

复杂背景下红外运动点目标检测算法研究*

李正周, 董能力, 金 钢

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 讨论了复杂背景下低信噪比运动点目标的检测和跟踪问题, 提出了基于卡尔曼滤波理论的背景预测、数学形态学膨胀累加、图像流航迹关联和二级并行假设检验的点目标检测方法。实验结果表明该算法能够较大程度提高红外图像的信噪比, 有效地检测和跟踪点目标, 并且能够解决目标丢失以及跟踪过程中出现目标的问题。

关键词: 点目标检测; 卡尔曼滤波; 形态学滤波; 图像流分析; 假设检验

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2002)05-0410-05

Study on algorithm of point moving target detection in infrared image sequence with complex background*

LI Zheng-zhou, DONG Neng-li, JIN Gang

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Detection of low signal noise ratio small even point moving target in the condition of complicated background is discussed. A new approach based on Kalman filter, mathematical morphology, motion analysis and two stage hypothesis testing to detect and track point target in such condition is presented. The experiment results with real IR image sequence show that the proposed method can greatly improve the SNR, and effectively detect and track the moving point targets. It can especially dissolve the problems that the targets miss and new targets occur during the detecting and tracking.

Key words: Point target detection; Kalman filter; Morphology filtering; Image flow analysis; Hypothetical test

收稿日期: 2002-01-16; 修订日期: 2002-04-12

* 基金项目: 国家“八六三”计划光束控制重点实验室资助项目(863-410)

作者简介: 李正周(1974-), 男, 重庆市人, 博士生, 主要从事目标检测与 DSP 应用研究工作。

1 引言

利用红外成像实现自动目标检测、识别与跟踪是精确制导武器的主要技术发展方向。红外传感器受到大气热辐射和作用距离远以及探测器噪声等因素的影响,用其探测到的目标在红外图像上多呈现为对比度低的弱小目标,甚至为点目标,并且淹没在噪声中。复杂背景下低信噪比点目标检测是精确制导武器系统中的关键技术之一,是提高武器系统性能的关键。点目标探测在民用方面应用也很广泛,如天文观测、粒子碰撞、森林预警以及遥感等。

点目标没有形状、尺寸、纹理等特征信息,难以运用检测面目标的方法^[1]。点目标的检测在背景复杂或者对比度很低以及存在强噪声的情况下相当困难,尤其是在没有先验知识的复杂背景下更加困难,一直是目标检测中亟待解决的课题。目前,点目标检测方法较多:基于图像纹理分析的局部熵检测^[2]、采用多级假设的动态规划^[3]和小波分析^[4]等方法,但受到背景、运动轨迹以及系统抖动等因素影响,上述方法的检测性能或多或少要受到影响。

制约复杂背景下点目标检测的因素很多,其中信噪比低、目标和背景信息缺乏以及系统抖动等是关键因素。提高点目标检测性能必须结合目标的灰度信息和运动信息,对图像序列进行分析。目标增强是检测算法的关键。针对以上因素,提出了基于卡尔曼滤波理论的背景预测、数学形态学膨胀累加、图像流航迹关联和二级并行假设检验的方法。基于卡尔曼滤波理论的背景预测,能够有效地抑制相对目标运动缓慢的背景;膨胀累加能够减小系统抖动或者目标快速运动造成的目标能量积累的影响,增强小目标;基于运动连续性的图像流航迹关联法能从候选目标中识别出真实目标;二级并行假设检验能够在目标丢失的情况下,刷新候选目标库,重新找回目标。

2 目标探测性能指标

探测概率(P_{DET})和虚警概率(P_{FA})是衡量探测

系统性能的主要指标,通常采用恒虚警概率条件进行判断。探测概率和虚警概率数学表达式如下^[5]:

$$P_{\text{DET}}(x) = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\text{SNR} - \text{TNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1)$$

$$P_{\text{FA}}(x) = 0.5 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\text{TNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (2)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (3)$$

$$\text{SNR} = (f_T - u) / \delta_I \quad (4)$$

$$\text{TNR} = V_{\text{th}} / \delta_I \quad (5)$$

式中 f_T ——点目标的灰度极值;
 u ——图像灰度均值;
 δ_I ——图像灰度标准差;
 SNR ——信噪比;
 TNR ——阈值噪声比;
 V_{th} ——阈值。

