

基于 TBD 的粒子滤波红外点状运动目标跟踪算法研究*

于伟俊, 艾斯卡尔

(新疆大学 信息科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 提出了一种新的低信噪比红外序列图像运动点目标检测与跟踪算法, 该算法有机地结合了 TBD 检测算法与粒子滤波跟踪算法。首先通过多帧 TBD 处理后, 检测出运动目标的初始位置和运动速度, 然后在跟踪阶段采用粒子滤波算法估计目标运动状态, 可实现信噪比为 2 的点目标的检测与跟踪。对真实红外图像序列进行实验仿真, 仿真结果证明, 该算法具有良好的实时性与很高的精确性。

关键词: 点目标; 粒子滤波器; 序列图像; 跟踪

Algorithm based on the particle filter infrared TBD point moving target tracking

YU Wei Jun, Askar

(College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: This paper presents a new low SNR infrared image sequences point target detection and tracking algorithm, the algorithm organically combines TBD detection algorithm with particle filter tracking algorithm. Through the first multi-frame TBD processed, the detection of moving objects initial position, velocity, and then tracking phase is estimated using particle filter target state, achievable signal to noise ratio is 2 points target detection and tracking. The infrared image sequences are actualized in experimental. The simulation results show that the algorithm has a good real-time with high accuracy.

Key words: point target; particle filter; image sequences; tracking

序列图像中检测和跟踪微弱点状运动目标, 因其对空中或地面的远程监控系统的重要意义而成为一个研究热点。远距离目标在视场中常常是以小目标的形态出现, 且对比度一般都很低, 从而给可靠、稳定地检测并跟踪目标带来很大困难。经典的红外目标跟踪方法主要有模板匹配法^[1]、Kalman Filter 和 Extended Kalman Filter 法^[2]等。模板匹配法是一种简单易行的目标跟踪方法, 但匹配过程的搜索空间会随着图像大小和模板大小的增加而急剧增大, 从而降低目标跟踪的效率。Kalman Filter 是有效的线性最优估计技术, 但不能处理非线性和非高斯的情况。然而在含杂波的红外图像序列中, 红外目标的状态估计通常是非线性和非高斯的。为了处理非线性估计问题, 人们提出了 Extended Kalman Filter 状态估计技术, 但其状态估计的有效性仍严重依赖系统模型的精确性, 而建立精确的系统模型是非常困难的。近年来, 为了更好地处理非线性和非高斯情况下的动态系统状态估计问题, 人们提出了粒子滤波 (Particle Filter)^[3-5]。

粒子滤波又叫 Bayesian Bootstrap Filter 或 Monte Carlo Filter, 是以 Monte Carlo 随机模拟理论为基础, 将系统状态后验分布用一组加权随机样本表示, 新的状态分布通过这些随机样本的 Bayesian 迭代进化产生。

本文在参考文献[6]的基础上研究了在序列图像中对弱点状运动目标的检测跟踪技术。提出了一种新的低信噪比红外序列图像运动点目标检测与跟踪算法, 该算法有机地结合了多帧 TBD 检测算法与粒子滤波跟踪算法。首先通过多帧预处理后, 检测出运动目标的初始位置、运动速度, 以此作为粒子滤波器的先验概率, 然后在跟踪阶段采用粒子滤波算法估计目标在下一单帧运动状态。在跟踪精度得到保证的情况下, 实时性也得到了很好的满足。

1 多帧检测 TBD 过程

通过杂波抑制处理后, 虽然图像序列的信噪比得到了大幅度提高, 但是还不足以检测微弱点状运动目标。为进一步提高信噪比, 使检测微弱点状运动目标成为可能, 在检测器前需要加入 TBD 过程。这样, 原来基于单帧的检测器变成了基于多帧的检测器。多帧搜索与检测

* 国家自然科学基金资助项目(No.60507005); 新疆维吾尔自治区教育厅高校科研计划科学研究重点资助项目(No.XJEDU2005104)

