

文章编号:1001-5078(2007)02-0104-04

红外图像中弱小目标检测前跟踪算法研究综述

张长城, 杨德贵, 王宏强

(国防科技大学电子科学与工程学院, 空间电子信息技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要:文中分析了低信噪比复杂背景中红外弱小目标检测与跟踪的难点, 比较了 DBT 与 TBD 两种检测与跟踪算法的性能, 分析了 TBD 的检测机理, 总结了典型的 TBD 方法, 展望了 TBD 的发展。

关键词:红外; 弱小目标; 低信噪比; 复杂背景; 检测前跟踪

中图分类号:TP751

文献标识码:A

Algorithm Surveys for Dim Targets Track-before-detect in Infrared Image

ZHANG Chang-cheng, YANG De-gui, WANG Hong-qiang

(Institute of Space Electronic Technology, College of Electric Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: The difficulties of dim target detection are analyzed in the paper. The performances of DBT and TBD are compared, and the theory of TBD are analyzed. The main methods of TBD are summarized. In the end, promising direction of the field of TBD is predicted.

Key words: infrared; dim target; low SNR; complicated background; TBD

1 引言

现代战争要求红外探测系统能远距离发现、跟踪威胁目标, 为指挥系统决策和武器系统赢得时间。红外探测系统采用被动方式工作, 具有较强的抗干扰能力, 隐蔽性好, 但作用距离短。由于光学系统的空间分辨率已做到或接近理论极限水平^[1], 比较实际的方法就是通过提高目标检测算法性能, 尤其是弱小目标的检测性能, 弥补红外探测系统作用距离短的不足。“弱”和“小”指的是目标属性的两个方面, 所谓“弱”是指目标红外辐射的强度, 反映到图像上是指目标的灰度; 所谓“小”是指目标的尺寸, 反映到图像上是指目标所占的像素数^[2]。红外弱小目标检测识别难点是: 对比度较低、边缘模糊、信号强度弱, 缺乏纹理、形状、大小等结构信息, 目标极易被噪声所淹没, 单帧检测虚警率高, 多帧处理增加了数据的存储量和计算量, 固定的模板和算子很难有效检测弱小目标。因而, 红外弱小目标检测与跟踪问题成为当前研究的一个热点问题。

本文在综合国内外近年来对红外弱小目标检测与跟踪研究成果基础上, 根据检测与跟踪关系, 对 TBD (track-before-detect) 和 DBT (detect-before-track) 两类算法性能进行了比较, 分析了检测前跟踪算法机理, 重点研究了 TBD 技术, 并指出 TBD 技术的发展方向。

2 检测算法机理

经典的小目标检测与跟踪方法是 DBT, 即先根据检测概率和虚警概率计算单帧图像的检测门限, 然后对每帧图像进行分割, 并将目标的单帧检测结果与目标运动轨迹进行关联, 最后进行目标跟踪。算法流程如图 1 所示。

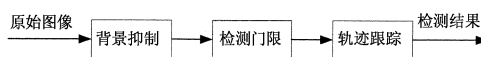


图1 先检测后跟踪算法流程

基金项目:国防预研基金(51401010405KG0170); 国防装备预先研究项目(413010701-2)。

作者简介:张长城(1976-), 男, 国防科技大学硕士研究生, 主要研究方向为红外图像采集处理及目标识别等。

收稿日期:2006-05-31; **修订日期:**2006-07-05

DBT 方法流程直观,算法简单,在信噪比较高 ($>10\text{dB}$) 时检测效果较好,而在低信噪比复杂背景中将会失效^[3],这是由于在低信噪比条件下获取的小目标与背景的灰度相差不大,在目标分割时,如果检测门限过低,会把一部分背景当成目标,检测门限过高,则有可能造成目标丢失^[4]。

目前人们较多采用 TBD 方法来检测图像中低信噪比弱小目标,这种方法对单帧图像中有无目标先不进行判断,而是先对图像中较多的可能轨迹同时进行跟踪,然后根据检测概率、虚警概率和信噪比计算出多帧图像的检测门限进行决策。在低信噪比情况下,TBD 的检测性能优于 DBT,二者性能比较如表 1 所示。

表 1 DBT 与 TBD 检测性能比较

	跟踪前检测方法 (DBT)	检测前跟踪方法 (TBD)
优点	1) 先进行单帧检测 2) 算法简单 3) 实现容易	1) 虚警概率低,检测概率高 2) 抗干扰能力强 3) 适用于低信噪比的弱小目标
缺点	1) 抗干扰能力差 2) 虚警概率高,检测概率低 3) 适用于信噪比较高的小目标	1) 需要多帧检测,算法复杂 2) 计算量大,存储量大 3) 硬件实现较难

