

基于短时轨迹检测的红外弱小目标轨迹检测算法

赵 菲, 卢焕章

(国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 为解决虚警率较高情况下红外弱小目标轨迹检测效率下降严重的问题, 本文提出一种基于短时轨迹检测的红外弱小目标轨迹检测算法. 算法首先在相邻帧间进行短时轨迹检测, 然后以短时轨迹为基础建立新的轨迹结构并结合轨迹关联算法完成目标轨迹的检测. 文章推导了算法的虚警率和检测概率的关系, 证明了本文提出的算法相比单帧检测结合轨迹关联的算法具有更好的检测性能. 通过对仿真和实际红外图像序列进行实验表明, 本文算法能够在准确检测弱小目标的同时有效的减少无效轨迹的数量, 从而提高了算法的执行效率.

关键词: 弱小目标; 轨迹检测; 短时轨迹; 轨迹关联

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)01-0175-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.01.028

Trajectory Detection for Infrared Dim Point Target Based on Short Trajectory Detection

ZHAO Fei, LU Huan-zhang

(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition (ATR), National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: To improve the efficiency under high false alarms probability conditions, an infrared dim point target trajectory detection algorithm based on short trajectories detection is proposed in this paper. The short trajectories are detected in consecutive frames at first, and then the trajectory association which builds a new trajectory depends on the result of short trajectory is applied to detect the target trajectory. The relationship between false alarms probability and detection probability is deduced, and the detection performance is proved to be better than algorithm based on trajectory association combining with segmentation in single frame. The experimental results indicate that the amount of invalid trajectories can be decreased effectively while the target trajectory is being detected accurately, and the efficiency of target detection is improved.

Key words: dim point target; trajectory detection; short trajectory; trajectory association

1 引言

弱小目标检测是红外末制导武器系统中的关键技术之一. 总的来说, 实现弱小目标检测主要有检测前跟踪(TBD)和跟踪前检测(DBT)两大类方法^[1], 其中 TBD 方法对于信噪比较低的目标具有更好的检测性能, 但计算量和存储量都较大; 而 DBT 类方法计算和实现较简单, 因此该类方法相对具有更好的实用性. DBT 类算法一般分为三个步骤: (1)背景抑制(2)单帧分割检测(3)序列图像目标轨迹检测. 其中步骤(3)作为算法中的关键环节直接影响算法检测性能.

目前常用的目标轨迹检测方法有图像流法^[2], 管道滤波法^[3,4], 基于多帧积累的方法^[1,5], 基于预测-匹配的方法^[6]和轨迹关联法^[7-10]等, 其中轨迹关联算法不

仅具有一定的轨迹预测能力, 同时通过设置多级假设门限降低了算法误判决的概率, 相对具有更强的轨迹检测能力. 但是, 当单帧阈值检测结果中虚警率较高时, 轨迹关联算法会频繁建立并删除由虚警点所引起的无效轨迹数据, 严重影响了算法的执行效率和末制导信息处理的实时性. 究其原因, 是因为轨迹关联算法框架中以单帧检测结果为基础来完成轨迹检测, 虚警率将直接影响算法中轨迹的数量. 如果能够剔除单帧虚警点, 将能够有效减少无效轨迹的数量, 从而提高算法的效率.

基于这一思路, 本文提出了一种基于短时轨迹检测的轨迹关联弱小目标检测算法. 算法在相邻帧间进行短时轨迹检测, 并以此为基础进行轨迹关联算法. 理论分析和实验表明, 该方法能够有效的减少无效轨迹的数量, 提高轨迹检测算法的效率和实时性.

2 短时轨迹检测算法

为了保证对目标轨迹的检测能力,轨迹关联算法^[10]对一帧中未能与已有轨迹匹配关联的过门限点建立新的轨迹.由于运动不具有连续性,经过连续几帧处理后这些轨迹将被删除,这些由虚警产生的无效轨迹将会导致算法计算量的增加.当虚警率较高时,无效轨迹的数量较大,对于无效轨迹的管理(包括轨迹建立、更新以及删除)严重影响了轨迹检测算法的执行效率.本文提出利用短时轨迹检测有效的降低虚警的影响,并通过理论分析得到该算法的检测性能优于原单帧检测结合轨迹关联的算法.本文讨论假设图像序列已完成预处理和单帧阈值分割,图像中灰度超过单帧分割门限的像素点称为候选目标点.

