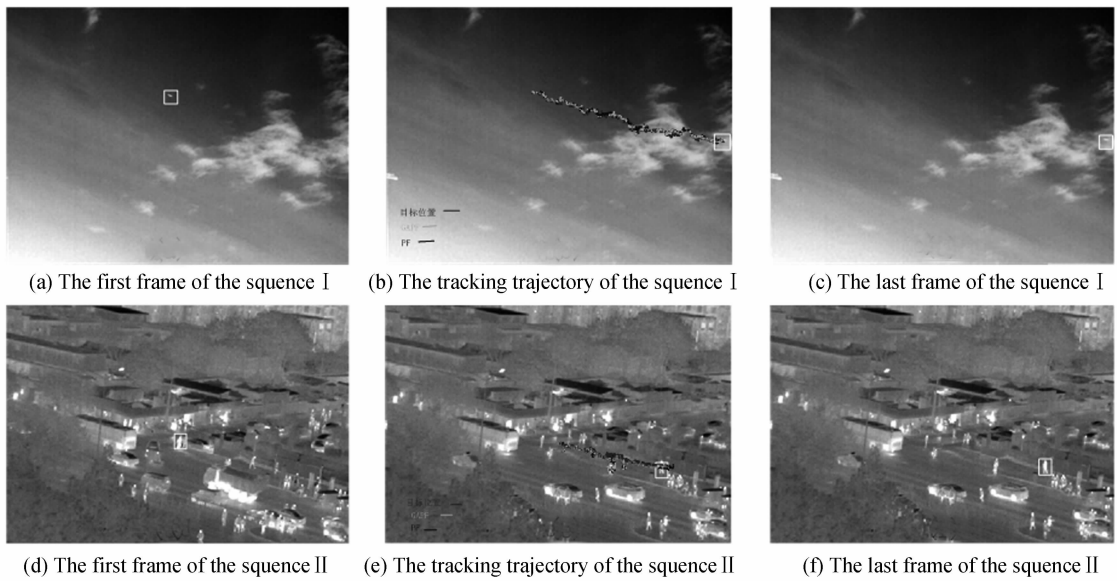


图 5 跟踪轨迹示意图
Fig. 5 The tracking trajectory

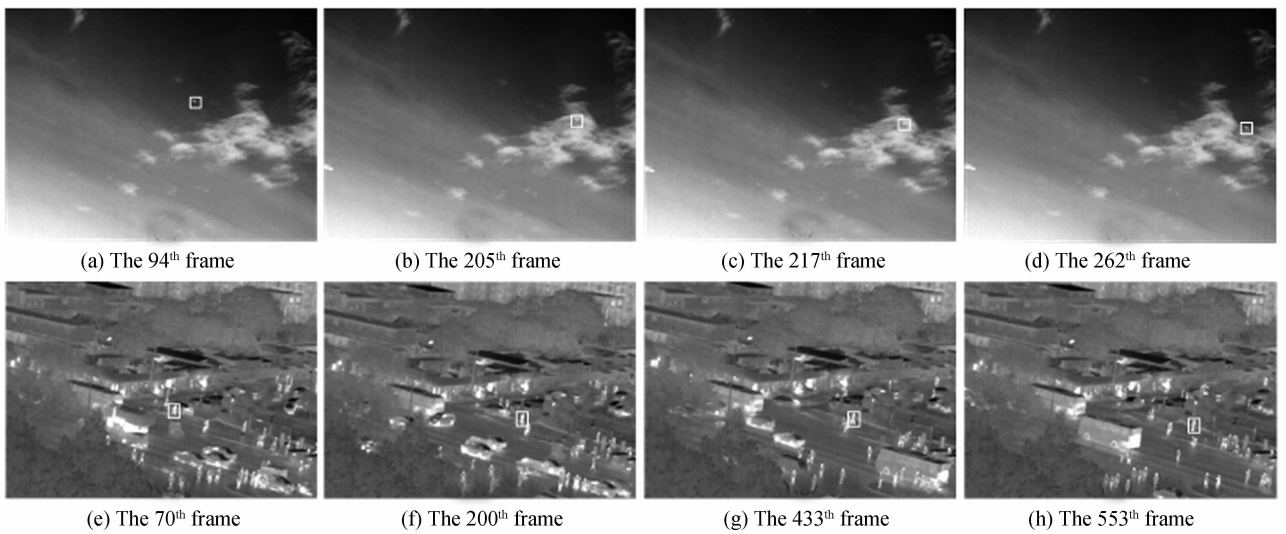
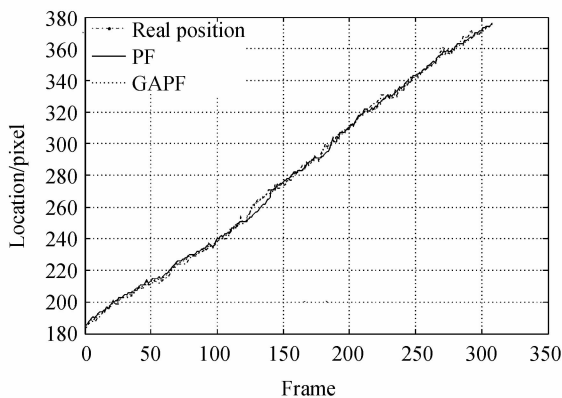


