Vol 20 No. 11

and Decision

文章编号: 1001-0920(2005)11-1208-04

基于辅助粒子滤波的红外小目标检测前跟踪算法

Control

胡洪涛, 敬忠良, 胡士强

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030)

摘 要:研究低信噪比复杂环境下的红外小目标检测和跟踪问题,提出了基于辅助粒子滤波的检测前跟踪算法 首 先使用形态学滤波算法对图像进行白化预处理;然后在跟踪阶段采用辅助粒子滤波算法估计目标运动状态,在检测 阶段利用跟踪滤波器的输出构造似然比,并进行似然比检验 对真实红外图像序列的实验表明,该算法可成功跟踪和 检测信噪比为2的小目标,且其性能优于传统的检测前跟踪算法 关键词:检测前跟踪;辅助粒子滤波;红外图像序列;小目标

中图分类号: TN 911. 73 文献标识码: A

Auxiliary Particle Filter Solution to Track-before-detect for Small Infrared Targets

HU Hong-tao, J IN G Zhong-liang, HU Shi-qiang

(School of Electrical and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China Correspondent: HU Hong-tao, E-mail: hht@sjtu edu cn)

Abstract The problem of detecting and tracking dim small targets in a sequence of infrared images with very low SNR and complex background is investigated A track-before-detect algorithm for small target is developed based on auxiliary particle filter. In the proposed algorithm, firstly, morphological filtering is performed on image for prew hitening Then, the auxiliary particle filter is used to estimate the state of the target in track stage Finally, some values of the filter's output are used to approximately construct the likelihood ratio for hypothesis test in detection stage Experimental results with the real image sequences verify that the proposed algorithm can successfully detect and track small target with SNR equaling to about 2 0, and the performance is better than traditional track-before-detect algorithm.

Key words: Track before detect; A uxiliary particle filter; Infrared in age sequences; Small target

1 引 言

低信噪比复杂背景中的红外小目标检测和跟踪问题一直难以解决^[1] 近 20 年来,基于检测前跟踪 (TBD)的方法成为解决此问题的主要研究方向,其 代表性方法有:三维匹配滤波器法^[2],截断序贯似然 比检测法^[3],动态规划法^[4],基于图像像素的统计 法^[5]等 上述算法虽然具有较好的检测性能,但跟踪 性能较弱,如要提高跟踪性能,还需通过卡尔曼滤波 等方法进一步跟踪 为此,Boers 等^[6]提出了基于粒 子滤波的TBD 思想,大大提高了跟踪性能

本文在文献[6]的基础上,研究红外图像序列中 小目标检测和跟踪问题,提出了基于辅助粒子滤波 的红外小目标TBD 算法(APF-TBD).该算法在跟 踪阶段采用辅助粒子滤波技术估计目标状态,在检 测阶段利用辅助粒子滤波器的输出构造似然比,然 后采用似然比假设检验方法判断有无目标 同传统 的TBD 方法相比,该方法能够很好地处理非线性, 非高斯问题,具有易于实现等特点,粒子容易结合目

- 收稿日期: 2004-11-15; 修回日期: 2005-04-19.
- **基金项目**:国家自然科学基金项目(60375008);高校博士点基金项目(20020248);上海市科技攻关重大预研项目 (035115009).
- 作者简介: 胡洪涛(1977—), 男, 河北邢台人, 博士生, 从事航空航天综合信息处理的研究; 敬忠良(1960—), 男, 四川南部人, 教授, 博士生导师, 从事信息融合与目标识别, 航空航天综合信息处理与控制等研究

标点扩散函数、运动模型等,给出较好的跟踪精度, 在检测阶段,避免了速度不匹配的情况,具有较好的 弱小目标检测性能

2 红外图像数据模型

21 测量模型

含有小目标的红外场景图像(*M* × *N* 像素)可以描述为

$$f(i, j, k) = f_{T}(i, j, k) + f_{B}(i, j, k) + n(i, j, k),$$
1 i M, 1 j N. (1)
式中: $f(i, j, k)$ 是第 k 帧像素点(i, j) 的灰度值;
 $f_{T}(\bullet)$ 和 $f_{B}(\bullet)$ 分别是目标及背景的幅值, $f_{B}(\bullet)$ 可
以采用数学形态学滤波获取^[5]: $n(\bullet)$ 是测量噪声

目标信号模型为

$$f_{T}(i,j,k) = \int_{a}^{\operatorname{Num}(k)} A_{I}(k) h(i,j,x_{I},y_{I}). \quad (2)$$

式中:*A*₁(*k*) 是目标峰值强度, 在较短时间内可以认 为是常值; (*x*₁, *y*₁) 是目标像素位置; N um (*k*) 是图像 中目标的个数; *h*(•) 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

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

0, o therw ise.