2.1 短时轨迹检测算法原理

为保证具有较高的控制精度,成像末制导探测器一般具有较高的帧频;又由于目标距离探测器较远时目标辐射能量衰减严重并且探测器角分辨率有限,因此运动目标在经红外探测器成像后短时间内基本表现为匀速运动的弱小目标.假设当前帧图像为第 n 帧,短时轨迹检测的原理是在第 $n-2$ 帧、第 $n-1$ 帧和第 n 帧中检测符合目标运动规律的轨迹.由于目标呈现匀速运动的规律,本文以对称误差为指标来衡量是否符合匀速运动的规律,对称误差 dis 的定义见式(1).

$$dis = \begin{cases} |x_i^{n-2} + x_k^n - 2x_j^{n-1}| + |y_i^{n-2} + y_k^n - 2y_j^{n-1}|, \\ \text{if } |x_i^{n-2} + x_k^n - 2x_j^{n-1}| + |y_i^{n-2} + y_k^n - 2y_j^{n-1}| \leq Th \\ \infty & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中, (x_i^{n-2}, y_i^{n-2}) 、 (x_j^{n-1}, y_j^{n-1}) 和 (x_k^n, y_k^n) 分别代表第 $n-2$ 帧、第 $n-1$ 帧和第 n 帧中第 i 点、第 j 点和第 k 点的坐标. dis 越小,则表明 (x_i^{n-2}, y_i^{n-2}) 和 (x_k^n, y_k^n) 关于 (x_j^{n-1}, y_j^{n-1}) 对称程度越高,越符合目标的运动规律.其中 Th 作为短时轨迹对称误差门限.

根据短时轨迹检测的原理,算法首先以第 $n-1$ 帧中的候选目标 (x_j^{n-1}, y_j^{n-1}) 为基准,在大小为 $h \times w$ 的范围内在第 $n-2$ 帧和第 n 帧中搜索关于 (x_j^{n-1}, y_j^{n-1}) 对称的候选点对构成该区域内可能存在的短时轨迹,对于所有满足条件的短时轨迹,选择 dis 最小的作为该区域中的目标短时轨迹输出.式(1)中对称误差门限 Th 的大小直接影响局部窗口内存在的短时轨迹的数量,当 Th 较大时,放松了对称度的限制,因此会存在较多的短时轨迹;反之存在的短时轨迹较少,因此对称误差门限的选取应根据目标运动规律选取适当的值.考虑到对于目标匀速运动的假设,本文选取 $Th = 1$,即允许对称误差小于等于 1 个像素的短时轨迹作为目标轨迹

输出.

2.2 短时轨迹检测算法性能分析

如引言所述,红外弱小目标的检测首先需要进行背景抑制,其目的是消除原始图像中的杂波分量,使背景成为高斯白噪声^[11,12].根据预处理的这一特点,此处假设输入图像的背景为高斯白噪声,目标在其中呈现为具有一定信噪比 S (此处信噪比定义为 $SNR = (T - \mu)/\sigma$,其中 T 是目标能量)的单个目标,则像素灰度 I 的分布为:

$$I \sim \begin{cases} N(\mu, \sigma^2), & \text{背景} \\ N(\mu + S\sigma, \sigma^2), & \text{目标} \end{cases} \quad (2)$$

式中 μ 和 σ 分别代表图像均值和标准差.单帧图像的检测门限为 t 时,检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I - \mu - S\sigma)^2}{\sigma^2}\right) dI \quad (3)$$

$$P_f = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I - \mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \quad (4)$$

假设图像的大小为 $M \times N$,第 $n-1$ 帧中的任意一候选目标,在 $h \times w$ 局部范围内第 n 帧中存在 a 个候选目标的概率为:

$$p(a) = C_{h,w}^a P_f^a (1 - P_f)^{h \cdot w - a} \quad (5)$$

第 $n-2$ 帧中存在 b 个候选目标的概率为:

$$p(b) = C_{h,w}^b P_f^b (1 - P_f)^{h \cdot w - b} \quad (6)$$

由于式(1)中选择 $Th = 1$,第 $n-2$ 帧中一个候选目标对应在第 n 帧中满足式(1)的像素位置有 5 个,考虑第 $n-2$ 帧 b 个候选目标均不相邻的情况下,则第 n 帧中候选目标满足式(1)的概率为

$$p_0 = 5b / (h \cdot w) \quad (7)$$

则第 n 帧中存在 l 个对称点的概率为

$$p(l) = C_a^l p_0^l (1 - p_0)^{a-l} \quad (8)$$

第 n 帧中存在满足式(1)中的对称点的概率为

$$p(l \in [1, a]) = 1 - (1 - p_0)^a \quad (9)$$

对应第 $n-1$ 帧中的任意一个候选目标,第 $n-2$ 帧和第 n 帧中存在满足式(1)的对称点的概率见式(10).