TBD 方法概括起来包含三个步骤(如图 2 所示):一是背景抑制,通过滤波将红外图像低频和高频部分进行分离,提高信噪比,尽可能抑制原始图像中的低频背景杂波干扰;二是可疑目标跟踪,利用相邻几帧中目标的运动信息来分割可能目标,从背景抑制后的图像中分割出少量候选目标进行跟踪^[5];三是目标检测,利用序列图像中目标运动的连续性和轨迹的一致性,进一步排除虚假目标,从候选目标中检测出真正的目标。

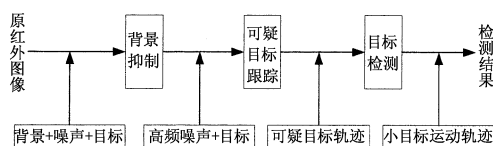


图 2 红外弱小目标 TBD 算法设计流程

3 TBD 典型检测方法

3.1 基于三维匹配滤波器方法^[6]

这种算法是在加性背景杂波及噪声的图像序列中检测已知速度大小和方向目标的最优三维线性匹配滤波器。其原理是:针对目标所有可能的运动情况设计多个滤波器,从中选出输出信噪比最大的滤波器,确定目标位置和运动轨迹。这种方法可以实现多条航迹的同时检测。三维滤波器的典型例子是速度滤波器,当目标航迹的速度与方向已知时,匹配滤波器能很好地从噪声中检测出目标,当目标的速度及航向未知时,检测性能会下降。解决方法是采

用一组滤波器^[7],每个滤波器与空间可能的航迹相对应,通过搜索可检测出直线航迹。文献[8]提出了递推速度匹配器算法,能快速得到目标轨迹的能量,缩短目标检测时间,减小运算量。其优点是检测性能高,缺点是需要大量的匹配滤波器对目标进行检测,而且只适用于作匀速直线运动的固定大小目标。

3.2 基于多级假设检验方法^[9]

多级假设检验 (Multistage Hypothesis Testing, MSHT) 是假设目标作局部匀速直线运动,根据限定的速度及方向,将多个可能的目标轨迹按照“树”的结构组织起来,在树形结构的每一层用假设检验方法对结构进行修正,随时去掉没有通过检验的树,以减少计算量和存储量。检测的方法是:沿着轨迹上的像素灰度累加值与两个门限进行比较,超过上门限的轨迹认为是目标轨迹,低于下门限的轨迹作为噪声轨迹,介于上下门限之间的轨迹继续延伸,在下一帧上进行同样的判断。MSHT 是一种高效算法^[10],计算量小,存储量少,具有同时检测出多个作不同方向直线运动的目标的能力。但在低信噪比下,候选目标轨迹的起始点非常多,导致后面的“树叉”急剧增多,计算量迅速增大,同时在检测过程中会出现检测帧数大于固定长度假设检验算法帧数。Blostein^[11]利用截断序贯算法在检测到第 K 帧时,就做出目标存在与否的硬判断,较好地克服了出现检测帧数大于假设检验算法帧数的问题。

3.3 基于高阶相关方法

高阶相关算法是利用目标轨迹点的时空相关性,计算不同帧之间的高阶相关性,在有噪声的三维图像中检测出直线或曲线轨迹^[12]。检测方法是先将灰度图像通过门限处理变成二值图像,然后逐帧计算相邻两帧之间的相关结果。但在进行高阶相关运算时,若阶数太高,计算量和存储量都增大;若阶数太低,会造成虚警率的上升。文献[13]提出了多阶段目标轨迹融合算法,利用高阶相关滤波器剔除噪声和杂波边缘,有效降低虚警,快速锁定目标。此外,算法的实现依赖于神经网络,伴随跟踪轨迹的加长,神经网络层数增多,导致计算量急剧增长,难以满足实时性的要求。文献[14]提出了有向高阶相关算法,根据目标运动特性,适当增加约束条件,减少了运算量。高阶相关检测方法的优点是不需要关于目标数目、动态信息和起始条件的先验知识,能用于不同杂波密度下的多目标检测;缺点是它处理的是二值图像,没有充分考虑到目标的灰度信息。在转化时,如果阈值过高,则漏警率高;阈值过低,则运算量大。

