

一种基于小波变换的序列图像中小目标检测与跟踪算法¹

李红艳 吴成柯*

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

*(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘 要 该文提出了一种快速检测序列图像中低信噪比 (<2dB) 小目标的算法。采用小波滤波器对每帧图像滤波, 提高目标的信噪比, 降低了低信噪比小目标检测算法的运算量; 采用固定长度的假设检验算法, 生成起始航迹, 有效地避免航迹的漏检; 采用截断序贯似然比检验, 形成确认航迹。仿真结果表明应用此算法, 可快速实现信噪比小于 2dB 的小目标 (2×2) 的检测与跟踪。

关键词 小波滤波, 多级假设检验, 序列图像, 小目标检测与跟踪

中图分类号 TN911.73, TN713

1 引 言

当目标距图像传感器较远时, 它们在传感器中的像为低信噪比小目标。例如, 在红外跟踪应用中, 当运动目标距传感器较远时, 它们在传感器中的成像为信号幅度较弱的小目标 (或点目标)。目标基本上被噪声所淹没, 无法利用传统的图像处理技术, 从单帧图像中检测到目标, 必须采用基于目标运动特征的序列图像处理技术, 边检测边跟踪, 设法沿目标航迹积累航迹能量, 提高信噪比, 以达到抑制噪声、检测并跟踪目标的目的。

人们曾提出过针对点源运动目标的边检测边跟踪算法。文献 [1] 中的三维匹配滤波可有效检测出低信噪比的点目标, 由于目标的数目、航速、航向及位置等航迹信息预先未知, 导致算法的运算及存储量均较大。文献 [2] 提出了截断序贯似然比检测, 大大地减少了运算量和存储量, 但当目标信噪比较低 (SNR < 2dB) 时, 易导致目标的漏检。此外还有动态规划方法、高阶相关算法等。连续进行航迹搜索时, 这些算法的运算量急剧增加。将上述算法用于小目标的检测与跟踪, 还易造成航迹的分裂, 导致运算量的增加。

假设图像已经过预处理, 背景噪声为加性白噪声, 小目标各像素点信号的强度较为均匀。小目标的信噪比虽较低 (SNR < 2dB), 但具有一定的面积, 如能在目标区域内积累目标的能量, 提高信噪比, 则可通过阈值化处理, 滤除部分噪声点, 减少以后算法的运算量, 其难点在于目标的大小未知。本文提出了一种基于小波的小目标检测与跟踪算法, 其具体算法是: 利用小波滤波器对预处理的图像进行滤波; 通过门限化处理, 滤除部分噪声点; 采用固定长度的似然比假设检验, 从多帧图像中搜索起始航迹 (暂态航迹); 继续进行多级假设检验形成确认航迹^[3]。仿真结果表明, 该算法可有效地检测出面积为 2×2、信噪比 < 2dB 的小目标。

2 小波滤波器的设计

一维小波变换如 (1) 式所示^[4]

$$W(a, b) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

¹ 1999-09-20 收到, 2000-01-11 定稿

国家级重点实验室基金、图像信息处理与智能控制教育部开放研究实验室基金资助

a 为尺度因子, b 为平移因子, 当 $\psi[(t-b)/a]$ 与 $f(t)$ 的波形一致时, $\psi(\cdot)$ 为 $f(\cdot)$ 的匹配滤波器。同理, 当选择的二维小波与图像中信号的形状一致时, 小波近似于匹配滤波器, 可用于检测高斯噪声中的目标。小波滤波器组的实现过程就是检测器对目标的不同尺度进行分级操作的过程, 如目标的大小正好与某个小波滤波器一致, 背景噪声为白噪声, 通过相应子带图像的阈值化处理, 可实现最优检测。这里假设目标为正方形的面目标, 选用 Haar 小波对图像进行小波分解。如目标不是正方形, 也可以选用或构造其它的小波基。Haar 小波滤波器的系数为 $h(0) = 0.5; h(1) = 0.5; g(0) = 0.5; g(1) = -0.5$ 。二维小波变换可采用 Mallat 算法实现。

3 阈值的选择

设 y_k 为第 k 帧图像中某点的灰度值, 该点或是小目标上的点, 或是噪声。假设 H_1 代表目标存在的情况, H_0 代表目标不存在的情况, 并记为

$$\left. \begin{array}{l} H_1: y_k = s + n \\ H_0: y_k = n \end{array} \right\} \quad (2)$$