$$\begin{aligned} P_m &= \sum_{a=1}^{h \cdot w} \sum_{b=1}^{h \cdot w} p(a)p(b)p(l \in [1, a]) \\ &= \sum_{a=1}^{h \cdot w} \sum_{b=1}^{h \cdot w} [C_{h,w}^a P_f^a (1 - P_f)^{h \cdot w - a}] \\ &\quad \cdot [C_{h,w}^b P_f^b (1 - P_f)^{h \cdot w - b}] \cdot [1 - (1 - p_0)^a] \quad (10) \end{aligned}$$

那么在第 $n-2$ 、第 $n-1$ 和第 n 帧中由虚警点生成的目标轨迹数目见式(11).

$$\begin{aligned} Num_u &= MNP_f \sum_{a=1}^{h \cdot w} \sum_{b=1}^{h \cdot w} [C_{h,w}^a P_f^a (1 - P_f)^{h \cdot w - a}] \\ &\quad \cdot [C_{h,w}^b P_f^b (1 - P_f)^{h \cdot w - b}] \cdot [1 - (1 - p_0)^a] \quad (11) \end{aligned}$$

将式(4)、(7)代入式(11),可得短时轨迹检测得到

的虚警轨迹数目的完整表达形式见式(12).

$$\begin{aligned}
 Num_{li} = & MN \cdot \int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \\
 & \cdot \sum_{a=1}^{h \cdot w} \sum_{b=1}^{h \cdot w} \left[C_{h \cdot w}^a \left(\int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \right)^a \right. \\
 & \cdot \left. \left(\int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \right)^{h \cdot w - a} \right] \\
 & \cdot \left[C_{h \cdot w}^b \left(\int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \right)^b \right. \\
 & \cdot \left. \left(\int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu)^2}{\sigma^2}\right) dI \right)^{h \cdot w - b} \right] \\
 & \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{5b}{h \cdot w} \right)^a \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

根据式(12)可知,由虚警形成短时轨迹的数目与单帧检测的虚警率 P_f 、局部窗口大小 $h \times w$ 和 Th 有关,这也与对短时轨迹检测算法性能的定性分析相一致:当局部范围 $h \times w$ 增大时,将包含更多的虚警点,因此产生短时轨迹的概率将随之增大,反之减小;同理,当虚警率 P_f 越大时,局部范围内也将包含更多的虚警点,因此产生短时轨迹的概率也将随之增大,反之减小; $h \times w$ 和 P_f 确定时, Th 增大将降低轨迹对称度的判决标准,因此产生短时轨迹的概率也将随之增大,反之减小.其中关于 Th 的设定已在前文分析,而对于 h 和 w 则应在满足 $h \times w$ 能够包容三帧运动轨迹的前提下尽可能的选择较小的值,这样才能尽可能的减小 P_m .

对于目标短时轨迹的检测概率为目标连续三帧中

都被单帧检测到的概率,即

$$P_{ld} = \left(\int_t^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I-\mu-S\sigma)^2}{\sigma^2}\right) dI \right)^3 \quad (13)$$

设短时轨迹检测的虚警概率如式(14).

$$\begin{aligned}
 P_{lf} = & \frac{Num_{li}}{M \cdot N} = P_f \sum_{a=1}^{h \cdot w} \sum_{b=1}^{h \cdot w} \left[C_{h \cdot w}^a P_f^a (1 - P_f)^{h \cdot w - a} \right. \\
 & \cdot \left. \left[C_{h \cdot w}^b P_f^b (1 - P_f)^{h \cdot w - b} \right] \cdot \left[1 - (1 - p_0)^a \right] \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

短时轨迹检测的输出结果是目标在邻近三帧中形成的轨迹,其将作为轨迹起始的基础为轨迹关联服务.如果以原始单帧检测结合轨迹关联算法完成三帧内的轨迹检测并达到如式(13)的检测概率,那么产生的虚警概率为:

$$P_{yf} = \frac{Num_{yf}}{M \cdot N} = P_f(3 - 2P_m) \quad (15)$$

其中, Num_{yf} 代表连续三帧形成的新轨迹数目,具体为在第 $n-2$ 帧、第 $n-1$ 帧和第 n 帧中产生的虚警轨迹数目之和.