系统的基本任务是从给定的一段三维(二维空间,一维时间)图像空间中,发现目标并给出目标的位置和运动速率。首先对两帧图像进行差分,以消除背景影响,之后对差分图像进行归一化、平方、求和等变换,构造出组合帧,其组合方式如图1所示。在组合帧 f_c 内,点运动目标将留下一段轨迹,可以假设在短时间内,目标轨迹为一段直线。对组合帧图像中的每个像素点,定义一个 $n \times n$ 的小领域,在邻域内,按四个方向搜索运动轨迹,如图2所示。将搜索方向上的像素值进行累加,计算出目标的初始位置和速度。

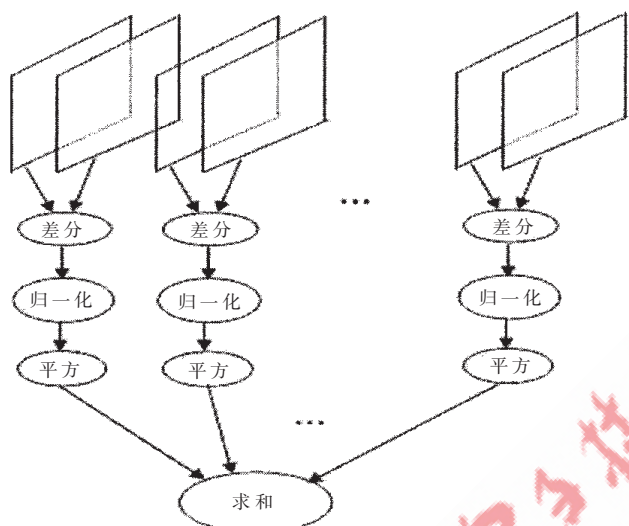


图1 组合方式

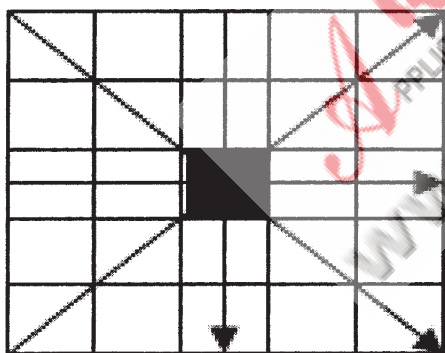


图2 邻域搜索方向

2 粒子滤波

2.1 跟踪模型

目标距离远,假定微弱点状目标在短时间内做匀速运动,则一步跟踪模型可以表示为状态方程:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}(k)w(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{X}(k) = [x(k), v_x(k), y(k), v_y(k)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T^2/2 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^2/2 & T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{X}(k)$ 为状态向量, T 为目标在 k 时刻的位置, $(v_x(k), v_y(k))$ 为目标在 k 时刻的运动速度, T 为图像样本间隔; $w(k)$ 为在 k 时刻的零均值白噪声过程。 $w(k)$ 的相关矩阵定义为:

$$\mathbf{Q}(k) = \mathbf{E}(w(k)w^T(k)) \quad (5)$$

2.2 测量模型

含有小目标的红外场景图像($M \times N$ 像素)可以描述为:

$$f(i, j, k) = f_T(i, j, k) + f_B(i, j, k) + n(i, j, k) \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \quad (6)$$

式中, $f(i, j, k)$ 是第 k 帧像素点 (i, j) 的灰度值; $f_T(\cdot)$ 和 $f_B(\cdot)$ 分别是目标及背景的幅值, $f_B(\cdot)$ 可以采用数学形态学滤波获取; $n(\cdot)$ 是测量噪声。