其中 s 为目标的灰度值, n 为均值为 0 方差为 σ^2 的高斯噪声 (减去均值后的图像)。于是, 上述二元假设可表示为

$$\left. \begin{array}{l} H_0: y_k \sim N(0, \sigma) \\ H_1: y_k \sim N(s, \sigma) \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中 N 为高斯分布的概率密度函数。信噪比为 s/σ 。如小目标的大小为 $2^a \times 2^a$, 且小目标左上角所在位置为图像的第 $p \times 2^a$ 行和第 $q \times 2^a$ 列, p, q 为正整数。经 a 级小波分解后, 小目标在低频分量中将会聚于点 (p, q) 。该点的灰度值 $w_{p,q}$ 服从下式:

$$w_{p,q} \sim N(2^{2a}s, 2^a\sigma)$$

小目标的面积越大, 信噪比提高的越多。小目标的左上角位于其它点时, 经 a 级小波分解后, 小目标在低频分量中能量最高点的均值小于 $2^{2a}s$, 方差仍为 $(2^a\sigma)^2$, 通过小波基的平移, 可将小目标的能量会聚于一点, 均值达到 $2^{2a}s$ 。

根据具体的应用场合, 设定所能检测目标的最小尺度 a 、最小信噪比 SNR, 并规定检测概率 Pd_1 。图像经 a 级小波滤波后, 进行阈值化处理, 其阈值 λ_1 按 (4) 式计算。

$$\lambda_1 = 2^{2a}s + 2^a\sigma\Phi^{-1}(1 - Pd_1) \quad (4)$$

其中 Φ 为标准正态分布函数。

4 起始航迹的生成

当目标距图像传感器较远时, 目标在传感器上的像为小目标, 且信噪比较低。这时无法从单帧图像中检测出目标, 只能利用目标的运动特性, 沿目标的运动航迹积累能量, 从序列图像中检测出目标, 即检测出目标航迹。由于目标的数目、位置、运动速度、运动方向均未知, 可根据待检测目标运动速度的范围, 机动量的大小, 构造候选航迹, 在候选航迹中搜索目标起始航迹。假设目标作近似匀速直线运动, 目标的运动速度小于或等于 1 个像素/帧, 目标的机动量为 1 个像素/帧。这样, 从第 i 帧图像的任一点 (起始点) 出发的候选航迹在第 $i+1$ 帧可达 9 条, 在第 $i+2$ 帧, 根据目标运动特性的假设, 每条航迹可分裂为 4 条, 在第 $i+3$ 帧, 每条航迹

又可分裂为 4 条, 如此继续, 可将从任一点出发的所有候选航迹构造为一个候选航迹树。如假设目标做非匀速直线运动, 目标的运动速度在某个范围内, 那么候选航迹的数目将增加一些。为了节省运算量, 可将候选航迹树存在内存中, 如文献 [2] 所述。本算法除了存储候选航迹上各点的代号外, 还存储了各点偏离起始点的坐标, 以进一步减少运算量。下一步, 依据候选航迹树建立候选航迹, 从中搜索目标起始航迹。

截断序贯似然比检测算法的运算量较低, 但当目标信噪比较低时, 由于起始航迹上某点 (或某些点) 的噪声较大, 易造成航迹的漏检。这里采用固定长度的假设检验, 起始航迹的长度为 N_1 , 即使某点噪声较大, 进行起始航迹检验时, 它的影响仅为 $1/N_1$ 。当航迹上的点均源于目标时, 航迹上各点灰度值之和服从均值为 $N_1 \times 2^{2a} \times s$, 方差为 $N_1 \times 2^{2a} \times \sigma^2$ 的高斯分布。而当航迹上的点迹均为杂波点时, 则近似服从均值为 0, 方差为 $N_1 \times 2^{2a} \times \sigma^2$ 的高斯分布。根据规定的漏检概率 β_1 , 起始航迹的判定门限 λ_2 按 (5) 式计算。

$$\lambda_2 = N_1 \times 2^{2a} \times \text{SNR} \times \sigma + \sqrt{N_1} \times 2^a \times \sigma \times (\Phi)^{-1}(\beta_1) \quad (5)$$

给定虚警率 α_1 , N_1 应大于所需平均样本数 N_1^* , N_1^* 按下式计算 [2]

$$N_1^* = [\Phi^{-1}(\alpha_1) + \Phi^{-1}(\beta_1)]^2 \sigma^2 / (2^{2a} s^2) \quad (6)$$

为降低航迹的漏检率, β_1 的取值应小。当目标信噪比较低时, 起始航迹中含杂波点的航迹较多。为此, 本文将这些航迹作为起始航迹 (暂态航迹), 采用多级假设检验技术进行进一步的判决。

5 截断序贯似然比检验

按匀速直线运动外推, 对所获得的起始航迹进行截断序贯似然比检验, 形成确认航迹。当航迹上的点均源于目标时, $\sum_{m=1}^c \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^a y_{mij}$ 服从均值为 $c \times 2^{2a} \times s$, 方差为 $c \times 2^{2a} \times \sigma^2$ 的高斯分布, c 为图像的帧数。而当航迹上的点迹均为杂波点时, 则近似服从均值为 0, 方差为 $c \times 2^{2a} \times \sigma^2$ 的高斯分布。这样, 与单靠 1 次测量值的检验相比, 信号与噪声的均值之差增大了, 克服了因 s 过小而造成的误判。可以证明, 多级假设检验可提高检测性能。令虚警率为 α_2 , 漏警率为 β_2 (检测概率 Pd_2), 即

$$P(D_1|H_0) = \alpha_2, \quad P(D_0|H_1) = \beta_2 \quad (7)$$

采用截断序贯似然比检验, 其检验准则如下:

$$\left. \begin{array}{ll} \lambda(Y_c) \geq \mu_1, & \text{接受 } H_1 \text{ 假设} \\ \lambda(Y_c) \leq \mu_0, & \text{接受 } H_0 \text{ 假设} \\ \mu_0 < \lambda(Y_c) < \mu_1, & \text{增加一个新样本, 继续进行判决} \end{array} \right\} \quad (8)$$