假设局部范围为 9×9 (即 $h = w = 9$), 这代表匀速运动的点目标最大速度不超过 4.5 像素/帧. 当对称误差门限 $Th = 1$ 的情况下, 信噪比 $S = 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$ 情况下的检测性能曲线如图 1(a) ~ (d) 所示. 图中虚线代表的是单帧检测结合轨迹关联算法的检测概率 - 虚警率曲线, 实线代表的是短时轨迹的检测概率 - 虚警率曲线. 从图 1 可以看出, 短时轨迹的检测性能明显优于单帧检测结合轨迹关联算法的检测性能, 在保

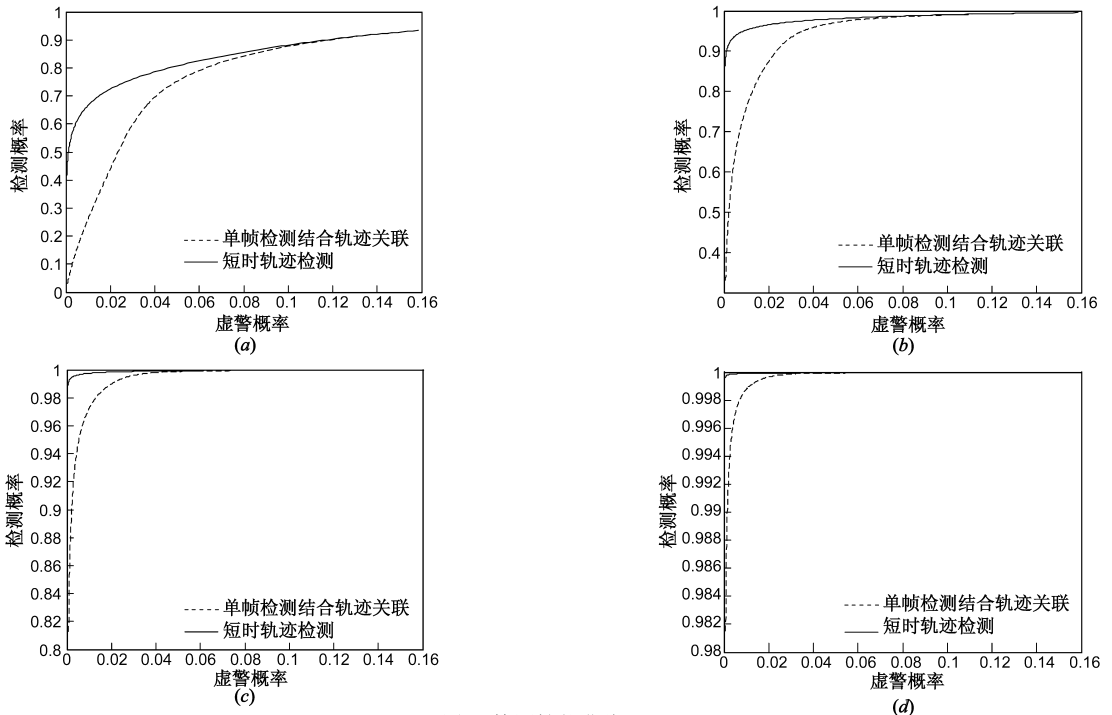


图1 检测性能曲线

证相同检测概率的情况下,短时轨迹检测算法总是获得更小的虚警概率.从图 1(a)~(d)的变化规律中可以看出,目标信噪比越低时,这种性能上的优势越明显.

3 基于短时轨迹检测轨迹关联算法

当轨迹关联算法完成候选目标点与已有轨迹的关联匹配后,在未能与已有轨迹匹配的候选目标点中寻找能够在邻近三帧中形成短时轨迹的点来建立新的轨迹.算法依然以轨迹关联算法的框架为基础,因此本节重点对轨迹关联算法中的轨迹建立环节进行介绍,算法的其他步骤可参考文献[10].