3 目标检测算法

整个算法要经过连续的6个步骤:基于卡尔曼滤波的背景预测、阈值分割、膨胀累加平均、二次分割、图像流航迹关联和二级并行假设检验。

3.1 基于卡尔曼滤波的背景预测

点目标是灰度奇异点,而灰度奇异点还包括强噪声干扰。参考文献[6]中采用 5×5 窗口的均值低通滤波器,再与原始图像进行比较,这种方法对背景的适应性和探测效率不理想。Choi Jae-Ho等人提出基于卡尔曼滤波理论的时间递归方法来预测背景^[7]。这种方法是基于这样的事实:背景在帧间的变化较目标在帧间的变化要缓慢一些,可以采取学习的方法来预测背景。背景递归预测公式为:

$$I_b(i, j, k+1) = I_b(i, j, k) + g(i, j, k) \times [I(i, j, k) - I_b(i, j, k)] \quad (6)$$

式中 i, j ——一个像素的坐标;

k ——时间坐标及帧号;

$I_b(i, j, k)$ —— k 帧时的背景特征;

$I(i, j, k)$ —— k 帧时的图像特征;

$g(i, j, k)$ ——增益因子。

$g(i, j, k)$ 的表达式为:

$$g(i, j, k) = \lambda M(i, j, k) + \mu [1 - M(i, j, k)] \quad (7)$$

式中 λ 和 μ ——介于 0 和 1 之间的常量, 决定了背景预测的自适应特征;

$M(i, j, k)$ ——二值化轮廓。

λ 必须足够小, 以便运动点目标能够从背景序列中有效地分离出来; μ 必须大于 λ , 表征背景变化快慢。

由于预测背景中不包括目标, 目标可以通过比较输入图像序列与预测背景检测出来。

$$D(i, j, k) = |I(i, j, k) - I_b(i, j, k)| \quad (8)$$

选择一个恰当的阈值将产生一个二值化的目标轮廓, 阈值 T 可以通过恒虚警率计算。

$$M(i, j, k) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } D(i, j, k) \geq T \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

算法的详细过程见参考文献[7]和[8]。

3.2 膨胀累加平均

当目标在帧间的移动很小时, 直接采用多帧图像累加的方法可以有效地抑制噪声, 提高信噪比。但对于由于系统不平稳引起的帧间抖动和运动速度较大的点目标来说, 直接累加并不能实现目标能量的有效积累。参考文献[1]和[9]采用在目标运动方向进行滑动累加是较难实现的, 因为没有目标运动方向的信息。文中首先对图像进行形态膨胀, 将目标由一个点膨胀为一个斑点, 从而使不同帧的目标能量能够有效累加。

膨胀运算为基本的形态膨胀算法。结构函数 $g(x)$ 对函数 $f(x)$ 的膨胀运算记为 $f \oplus g$ 。

$$(f \oplus g)(x) = \max_{y \in D(g)} \{f(x-y) + g(y)\} \quad (10)$$

$D(g)$ 表示结构函数 $g(x)$ 的定义域。二维膨胀运算定义为:

$$f_d(i, j) = (f \oplus g)(i, j) = \max_{k, l \in D(g)} \{f(i-k, j-l) + g(k, l)\} \quad (11)$$

结构元素的形状和大小根据目标在帧间移动或抖动情况来选取。

对膨胀后的图像采用多帧累加, 每次累加的帧数为 N , 则累加平均后的图像表示为:

$$\bar{f}_d(i, j, k) = \frac{1}{N} \sum_{t=k}^{N+k-1} f_d(i, j, t) \quad (12)$$

经 N 帧累加平均后, 目标点和噪声点的均值保持不变, 而信噪比却提高了 \sqrt{N} 倍。积累的帧数将根据系统抖动、目标运动速度以及结构元素尺寸进行选取。当系统抖动较大、目标运动较快以及结构元素尺寸较小时, 积累的帧数不宜过大。

对膨胀平均后的图像进行二次分割, 能够进一步筛选出最具可能的目标候选点。阈值仍然可以根据恒虚警率计算出来。

3.3 图像流分析与航迹关联

为了对运动目标进行有效地检测, 必须利用多帧图像的运动信息, 将目标的运动特征和运动轨迹的连续性、一致性结合起来考虑。图像流分析法通过分析图像序列中的像素的速度场分布来检测目标的运动轨迹^[1]。