式中 $\sigma_{c} = \sigma_{r} = 1$. 采用图像白化技术, 得到新的测量 方程

$$z(i, j, k) = s(i, j, k) + v(i, j, k).$$
(4)

式中 v (•) 是均值为 0, 方差为 1 的高斯噪声

2 2 目标运动模型

目标距离远、周期短的运动可近似认为匀速运动,目标状态方程可以表示为

$$X (k + 1) = FX (k) + Gw (k),$$
 (5)

式中

$$X (k) = \begin{bmatrix} x (k) \\ x'(k) \\ y (k) \\ y'(k) \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} T^{2}/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^{2}/2 \\ 0 & T \end{bmatrix},$$

置和速度, T 为两次采样间的连续帧数, w(k) 是零 均值方差为Q 的高斯噪声

3 基于辅助粒子滤波的 TBD 算法

方程(4) 和(5) 构成了目标的非线性动态系统, 本文采用辅助粒子滤波估计目标状态 APF 具体实 现步骤如下^[7]:

Step 1: 初始化, 设定 k = 0, 从 $p(x_0)$ 中抽取N个粒子 $\{x_0^{(i)}\}_{i=1}^N$, 赋权值 $w_0^{\sim(i)} = 1/N$, $\mu_k^{(i)} = x_k^{(i)}$, $i^{(j)} = j, j = 1, 2, ..., N$;

Step 2: 计算 $\mu_{k+1}^{(i)} = E(x_{k+1} | x_k^i);$

Step 3: 计算新的粒子索引集合, 依据 $p(i|_{z_{1-k+1}}) = p(_{z_{k+1}}|_{\mu_{k+1}^{(i)}}) \overset{\sim}{W_{k}^{(i)}}$ 重新采样*N*次得到 $\{i^{i}\}_{j=1}^{N}$;

Step4: 计算粒子的预测值

$$x_{k+1}^{(j)} \sim p(x_{k+1} | x_k^{(i^j)}), j = 1, 2, ...N;$$

Step 5: 计算粒子的权值
$$w_{k+1}^{(j)} = \frac{p(z_{k+1} \mid x_{k+1}^{(j)})}{p(z_{k+1} \mid \mu_{k+1}^{(j)})}$$

并归一化
$$\tilde{w}_{k+1}^{(j)} = w_{k+1}^{(j)} / w_{k+1}^{(j)};$$

Step 6: 评估粒子匮乏程度

$$\hat{N}_{eff} = 1 / \sum_{i=1}^{N} (\tilde{w}_{k+1}^{(i)})^2,$$

若 $N_{\text{eff}} < N_{\text{threshold}}$,则执行下一步,否则跳到 Step 8;

Step 7: 从{ $x_{k+1}^{(j)}$ }^N_{j+1} 中依粒子权值重新采样*N* 次得到{ $x_{k+1}^{(j)}$ }^N_{j=1}, 并重新赋粒子权值 $\tilde{w}_{k+1}^{(j)} = 1/N$, *j* = 1, 2, ...,*N*;

Step 8: 输出结果

$$E(x_{k+1}) = \sum_{j=1}^{N} \left(\widetilde{w}_{k+1}^{(j)} x_{k+1}^{(j^{j})} \right),$$

$$P(x_{k+1}) = \sum_{j=1}^{N} \left(x_{k+1}^{(j^{j})} - E(x_{k+1}) \right) \left(x_{k+1}^{(j^{j})} - E(x_{k+1}) \right),$$