在完成已有目标轨迹的更新和无效轨迹的删除后,单帧检测结果中未能匹配的候选目标点作为潜在的目标点,应该为其建立新的轨迹.管理由噪声点所起始的轨迹占据了轨迹管理中的大部分工作,耗时严重,因此本文根据单帧检测结果中未能与已有轨迹匹配的

候选目标结合短时轨迹检测结果起始新的目标轨迹:

假设单帧检测的候选目标点集合为 $C = \{(x_q^n, y_q^n)\}$,其中与已有轨迹集合 $\{T_r\}$ 能够正确匹配的点集为 $D = \{(x^n, y^n)\}$,那么未能正确匹配的点为 $E = C - (C \cap D)$.设短时轨迹集合 $LT = \{[(x_i^{n-2}, y_i^{n-2}), (x_j^{n-1}, y_j^{n-1}), (x_k^n, y_k^n)]\}$ 中第 n 帧坐标构成的集合为 $F = \{(x_k^n, y_k^n)\}$, $E \cap F$ 则代表那些没有和已有轨迹匹配但已形成短时轨迹的候选目标,本文以 $E \cap F$ 所对应的短时轨迹来起始新轨迹,并相应的初始化轨迹长度、连续丢失帧数、轨迹匹配率和预测位置坐标等信息来建立新的目标轨迹.

当轨迹起始后,可按照原算法完成轨迹信息的管理.对于已建立的轨迹,本文算法对于目标轨迹的检测能力与原始的轨迹关联算法相同,具体轨迹关联算法性能分析和参数选择已在文献[8]中详细叙述.总结基于短时轨迹检测的轨迹关联算法的流程,如图 2 所示.

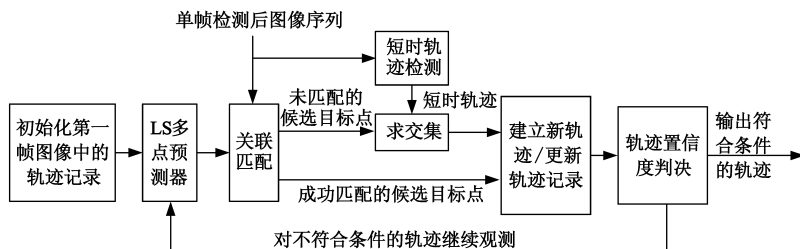


图2 基于短时轨迹检测的轨迹关联算法流程图

4 实验结果与分析

为验证本文提出算法的效率,本节分别采用了仿真图像序列与实际红外图像序列进行实验.基于前文所述,短时轨迹检测算法的引入有效的减少了算法中无效轨迹的数目,提升了轨迹关联算法的效率,本文实验中将重点关注算法对无效轨迹的抑制能力和算法性能的提高.考虑实验图像中目标的实际运动速度,实验中短时轨迹检测算法中的参数 h 选 7,即目标帧间速度不超过 3.5 像素/帧.轨迹关联算法中参数选取参考文献[9,10].

实验 1 仿真红外图像序列实验

假设序列图像(大小为 256×256)中背景为高斯白噪声,服从 $N(\mu = 100, \sigma^2 = 9)$ 的分布,序列中存在一个信噪比为 4 且在两个方向上运动速度均为 1 像素/帧的目标,序列长度为 100 帧.为保证较高的单帧检测概率,因此应适当的放低单帧检测门限,实验中选取 $th = \mu + 2\sigma$,则检测概率 $P_d \approx 97.72\%$,虚警率 $P_f \approx 2.28\%$,可知单帧检测结果在每帧中平均将产生 1494 个虚警点.图 3(a)(b)所示为序列中的第 5 帧和第 72 帧的单帧检测结果,从图中可以看出单帧检测结果中候选目标点较

密集,为目标轨迹的检测带来了较大困难.

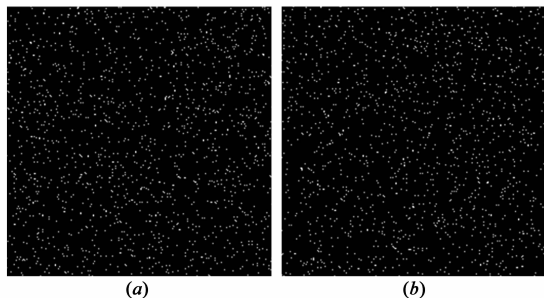


图3 序列中第5帧和第72帧的单帧检测结果

图 4(a)和(b)所示分别为本文算法与传统轨迹关联算法所检测到的置信度高于门限的目标轨迹,从图中可以看出,本文算法和传统轨迹关联算法都可以准确的检测出目标轨迹.同时也应看到,由于虚警率较高,检测结果中会存在其他的高置信度轨迹,这些轨迹的剔除往往需要结合目标识别而进行(例如运动速度,运动方向一致性,灰度一致性,形状一致性等特征的积累来逐渐提出虚假目标);由于本文算法所检测到的轨迹均是起始于短时轨迹,因此轨迹起始时将会具有一定的短时对称的特性;相比较而言,传统轨迹关联算法