场景中模式的运动在图像平面上投影产生的速度场称为图像流, 它反应了目标运动的连续性。图像流约束方程是图像流分析的基础, 它建立了图像平面上任意一点 (i, j) 图像辐射时空梯度变化与该点瞬时速度 (u, v) 之间的关系式。设 $I(i, j, t)$ 表示在 t 时刻图像平面中点 (i, j) 上的图像灰度, 图像流约束公式为^[10]:

$$I_{xx}u + I_{yy}v + I_t = 0 \quad (13)$$

式中 I_x, I_y 和 I_t 分别表示灰度函数 $I(i, j, t)$ 在点 (i, j) 关于 x, y 和 t 上的偏导;

u, v ——目标在 x, y 轴上的速度分量。

图像流约束公式中, I_x, I_y 和 I_t 可以用图像序列中相邻两帧图像两个以上相邻位置关于方向和时间的二阶差分来估算。如果采用两个点来计算, 所得到的速度值将由于实际灰度受噪声影响, 包括背景噪声和量化噪声, 不能得出平稳解。因此, 通常选取的点数大于 2 个点, 一般情况下, 选为 4 个点。下列为 I_x, I_y, I_t 估计值:

$$I_x = \{ [I(i+1, j, t) - I(i, j, t)] + [I(i+1, j+1, t) - I(i, j+1, t)] + [I(i+1, j, t+1) - I(i, j, t+1)] + [I(i+1, j+1, t+1) - I(i, j+1, t+1)] \} / 4 \quad (14)$$

$$I_y = \{ [I(i, j+1, t) - I(i, j, t)] + [I(i+1, j+1, t) - I(i+1, j, t)] + [I(i, j+1, t+1) - I(i, j, t+1)] + [I(i+1, j+1, t+1) - I(i+1, j, t+1)] \} / 4 \quad (15)$$

$$I_t = \{ [I(i, j, t+1) - I(i, j, t)] + [I(i+1, j, t+1) - I(i+1, j, t)] + [I(i, j+1, t+1) - I(i, j+1, t)] + [I(i+1, j+1, t+1) - I(i+1, j+1, t)] \} / 4 \quad (16)$$

由于图像流法只适用于具有一定形状的刚体目标, 对于点目标不适用^[1]。在使用图像流方程式时需要对潜在的目标点进行适当的膨胀, 即以待识别目标点为中心向四周膨胀 1~2 个像素, 形成一个小目标区域。

图像流约束方程组:

$$\begin{pmatrix} I_{x1} & I_{x2} & I_{x3} & I_{x4} \\ I_{y1} & I_{y2} & I_{y3} & I_{y4} \end{pmatrix}^T (u \quad v)^T = \begin{pmatrix} -I_{t1} & -I_{t2} & -I_{t3} & -I_{t4} \end{pmatrix}^T \quad (17)$$

该方程组用矩阵表示为:

$$GU = g_t \quad (18)$$

那么, 该矩阵最小二乘解为:

$$U = (G^T G)^{-1} G^T g_t \quad (19)$$

在连续的多帧图像中, 运动目标和噪声点表现出不同的性质: 目标点由于运动的连续性, 与之相对应的图像流具有一定连续性, 同一目标运动轨迹上的各点, 它们的运动约束直线必然在速度平面上交于公共的一点; 而噪声是随机涨落的, 同一噪声点在连续的多帧图像中不可能连续出现, 运动约束直线不可能相交于一点, 不可能产生聚类^[10]。得到候选目标点的速度场后, 就可根据目标像素在图像序列中运动的连续性和轨迹的一致性原理, 在多帧连续图像中检测出真实的目标。

图像流约束方程是在图像连续情况下的一阶近似。数字图像受到量化误差等因素影响, 计算出来的速度存在偏差。

3.4 二级并行假设检验

在实际的目标检测和跟踪过程中, 由于各种原因会造成目标在某帧图像或者某连续几帧图像中出现丢失, 这给目标检测造成了极大的困难, 最终甚至无法检测出目标。造成这种现象的原因是由于某几帧的失误将真实的目标从候选目标库里删除或者是候选目标库里没有记录下真实目标, 而且候选目标库没有及时得到修正。因此, 提出用二级并行假设检验解决该问题。

在处理过程中, 对当前帧图像中可能目标的验证采用了两个并行的目标库: 一个是由整个图像建立起来的目标库, 称为主目标库, 另外一个是由连续 N 帧图像建立的候选目标库, 称为从目标库, 从目标库经过连续 N 帧图像后就刷新一次。在发现从目标库有可能目标, 而主目标库没有该可能目标时, 就将可能目标添加到主目标库, 并不断地修正主目标库。