目标信号模型为:

$$f_T(i, j, k) = \sum_l^{Num(k)} A_l(k)h(i, j, x_l, y_l) \quad (7)$$

式中: $A_l(k)$ 是目标峰值强度,在较短时间内可以认为是常值; (x_l, y_l) 是目标像素位置; $Num(k)$ 是图像中目标的个数; $h(\cdot)$ 是点扩散函数(PSF)。红外小目标的PSF可以近似表示为二维的截断高斯函数:

$$h(i, j, x, y) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(i-x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(j-y)^2}{2\sigma_y^2}\right) & |i-x| < 3, |j-y| < 3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\sigma_x = \sigma_y = 1$ 。采用图像白化技术,得到新的测量方程:

$$z(i, j, k) = s(i, j, k) + v(i, j, k) \quad 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N \quad (9)$$

3 基于粒子滤波的红外目标跟踪算法

在粒子滤波理论框架下,红外目标跟踪算法的基本步骤为:初始化、重采样、状态转移和观测模型(即样本权值)计算。

(1) 初始化: $t=0$ 时,通过多帧检测后,得到目标的初始状态,以此作为先验 $p(x_0)$ 分布。根据先验分布 $p(x_0)$

建立初始状态样本 $\left\{x_0^{(n)}, \frac{1}{N}\right\}_{n=1}^N$ 。

(2) 重采样:根据样本的权 $\omega_t^{(n)}$,从样本集 $\{x_t^{(n)}, \omega_t^{(n)}\}_{n=1}^N$ 重新抽取 N 个样本,具体过程如下:

- ① 计算样本集 $\{x_t^{(n)}, \omega_t^{(n)}\}_{n=1}^N$ 的累积权值, $c_t^{(n)} = c_t^{(n-1)} + \omega_t^{(n)}$;
- ② 产生 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 u ;
- ③ 在样本集中搜索使 $c_t^{(j)} \geq u$ 的最小 j ,并令 $x_t'^{(n)} = x_t^{(j)}$ 。
- (3) 状态转移:根据(1)式和样本 $x_t'^{(n)}$,计算样本 $x_{t+1}^{(n)}$ 。
- (4) 样本的权值计算:根据序列重采样法计算样本 $x_{t+1}^{(n)}$

的权值 $\omega_{t+1}^{(n)}$,并归一化 $\omega_{t+1}^{(n)} = \frac{\omega_{t+1}^{(n)}}{\sum_l \omega_{t+1}^{(l)}}$ 。

(5)令 $t=t+1$, 返回步骤(2)。

4 实验结果及分析

实验中, 将一幅红外天空图像作为背景, 叠加 1 个点状运动目标, 并加入高斯白噪声, 组成一段图像序列 (200 帧)。图 3 给出了该序列图像中的一帧, 在该帧中, 肉眼几乎不能判别出点目标的位置。在实验中, 取跟踪窗为 5×5 , 单帧检测算法虚警概率为 $P=10e-6$, $SCNR=2$ 。图 4、图 5 分别为第 50 帧、180 帧的跟踪情况。图 6 和图 7 分别是 PF-TBD 和 EKF-TBD 的 x 轴、 y 轴目标运动随时间坐标的方差变化图, 跟踪精度约为 0.5 个像素 (均方意义下)。可以看到检测跟踪在 PF-TBD 模式下, 滤波器的收敛性优于 EKF-TBD 模式。