以单帧的虚警点起始轨迹,因此轨迹起始时并不规则.由此可以看出,不同的轨迹起始将检测出不同的虚假目标轨迹.图5中所示为两种算法在图像序列中所管理的轨迹总数目,其中实线是基于短时轨迹检测的轨迹关联算法在每一帧中的轨迹总数目,虚线是轨迹关联算法在每一帧中的轨迹总数目.从图中可以看出,本文提出的基于短时轨迹检测的轨迹关联算法能够有效的抑制无效轨迹的产生,算法中所管理的轨迹数目要明显少于轨迹关联算法中的轨迹数目,由于轨迹数目较少,算法中用于管理轨迹信息的运算量和存储量均能够有效的减少,在很大程度上提升了算法的执行效率,以 PC 机(2.5GHz CPU + 2G 内存)上 MATLAB7.1 的运行时间来看,完成图像序列的检测轨迹关联算法需要约 1097s,本文提出的算法约为 163s.

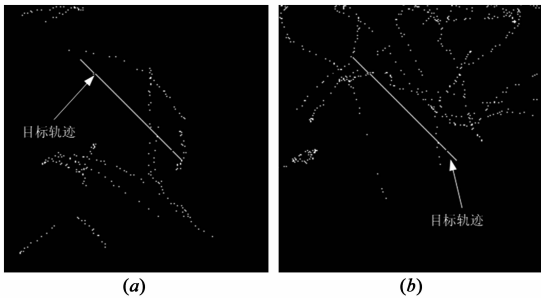


图4 仿真图像序列目标轨迹检测结果

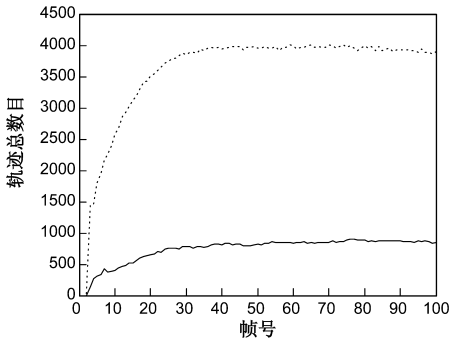


图5 仿真图像序列中每一帧中的轨迹总数目

为进一步验证算法的性能,本实验中选取了 DPA^[13,14](动态规划)这种 TBD 算法进行了检测性能的对比. DPA 是一种常用的 TBD 方法,其可以有效累加连续帧间小目标的能量.以本实验中所选取的图像序列为例,在 3 帧累加和短时轨迹检测的情况下, DPA 算法与短时轨迹检测算法的检测性能如图 6 所示,图中虚线和实线分别代表 DPA 算法和短时轨迹检测的检测性能曲线.

从图中可以看出, DPA 算法的检测性能优于本文算法的检测性能,这是因为其首先在连续帧间积累目标能量,从而提高了目标的信噪比.但是这种能量的累

加是在原始图像像素级进行运算,计算量巨大.同样在上述的运行环境下,本文算法每帧在邻近三帧内检测短时轨迹需要的平均时间在 0.93s,而 DPA 算法则需要大约 57s,同时利用 DPA 算法来累加目标能量还需要保证摄像机稳定,这意味着在实际应用时首先需要进行帧间运动补偿.

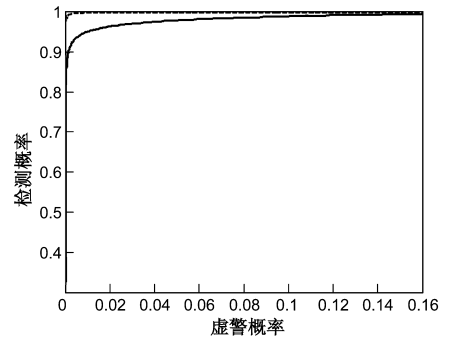


图6 DPA与本文算法检测性能对比

实验 2 实际红外图像序列实验

为检验算法在实际红外图像序列中的检测效果,本文选取两组包含红外小目标的图像序列进行了实验,两组序列中的一帧图像如图 7 所示,其中小目标在图中用方框标出.本文首先选用文献[12]中所述方法进行了复杂背景抑制,由于存在复杂背景杂波的影响,原图像经抑制后背景很难达到理想的高斯分布,具体针对本实验图像而言,考虑在实际应用中处理能力的范围内尽可能增大虚警、提高检测概率,本实验中以 $th = \mu + 4\sigma$ 作为门限进行单帧分割检测,并分别用轨迹关联算法和本文提出的基于短时轨迹检测轨迹关联算法进行目标轨迹的检测.图 8 显示的是对图 7 单帧分割检测后的结果.