Step 9: k: = k + 1, 返回 Step 2

由上述描述可知, 似然函数 p(zk |xk) 在算法中 是非常重要的函数, 根据图像测量方程(4) 和每个 像素的测量值独立条件, 似然函数可写为

$$p(z_{k}|X(k)) = p(z(i, j, k)|X(k)), \quad (6)$$

因为目标只作用于其邻域*C*(X(k)),式(6)可以改 写成

$$p(z_{k} | X(k)) = p_{s+n}(z(i, j, k) | X(k)) \times p_{n}(z(i, j, k)).$$

$$p_{n}(z(i, j, k)).$$
(7)

(x(k), y(k)) 和(x'(k), y'(k)) 分别为目标的像素位 式中: $p_{s+n}(\bullet)$ 表示"目标 + 噪声"的概率密度函数,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

 $p_n(\bullet)$ 表示噪声概率密度函数 在 Step 5 计算粒子权 值时, 分子分母同除以 $p_n(z(i, j, k))$, 可以减少

计算量 权值的计算表达式为

$$w_{k}^{(a)} = \frac{q(z(i, j, k) | X^{(a)}(k))}{q(z(i, j, k) | \mu^{(a)}(k))},$$

$$a = 1, 2, ..., N.$$
 (8)

式中

$$q(z(i,j,k) | X^{(a)}(k)) = \frac{p_{s+n}(z(i,j,k) | X^{(a)}(k))}{p_n(z(i,j,k))}.$$

3.2 检测阶段

采用似然比检验(LRT)方法检验目标是否出现 H。表示目标未出现, H」表示目标出现

$$\begin{cases} H_{1}: z(i, j, k) = s(i, j, k) + v(i, j, k), \\ H_{0}: z(i, j, k) = v(i, j, k). \end{cases}$$
(9)

LRT 方法可表述为

$$L(z_{k},...,z_{k+1}) = \frac{p(z_{k},...,z_{k+1}|H_{-1})}{p(z_{k},...,z_{k+1}|H_{-0})} \gtrsim \lambda (10)$$

式中 $z_k \triangleq \{z(i, j, k)\}$.如果接受 H_1 ,则表示图像中 有目标,目标的状态就是滤波结果;如果接受 H_0 ,则 表示图像中没有目标,需要用目标的预测状态代替 滤波结果式(10)很难得到解析解,利用Monte Carlo 方法给出近似解^[6]为

$$L(z_{k},...,z_{k+l}) = \frac{1}{N^{l+1}} \int_{a=0}^{l} \int_{b=1}^{N} (\sum_{(i,j) \in C(X^{(b)}(k+a))} q(z(i,j,k+a))) (11)$$

从式(11) 可以看出, 在计算式(8) 时需用到括号中 的数值, 因此可在滤波过程中输出此数值, 用来计算 似然比

在检测过程中, 阈值 λ 的选取是在检测概率 P_a 和虚警率 P_f 之间的折衷选择 本文在给定虚警率情况下, 通过 N eym an-Pearson 准则确定 $\lambda^{[8]}$.

4 实 验

采用真实 50 帧红外图像序列检验本算法性能, 图像大小为 128 × 128, 信噪比为 2 0 左右 图 1 (a) 是一幅典型的原始图像, 目标淹没在背景和噪声中, 肉眼无法分辨出目标; 图 1 (b) 是一次实验中检测的 小目标及其轨迹 进行 100 次Monte Carlo 仿真实 验, A PF 参数选取如下: 粒子数目 N = 3 000, \hat{N} threshold = 0 9M, $Q = \text{diag}(0.05^2, 0.05^2)$. 每次实验 首先采用改进投影 M P) 算法^[5] 得出目标的先验位 置信息, 初始粒子位置均匀分布在此位置的邻域窗 (3 × 3) 内, 速度服从[- 0.5, 0.5] 的均匀分布 检 测阶段设定 *l* = 4, 即利用 5 帧信息能量积累进行似 然比判决





(b) 检测出的小目标及其轨迹

图 1 实际图像和检测出的小目标及其轨迹

表 1 给出了两种算法在不同虚警率下的检测概 率 从表中可以看出, 在高虚警率假设下, A PF-TBD 性能优于M P 算法, 但在低虚警率下, A PF-TBD 性 能 严 重 下 降, 不 如 M P 算法 这是 因 为 根 据 N eym an-Pearson 准则, 虚警率越低, 意味着决策阈 值 λ 越高, 如果设定虚警率过低, 可能导致连续几帧 检测不到目标, 连续多帧用预测值代替滤波值导致 跟踪精度变差, 甚至跟踪发散 跟踪精度变差, 直接 导致检测性能变差, 形成恶性循环 相反, 高虚警率 可以保证较好的跟踪精度, 具有较好的检测性能