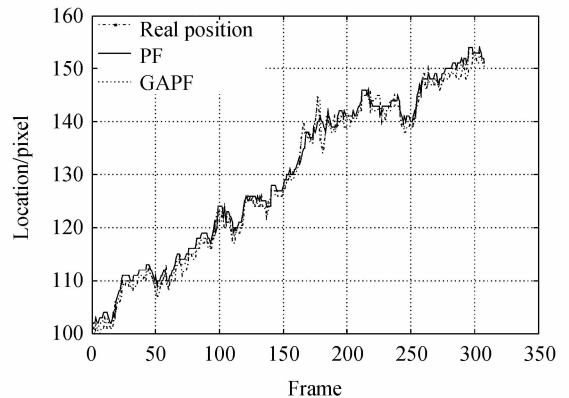
图 6 本文算法实验结果
Fig. 6 The tracking results by the proposed algorithm

图 7 (a)、(b)显示了序列 I 下 GAPF 算法和对比算法 PF 对目标 x 坐标和 y 坐标的估计. (c)、(d)显示了序列 I GAPF 算法和对比算法 PF 的对目标

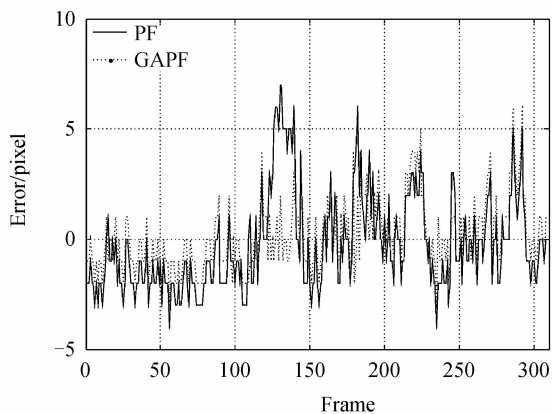
位置坐标的估计误差的对比曲线图. 从误差对比图可以看出本文算法相对于对比算法有更好的跟踪效果.



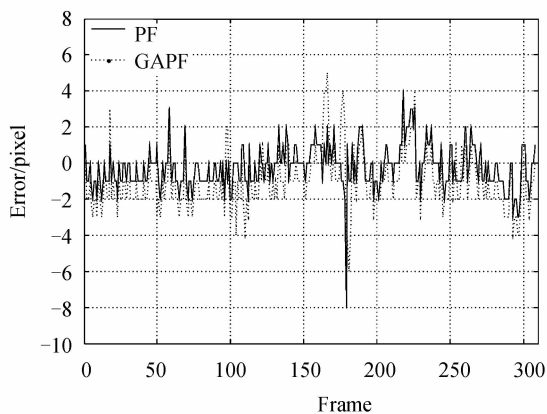
(a) Evaluated x coordinate of target locations of sequence II



(b) Evaluated y coordinate of target locations of sequence II



(c) Evaluated errors of x coordinate of target locations of sequence II



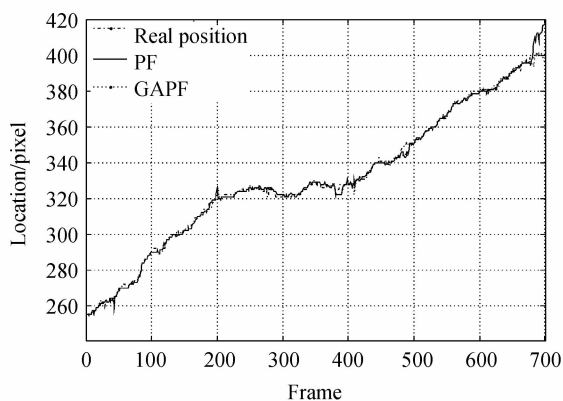
(d) Evaluated errors of y coordinate of target locations of sequence II