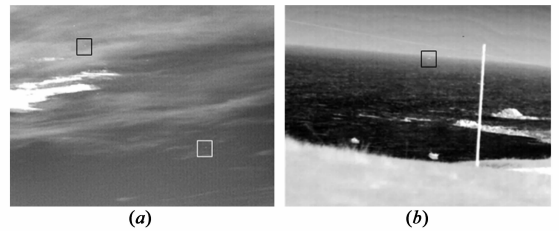


图7 实际红外图像序列

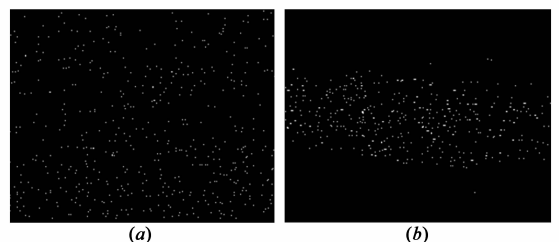


图8 实际红外图像单帧检测结果

图9(a)(b)为实际红外图像序列经过背景抑制后再进行目标轨迹检测后的结果,其中用虚线椭圆标识的是真实目标轨迹.图中虚假轨迹需要通过后续的识别进行剔除.图10中所示分别为图7(a)和(b)在轨迹检测过程中管理的轨迹总数曲线.从图中的对比可以看出,与仿真图像的结果相同,针对实际红外图像序列基于短时轨迹检测的轨迹关联算法依然有效地抑制了无效噪声轨迹的产生,提高了算法的执行效率.

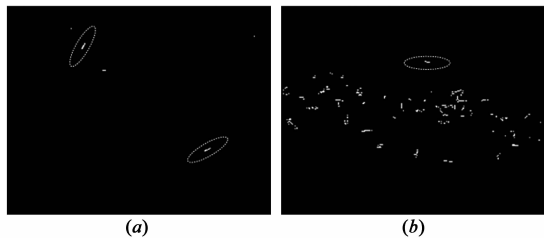


图9 实际红外图像序列目标轨迹检测结果

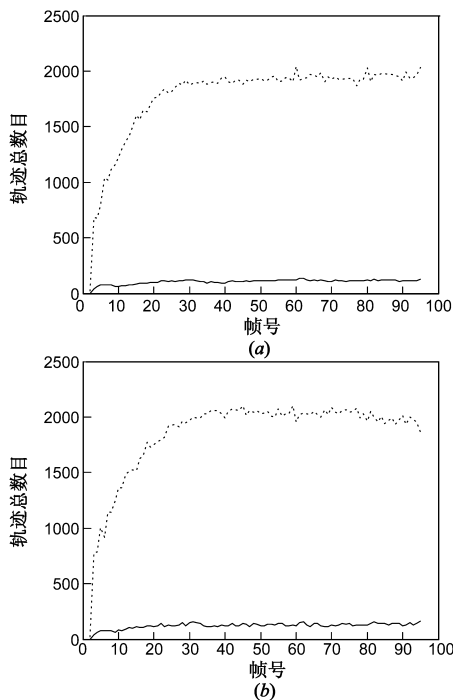


图10 真实红外图像序列中每一帧中的轨迹总数目

5 结论与展望

针对虚警率较高情况下轨迹关联算法的执行效率较低的问题,本文提出一种短时轨迹检测算法,用来在相邻帧间检测目标轨迹,并通过理论分析证明了算法具有更优的检测性能.通过将短时轨迹作为轨迹关联算法的轨迹起始基础,有效减少了算法中所产生的无效轨迹的数量,提高了轨迹检测算法的执行效率和实时性.

本文提出短时轨迹检测的基本考虑是在单帧检测

结果进入轨迹检测模块之前尽可能的筛除部分虚警点,减少算法后续的计算负担.因此,短时轨迹检测也可以与其他基于单帧检测的轨迹检测方法相结合,更有效的完成目标检测任务.同时,短时轨迹的长度并不仅仅局限于邻近3帧,当短时轨迹的长度增加时,将会带来更好的抑制虚警的效果,但同时也将带来算法复杂度 and 存储量的增加.