3.4 基于动态规划方法

动态规划检测方法是由 Barniv 首先提出来的^[15],利用动态规划分段优化的思想,将目标轨迹搜索问题分解为分级优化的问题。该方法依据最大概率准则设定一个评价函数,对评价函数作了一定阶段的递推后,找到所有可能的片断,然后逆向反推,得到可能目标运动轨迹,然后对这些轨迹进行直线拟合,剔除非直线轨迹,并把同一目标产生的轨迹合并,得到检测结果。文献[16]提出的改进动态规划方法不仅简化了搜索累加过程,而且略去了回溯过程,改为并行处理,在保证虚警和检测概率的同时减少了动态规划的计算量和存储量,提高了运算速度。基于动态规划检测方法是基于像素级的操作运算,便于硬件实现,能在低信噪比下检测出做直线运动的点目标轨迹且计算量小,但目标速度未知时,计算过程中所需速度窗参数无法确定,而将速度的参数放宽时,计算量将迅速增大,并导致算法检测性能降低,同时对目标轨迹进行反向跟踪时需要较大的存储量。因此,Tonissen^[17]1996年发表文章指出,动态规划算法在信噪比很低时,无论如何增加帧数都无法提高目标检测的性能。

3.5 基于投影变换方法

投影变换方法是通过某种形式的投影变换或逻辑运算,先将三维空间轨迹检测转化为二维平面轨迹检测问题,然后对二维平面内的轨迹进行搜索,实现能量积累和门限处理。检测方法是每一帧图像经过门限处理,检测出投影在同一个平面上的点,再对投影平面进行门限处理,采取计算量较小的后处理方法检测出目标运动的轨迹,最后采用投影法确定目标轨迹在三维空间的大致范围,将检测出的目标轨迹还原到三维空间进行匹配滤波。文献[18]采用了 Hough 变换的后处理方法来减少计算量。文献[19]、[20]分别提出了一种基于最优分布变换和数学形态的弱点状目标检测技术,将时空三维搜索简化为沿时间轴投影与二维空域搜索,提高了算法处理速度。这种方法的优点是避免投影法因 SNR 的损失造成的处理能力下降,大大减少了三维搜索检测过程中的数据量和存储量,利于硬件实时处理;缺点是在噪声较强和目标帧间位移较大时,检测性能下降得很厉害。

3.6 基于时域滤波方法

时域滤波算法是利用背景杂波、噪声及目标像素点在时间上有着不同的特征来检测弱小目标的。检测方法是当目标经过某一像素点时,靠近该像素

点时会出现幅值上升,离开该像素点时幅值下降,从而出现先升后降的特性,而背景则无此特征,时域滤波正是利用此差别进行检测的^[21]。但时域滤波算法没有充分利用小目标与背景在空间上的特征差别,而且算法要求图像帧速快,否则目标在某像素点只能引起幅值突跳,无法可靠地将目标与噪声进行区分。文献[21]采用长短两个尺度的时域递归滤波器对像素灰度沿时间轴进行滤波处理,降低了计算的复杂度和存在空间。文献[22]提出了一种基于时空域融合滤波的小目标检测算法。算法在空域上利用形态学 Top-hat 滤波抑制背景增强目标,在时域上通过改进帧间差分方法增强运动目标,时空域处理结果融合分割后,根据目标运动的连续性和规则性,利用相邻帧可能目标点之间的位置关系判别目标,较好地克服了时域检测上的局限性。

3.7 基于粒子滤波方法

粒子滤波是英国学者 Cordon, Salmond 等于 1993 年提出来的^[23],又称为序列重要采样法,是一种通过蒙特卡罗积分模拟来实现对贝叶斯滤波递推的技术。检测方法是利用一系列随机样本的加权和表示所需的后验概率密度,得到状态的估计值^[24]。如何得到后验概率分布的样本是粒子滤波的关键,其基本思路是选取一个重要性概率密度来得到后验概率分布的带有相关权值的随机样本,然后在测量的基础上,调整权值的大小和粒子的位置,当粒子数非常大时,此时的概率估算将等同于后验概率密度,从而得到状态的估计值。文献[25]提出一种基于粒子滤波器的红外目标稳健跟踪方法。文献[26]提出用粒子滤波和似然比检测跟踪目标。同上述 TBD 方法相比,粒子滤波算法能够很好地处理强非线性、非高斯问题,可以解决传统的扩展卡尔曼滤波器的非线性误差积累问题,可直接在并行计算机上实现,容易对复杂模型的状态序列估计,比基于高斯假设的扩展卡尔曼滤波(EKF)和无气味滤波(UKF)更具普遍意义,其缺点是:由于采用大量粒子模拟概率分布,运算量很大,如何优化粒子滤波算法、提高运算速度是今后研究的重要方向。