4 仿真结果与分析

实验采用大小为 128×128 , 以天空为背景的红外图像序列。图像序列有云层起伏, 且目标在中间几帧要穿越云层。图像的平均灰度为 102.26, 背景灰度

最大值是 117,最小值是 90,目标的灰度值为 108,信噪比约为 1.942,点目标连续运动。目标存在抖动,抖动最严重的一帧达到 3 个像素。图像的噪声主要包括背景噪声以及具有一定方向的红外扫描噪声。

在背景预测过程中,取 $\lambda=0.05$, $\mu=0.5$;在求取阈值时,采用恒虚警率 $P_{FA}=0.02$;膨胀累加选取的结构元素是 4×4 的正方形。图 1 是第 3 帧原始红外图像,有云层起伏。图 2 是预测误差图像。图 3 是预测比较分割后的图像,噪声和目标混在一起很难分辨。图 4 是目标在第 20 帧时由于目标被云层遮挡且分割不当发生丢失。图 5 是第 25 帧时重新找回了目标,其中方框内部的白点为目标。图 6 是采用本算法最终探测到的点目标。



图 1 原始图像

Fig. 1 Original image



图 2 预测误差图像

Fig. 2 Predicted error image



图 3 预测分割图像

Fig. 3 Predicted segmented image



图 4 第 15 帧时目标丢失

Fig. 4 Target miss in the 15th frame

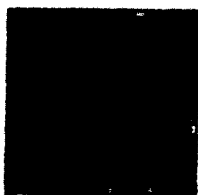


图 5 第 20 帧时找回目标

Fig. 5 Target re-find in the 20th frame

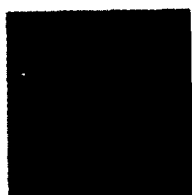


图 6 检测结果

Fig. 6 The result of detection

复杂背景和信噪比低等现象的分析以及实验仿真,基于卡尔曼滤波的背景预测、膨胀累加和图像流轨迹检测方法对增强点目标、提高图像的信噪比和目标的检测性能具有较好的效果。得出以下结论:

(1) 基于卡尔曼滤波的背景预测方法能够较好地解决背景复杂对点目标探测的影响,并且对不同背景具有较好的适应性。

(2) 形态膨胀累加平均为解决因系统抖动、目标快速运动造成的目标在帧间偏移过大,目标能量不能有效积累提供了较为有效的方法,对提高目标信噪比有较好的效果。

(3) 基于运动连续性的图像流航迹关联法对判断点目标运动轨迹、识别点目标具有较好的效果。

(4) 二级并行假设检验能够有效解决目标丢失问题,并重新找回目标,具有较强的稳健性。

该算法在分析难点的基础上提出相应的解决措施,对较早发现目标有一定的作用。

参考文献:

- [1] 李智勇,沈振康,杨卫平,等. 动态图像分析[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 王广君,田金文,柳健. 基于局部熵的红外图像小目标的检测[J]. 红外与激光工程,2000,29(4):26-29.
- [3] 李红艳,吴成柯. 一种快速序列图像低信噪比点目标的检测与跟踪方法[J]. 西安电子科技大学学报,1999,26(6):732-736.
- [4] 李国宽,彭嘉雄. 基于小波变换的红外成像弱小目标检测方法[J]. 华中理工大学学报,2000,28(5):69-71.
- [5] Hansen H, Hansen G, Cyrus Elyashar. Adaptive threshold adjustment and control[A]. SPIE Signal and Data Processing of Small Targets[C]. 1989, 1096. 44-54.
- [6] 周卫祥,孙德宝. 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.
- [7] Choi Jae-ho, Jang Jong-whan, Lee Seung-phil, et al. Multiple moving object estimation in image sequences of natural scene[J]. Opt Eng, 1997, 36(8):2176-2183.
- [8] 沈宇键,何昕,郝志航. 图像序列中检测运动小目标的递归算法[J]. 光电工程,2000,27(2):9-13.
- [9] 刘建秩,卢伟,余松煜,等. 低信噪比序列图像中目标检测、识别及跟踪算法的研究[J]. 红外与激光工程,1996, 25(4):27-33.
- [10] 彭嘉雄,彭铁. 弱目标检测的图像流法[J]. 红外与激光工程,1996,25(4):34-40.

5 结论

通过对红外序列图像点目标跟踪过程中的抖动、