参考文献

- [1] F Zhang, C Li, L Shi. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(4): 323 - 328.
- [2] 周卫祥, 孙德宝, 彭嘉雄. 红外图像序列运动小目标检测的预处理算法研究[J]. *国防科技大学学报*, 1999, 21(5): 57 - 60.
ZHOU Weixiang, SUN Debao. The study of preprocessing algorithm of small moving target detection in infrared image sequences[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1999, 21(5): 57 - 60. (in Chinese)
- [3] Gan Wang, R M Inigo, E S Mevey. A single pixel target detection and tracking system[A]. *IEEE International Conference on Pattern Recognition*[C]. Piscataway: IEEE, 1990. 99 - 103.
- [4] 彭家雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. *电子学报*, 1999, 27(12): 47 - 51.
PENG Jia-xiong, ZHOU Wen-lin. Infrared Background Suppression for Segmenting and Detecting Small Target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 47 - 51. (in Chinese)
- [5] Zhengzhou Li, Nengli Dong, Gang Jin. Dim small target detection in strong undulant clutter background based on adaptive filter[A]. *International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)* [C]. Piscataway: IEEE, 2004. 783 - 787.
- [6] Xiangzhi Bai, Fugen Zhou, Ting Jin, Yongchun Xie. Infrared-small target detection and tracking under the conditions of dim target intensity and clutter background[A]. *SPIE MIPPR: Automatic Target Recognition and Image Analysis and Multispectral Image Acquisition* [C]. Bellingham: SPIE, 2007. 67862M-1-67862M-9
- [7] 张路. 捷联平台成像末制导关键技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学, 2011.
ZHANG Lu. Research on Some Key Techniques For Image Homing Guidance Based on Strap - Down Platform [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] 陈尚峰. 成像末制导目标检测与跟踪技术研究 [D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [9] CHEN Shang-feng. Research on Target Detection and Tracking for Image Homing Guidance [D]. Changsha, Hunan: National

University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

- [10] 孙广富,张兵,卢焕章.基于窗口预测匹配的序列图像点目标轨迹检测算法[J].国防科技大学学报,2004,26(4):25-29.
SUN Guang-fu, ZHANG Bing, LU Huan-zhang. The detection algorithm based on predicting-matching-window for moving point target trajectory in image sequences[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(4): 25-29. (in Chinese)
- [11] 张兵,卢焕章.序列图像中运动点目标轨迹检测算法研究[J].电子学报,2004,9(9):1524-1526.
ZHANG Bing, LU Huan-zhang. The detection algorithm for moving point target trajectory in image sequences[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 9(9): 1524-1526. (in Chinese)
- [12] Tartakovskiy A, Blazek R. Effective adaptive spatial-temporal technique for clutter rejection inIRST[A]. SPIE Proceedings of Signal and Data Processing of Small Targets[C]. Orlando: SPIE, 2000. 85-95.
- [13] 赵菲,张志勇,肖山竹,卢焕章.双预测结构融合的复杂红外图像背景抑制算法[J].国防科技大学学报,2012,34(3):113-118.
ZHAO Fei, ZHANG Zhi-yong, XIAO Shan-zhu, LU Huan-zhang. Two prediction architecture fused complex IR images background suppression algorithm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 113-118. (in Chinese)
- [14] 曲长文,黄勇,苏峰.基于动态规划的多目标检测前跟踪算法[J].电子学报,2006,34(12):2138-2141.

QU Chang-wen, HUANG Yong, SU Feng. Radartrack-before-detect algorithm of multitarget based on the dynamic programming[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2138-2141. (in Chinese)

- [15] 张玉叶,王春歆.基于改进DPA的空间小目标检测算法[J].电子学报,2010,38(3):556-560.
ZHANG Yu-ye, WANG Chun-xin. Spacesmall targets detection based on improved DPA[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 556-560. (in Chinese)

作者简介



赵菲 男,1983年1月出生,甘肃天水人,国防科技大学电子科学与工程学院讲师.从事实时系统与专用集成电路与红外图像处理方面的有关研究.

E-mail: f_z2010@126.com



卢焕章 男,1963年6月出生,湖南桃源人,国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师、863专家组专家.主要研究方向为自动目标识别技术、实时系统与专用集成电路设计.