表1 不同虚警率下的检测概率 %

P_{f}	1e - 3	1e - 4	1e - 5
M P	75.4	58 4	31. 5
A PF-TBD	93.4	72 2	13.1

图 2 给出了 p_f = 1e - 3 时两种方法目标像素 位置的均方根误差(RM SE) 曲线 从图中可以看出, 本文算法在少许几帧检测不到目标的情况下, RM SE 非常低,对目标的像素位置估计比M P 算法 好,检测性能也高于M P 算法 在 P_f = 1e - 5 时, 100 次结果中本算法有 32 次出现发散,因此检测性 能变差

本仿真平台如下: CPU 为 PIV2 4-C, 内存为 512 M, matlab 6 5. 由于采用局部窗技术, 大大降低 了粒子滤波的计算量, 处理1帧图像大概需要3~ 5 s, 如果采用C++ 语言和各种粒子滤波的优化算



图 2 像素位置 RM SE 曲线

法,则可满足目前常用的中低速率的红外焦平面摄 像头的要求

5 结 论

本文提出了基于辅助粒子滤波的TBD 方法,该 方法同传统方法相比具有以下优势: 1)算法直观,可 以方便地结合目标点扩散函数、运动模型等; 2)利用 Monte Carlo 方法,可以有效地近似似然比函数,很 好地检测和跟踪红外弱小目标; 3)对信噪比大约为 2 0 的真实红外图像实验表明,在检测阈值合理选 择的情况下,本算法性能优于传统的TBD 方法

粒子滤波属于一种数值仿真技术,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,是以后的研究方向

参考文献(References)

[1] 许彬,郑链,王永学,等 红外序列图像小目标检测与

跟踪技术综述[J] *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 482-487.

(Xu B, Zheng L, Wang Y X, et al Survey of D in Target Detection and Tracking in Infrared Image Sequences [J] Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 482-487.)

[2] 刘志刚, 卢焕章, 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): 1588-1591.

(Liu Z G, Lu H Z, Chen H H. New Point Target Detection Algorithm in Low SNR [J] Systems Engineering and Electronics, 2004, 26 (11): 1588-1591.)

- [3] B lostein S D, R ichardson H S A Sequential Detection Approach to Target Tracking [J] IEEE Trans on A ES, 1994, 30(1): 197-212
- [4] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance A nalysis of a Dynamic Programming Track Before Detect A lgorithm [J] IEEE Trans on AES, 2002, 38 (1): 228-242
- [5] 陈非, 敬忠良, 李建勋 红外序列图像中缓动点目标的投影检测算法及其改进[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(2): 96-100

(Chen F, Jing Z L, L i J X. Projection Detection of Slow ly Moving Point Target and Its Modification Based on Noise Statistics in Low SNR Infrared Image Sequences [J]. J of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(2): 96-100)

- [6] Boers Y, Driessen H, A Particle-filter-based DetectionScheme[J] IEEE SP L etters, 2003, 10(10): 300-302
- [7] Pitt M K, Shephard N. Filtering V ia Simulation: Auxiliary Particle Filters [J]. J of the American Statistical Association, 1999, 94(2): 590-599.
- [8] Poor H V. An Introduction to Signal Detection and Estimation [M]. New York: Springer-Verlag, 1994

(上接第1207页)

- [24] Yu B, Singh M. Trust and Reputation M anagement in a Smallworld Network [A] Proc of the 4th Int Conf on M ulti-agent Systems [C] Washington DC, 2000: 449-450
- [25] Karl A, Zoran D. Managing Trust in a Peer-2-peer Information System [A] Proc of the 10th Int Conf on Information and Know ledge Management [C]

A tlanta, 2001: 310-317.

[26] 卢春霞,张申生 基于数字证书的在线信誉评估[J] 计算机集成制造系统,2003,9(4):330-336
(LuCX, Zhang SS Attribute Certification-based Online Reputation System [J] Computer Integrated M anuf acturing Systems, 2003,9(4):330-336)