图 7 序列 I 目标位置估计及误差

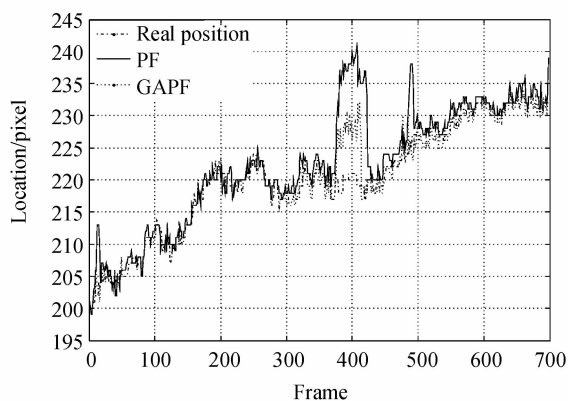
Fig. 7 The evaluated target locations and its errors of the sequence I

图 8 给出了分别采用 GAPF 算法和 PF 算法对序列 II 中小目标的跟踪结果. 其中, 图(a)、(b)分别为目标 x 坐标和 y 坐标的实际值以及分别采用

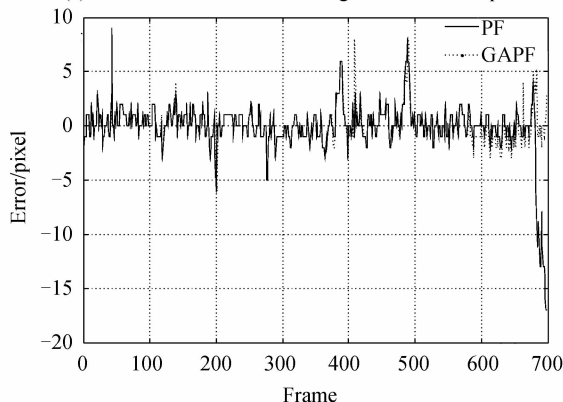
GAPF、PF 算法的估计值; 图(c)、(d)分别为目标 x 坐标和 y 坐标的估计误差对比曲线图. 由图(c)、(d)可以很清楚地看出本文算法优越性. 表 2 给出了 PF



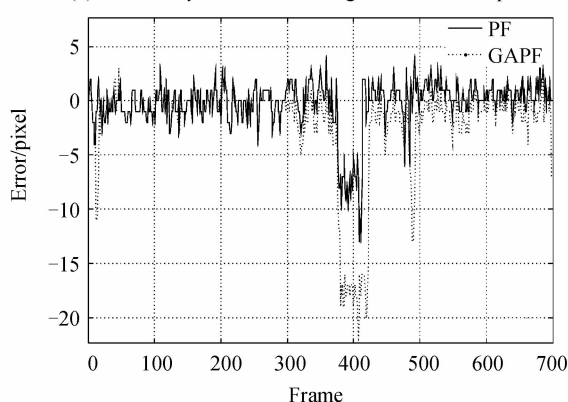
(a) Evaluated x coordinate of target locations of sequence I



(b) Evaluated y coordinate of target locations of sequence I



(c) Evaluated errors of x coordinate of target locations of sequence I



(d) Evaluated errors of y coordinate of target locations of sequence I

图 8 序列 II 的目标位置坐标及误差

Fig. 8 The evaluated target locations and its errors of the sequence II

表 2 误差对比表

Table 2 Error comparison

	GAPF		PF	
	X error	Y error	X error	Y error
Sequence I	1.581 1	1.239 2	2.210 5	1.857 8
Sequence II	1.562 5	2.309 5	2.398 1	4.936 9

与 GAPF 算法的目标跟踪 RMS(像素)误差, 实验结果验证本文算法在红外视频图像中小目标的检测和跟踪上的可行性以及优越性.