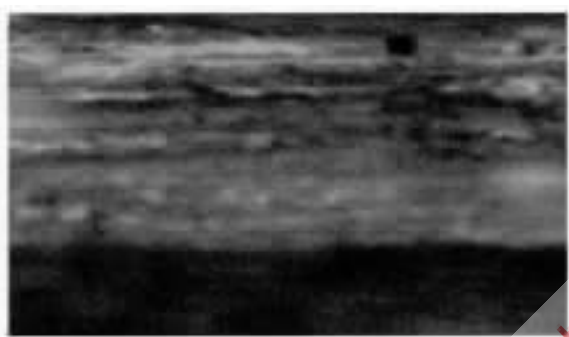


图 3 实验序列图像中的一帧



图 4 第 50 帧跟踪情况

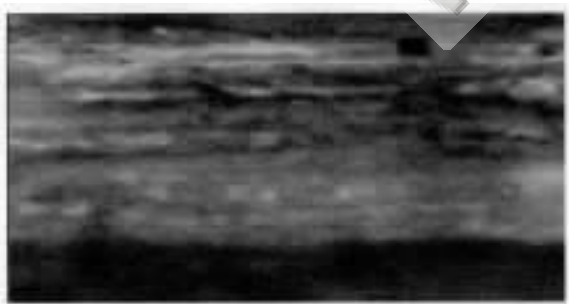


图 5 第 180 帧跟踪情况

本文研究了基于多帧 TBD 的粒子滤波红外点动目标跟踪技术, 并将其应用于跟踪红外序列图像中的弱点状动目标, 实验结果表明, 基于多帧 TBD 检测的粒子滤波跟踪模型在跟踪精度得到保证的情况下, 实时性也得到了很好的满足, 适用于对序列图像中的弱点状动目标的跟踪。

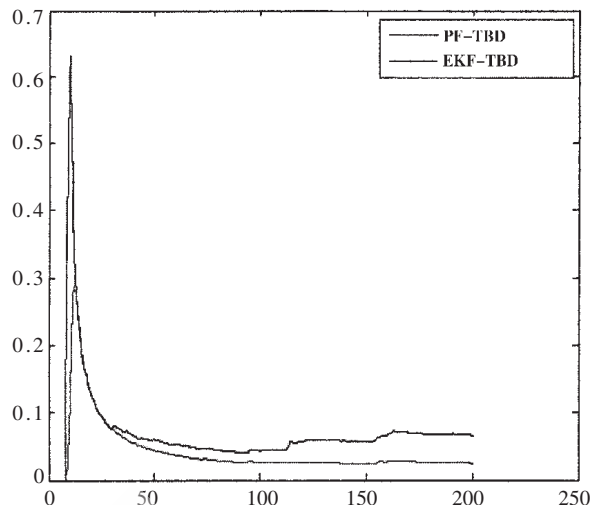


图 6 x 轴方向目标运动坐标的方差变化

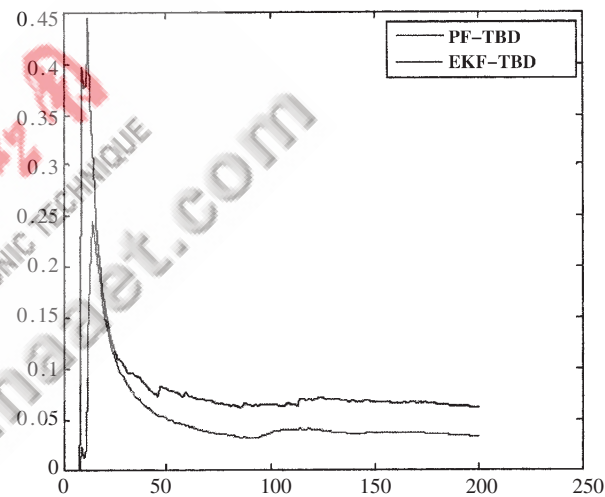


图 7 y 轴方向目标运动坐标的方差变化

参考文献

- [1] 杨噪响, 张桂林. 一种新的相关跟踪算法的设计与实现 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(5): 377-380.
- [2] 凌建国, 刘尔琦, 杨杰, 等. 基于 H_{∞} 滤波器的红外小目标运动预测和跟踪方法. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 366-369.
- [3] GORDON N J, SALMOND D J, SMITH A F M. Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation [J]. IEE Proceedings-F, 1993, 140(2): 107-113.
- [4] DOUCET A, GODSILL S, ANDRIEU C. On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering [J]. Statistics and Computing, 2000, 10(3): 197-208.
- [5] KWOK C, FOX D, MEILA M. Real-time particle filters [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 469-1484.
- [6] ASKAR H, LI Xiao Feng, LI Zai Ming. Performance analysis of dim moving point target detection algorithms [A]. International Conference on Communications, Circuits and Systems and WestSino Expositions, 2002 IEEE[C]. 2002, 2: 229-242 (收稿日期: 2007-11-06)