4 结束语

以上几种典型的 TBD 方法均是通过对多帧图像的相关处理,利用目标的运动特性,沿目标轨迹进行能量积累,提高信噪比,达到检测弱小目标的目的。它们的不同点是轨迹相关方法不同,确认准则不同。这些方法的缺点是算法结构较复杂,存储量大,运算量大。但随着芯片工艺和硬件结构的改善,

算法在芯片上的处理速度会越来越快,TBD 算法将是最好的选择。

未来 TBD 算法应在以下方面作进一步研究:

(1) 创新和改进红外弱小目标的检测前跟踪方法,如粒子滤波等非线性估计算法会成为检测前跟踪方法的研究主要方向之一;

(2) 研究多传感器信息融合技术,增大对原始信息的获取能力,提高系统对多种环境的适应能力和检测跟踪水平。如研究实现对 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 红外图像数据进行融合技术,提高检测前跟踪算法性能;

(3) 研究检测前跟踪算法硬件实现技术。为了提高算法的运算速度和鲁棒性,在提高检测概率,降低虚警率的情况下,处理好算法性能与硬件实现的矛盾。

参考文献:

- [1] 杨应槐,石峰. 小目标探测技术研究(上)[J]. 红外与激光技术,1989,(1):17-22.
- [2] 葛成良,等. 红外运动小目标的模拟[J]. 红外技术,2005,27(1):49-54.
- [3] Reed I S, Gagliardi R M, Shao H M. Application of three-dimensional filtering to moving target detection[J]. IEEE Trans. AES,1983,19(2):898-905.
- [4] 杨德贵,庄钊文,黎湘. 复杂背景下红外小目标检测技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(5):563-567.
- [5] 郝晓冉,张有志. 一种序列图像中运动点目标的检测方法[J]. 红外与激光工程,2005,(6):709-712.
- [6] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B. Optical moving target detection with 3-D matched filtering[J]. IEEE Trans. AES,1988,24(4):327-336.
- [7] Pohlig, S C. An algorithm for detection of moving optical targets[J]. IEEE Trans. AES,1989,25(1):56-53.
- [8] 刘志刚,卢焕新,陈辉煌. 一种低信噪比下点目标检测新算法[J]. 系统工程与电子技术. 2004,26(11):1588-1592.
- [9] Steven D Blostein, Thomas S Huang. Detection of small moving objects in image sequences using multistage hypothesis testing[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1991,39(7):1611-1629.
- [10] Blackman, S S. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004,19(1):5-18.
- [11] Blostein S D, Richardson H S. A sequential detection approach to target tracking[J]. IEEE Trans AES, 1994,30(1):197-212.
- [12] Liou R J, Azimi-Sadjadi M R. Detection of dim targets in high cluttered background using high order correlation neural network[A]. IJCNN-91-Seattle International Joint Conference on Neural Networks, 1991, 7(1):701-706.
- [13] 张海英,张田文. 基于多阶段轨迹融合的交叉多目标检测与跟踪算法[J]. 电子学报,2005,33(6):1109-1112.
- [14] Liou R, Azimi-Sadjadi M R. Multiple target detection using modified high order correlation[J]. IEEE Trans. AES, 1998,34(2):553-568.
- [15] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Trans. AES, 1985, 21(1):144-156.
- [16] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1):228-241.
- [17] Tonissen S M, Evans R J. Performance of dynamic programming techniques for track-before-detect[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32:1440-1451.
- [18] 黄勇,曲长文,苏峰. 基于 Hough 变换的检测前跟踪算法的性能分析[J]. 现代雷达,2004,26(12):37-41.
- [19] Askar H, Li Zai ming. A dim moving point target detection technique based on distribution transform method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003,25(1):103-106.
- [20] ZHANG Fei, LI Cheng-fang, SHI Li-na. Algorithm based on mathematical morphology for dim moving point target detection[J]. Optical Technique, 2004, 30(5):600-602.
- [21] Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing[J]. IEEE Trans. AES, 2002,38(2):570-585.
- [22] Jiang Tao, Wang Yong-zhong. Point target detection based on dual-recursive-mean filter[J]. Electronics optics & control,2004,11(3):8-11.
- [23] Cordon N J, Salmond D J, Smith A F. Novel approach to nonlinear/non-gaussian Bayesian state estimation[A]. Proc. of the Radar and signal Processing,1993,107-113.
- [24] Salmond D J, Birch H. A particle Filter for Track-before-detect[C]. //IEEE Proceedings of the American Control Conference. Washington 2001:3755-3760.
- [25] 程建,等. 基于粒子滤波的红外目标跟踪[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(2):113-117.
- [26] 胡洪涛,敬忠良,胡士强. 基于辅助粒子滤波的红外小目标检测前跟踪算法[J]. 控制与决策,2005,20(11):1208-1211.