通过对以上两个序列红外目标的跟踪运动轨迹、目标有遮挡(云层、建筑物、行人等)或没遮挡情况下的跟踪效果图、估计位置坐标与实际位置对比

图以及估计目标位置的 RMS 误差分析结果可以看出,本文提出的方法不仅是有效和稳健的,而且与对照方法相比,显示出了一定的优越性.即使在厚重云层背景及复杂背景的情况下,本文提出的方法都能稳健地跟踪目标.但是,本算法的平均耗时与传统的粒子滤波方法相比较长,不过依然能满足实时性的要求.

4 结论

本文提出了一种融合 top-hat 算法、遗传算法、粒子滤波算法的红外小目标跟踪方法.在 top-hat 方法中引入了结构元素边缘特征,能更好地滤除单帧图像的大面积低频背景及噪音,并且有效保留点状小目标在内的高频分量;在粒子滤波算法重采样过程中引入遗传算法,不仅确保了粒子的有效性,而且兼顾了粒子的多样性.实验结果表明,与传统的跟踪算法相比,本文提出的算法在保证目标跟踪实时性的同时还具有很好的跟踪准确率和稳定性.

参考文献

- [1] CHI Jian-nan, FU Ping, WANG Dong-shu, *et al.* A detection method of infrared image small target based on order morphology transformation and image entropy difference[C]. Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 18-21 Aug. 2005, 8: 5111-5116.
- [2] BAI Xiang-zhi, ZHOU Fu-gen. Infrared small target enhancement and detection based on modified top-hat transformations[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2010, **36**(6): 1193-1201.
- [3] DENG He, LIU Jian-guo. Infrared small target detection based on the self-information map[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(2): 100-107.
- [4] LUO Jun-hui, JI Hong-bing, LIU Jin. Algorithm of ir small targets detection based on spatial filter and its application[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(3): 209-212.
罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(3): 209-212.
- [5] JIAO Jian-bin, YANG Shu, LIU Feng. Small infrared target detection based on artificial neural network [J]. *Control Engineering of China*, 2010, **17**(5): 611-613.
焦建彬, 杨舒, 刘峰. 基于人工神经网络的红外小目标检测[J]. *控制工程*, 2010, **17**(5): 611-613.
- [6] WU Yi-quan, YIN Dan-yan, JI Shou-xin. Detection of small infrared target based on dual-tree complex wavelet transform and SVR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(8): 1834-1839.
吴一全, 尹丹艳, 纪守新. 基于双树复数小波和 SVR 的红外小目标检测[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(8): 1834-1839.
- [7] BAI Xiang-zhi, ZHOU Fu-gen, XUE Bin-dang. Infrared image enhancement through contrast enhancement by using multiscale new top-hat transform[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(2): 61-69.
- [8] WANG Zhi-le, HOU Qing-yu, HAO Ling. Improved infrared target-tracking algorithm based on mean shift[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(21): 5051-5059.
- [9] GAO Cai-cai, CHEN Wei. Ground moving target tracking with vs-imm using mean shift unscented particle filter[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, **24**(5): 622-630.
- [10] HOU Qing-yu, ZHANG Wei, WU Chun-feng, *et al.* Improved mean-shift based IR target tracking algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 764-770.
侯晴宇, 张伟, 武春风, 等. 改进的均值移位红外目标跟踪[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 764-770.
- [11] MOTAI Y, JHA S K, KRUSE D. Human tracking from a mobile agent: optical flow and Kalman filter arbitration[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2012, **27**(1): 83-95.
- [12] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, **92**(3): 401-422.
- [13] MAZINAN A H, AMIR-LATIFI A. Applying mean shift, motion information and Kalman filtering approaches to object tracking [J]. *ISA Transactions*, 2012, **51**(3): 485-497.
- [14] YIN S, NA J H, CHOI J Y, *et al.* Hierarchical Kalman-particle filter with adaptation to motion changes for object tracking[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2011, **115**(6): 885-900.
- [15] CAO Bei, MA Cai-wen, LIU Zhen-tao. Particle filter with fine resampling for bearings-only tracking [C]. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering, 2012, **29**: 3685-3690.
- [16] BAI Xiang-zhi, ZHOU Fu-gen. Analysis of different modified top-hat transformations based on structuring element construction[J]. *Signal Processing*, 2010, **90**(11): 2999-3003.
- [17] HAN Hua, DING Yong-sheng, HAO Kuang-rong, *et al.* An evolutionary particle filter with the immune genetic algorithm for intelligent video target tracking [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, **62**(7): 2685-2695.