其中 $\lambda(Y_c)$ 如下式所示:

$$\lambda(Y_c) = \ln \frac{f(Y_c|H_1)}{f(Y_c|H_0)} = \frac{s}{\sigma^2} \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^{2^a} \sum_{j=1}^{2^a} Y_{mij} - \frac{c 2^{2a} s^2}{2\sigma^2} \quad (9)$$

截断序贯似然比检验准则又可直观地表示为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^{2^a} \sum_{j=1}^{2^a} y_{mij} &\geq a_c, && \text{接受 } H_1 \\ \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^{2^a} \sum_{j=1}^{2^a} y_{mij} &\leq b_c, && \text{接受 } H_0 \\ b_c &< \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^{2^a} \sum_{j=1}^{2^a} y_{mij} < a_c, && \text{增加新样本继续检测} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $a_c = \mu_1(\sigma^2/s) + (c2^{2a}s/2)$, $b_c = \mu_0(\sigma^2/s) + (c2^{2a}s/2)$, μ_0, μ_1 由给定的虚警概率 α_2 和漏检概率 β_2 确定, 如下式所示:

$$\mu_0 = \ln[\beta_2/(1 - \alpha_2)], \quad \mu_1 = \ln[(1 - \beta_2)/\alpha_2] \quad (11)$$

当检验次数 c 等于指定长度 N_2 时, 强制地作出是 H_0 或 H_1 的判断。注意, N_2 应大于 H_1 假设条件下, 所需的平均样本数 N_2^* 。当 c 等于 N_2 时, 检验准则如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a y_{mij} &\geq \tau, && \text{接受 } H_1 \\ \sum_{m=1}^c \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a y_{mij} &< \tau, && \text{接受 } H_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

门限值 τ 为

$$\tau = N_2 2^{2a} s + \sqrt{N_2 2^a} \sigma \Phi^{-1}(\beta_2) \quad (13)$$

N_2^* 按下式计算

$$N_2^* = [\Phi^{-1}(\alpha_2) + \Phi^{-1}(\beta_2)]^2 \sigma^2 / (2^{2a} s^2) \quad (14)$$

6 算法描述

- (1) 离线构造候选航迹树, 航迹树的根可以是图像中的任一点;
- (2) 初始化起始航迹区;
- (3) 取一帧图像进行 a 级小波变换, 子带图像门限化处理, 滤除部分噪声;
- (4) 根据候选航迹树, 为滤波后图像中的点构造长度为 N_1 的候选航迹, 采用固定长度的假设检验, 形成起始航迹;
- (5) 对起始航迹区中的航迹进行外推及截断序贯似然比假设检验, 如验证为目标航迹, 则移入确认航迹区;
- (6) 对确认航迹区中的航迹进行跟踪及终结判断。

7 仿 真

本文采用 20 帧 64×64 的序列图像进行了仿真, 图像中的噪声点服从均值为 0, 方差为 1^2 的相互独立的白噪声。序列图像中航迹的灰度为 1.2, 这样, 图像中的航迹点服从均值为 1.2,

方差为 1^2 的相互独立的白噪声, 小目标的大小为 2×2 。目标的起始位置为 (21 21), 沿水平方向, 以 1 像素 / 帧的速度作匀速直线运动。图 1 为序列图像中第 1 帧, 可以看出小目标已完全被噪声所淹没。图 2 为第 1 帧的第 21 列, 其中第 21, 22 点为目标点。



图 1 第 1 帧图像像素点的灰度

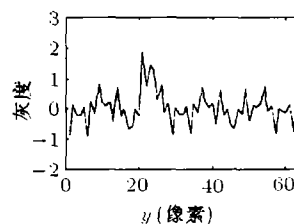


图 2 第 1 帧第 21 列像素点的灰度

令 Pd_1 等于 0.999, 根据 (4) 式, λ_1 取值为 1.22, 第 1 帧图像经小波变换后, 取其第 11 列的数据, 如图 3 所示, 目标的信噪比明显提高。对小波变换后的子带图像进行门限化处理, 滤除部分噪声点。

Pd_2 取 0.999, α_1 取 0.2, 根据 (6) 式, 起始航迹的长度 N_1 取 3, 采用固定长度的序列图像检测算法, 生成的起始航迹如图 4 所示, 起始航迹数为 262。

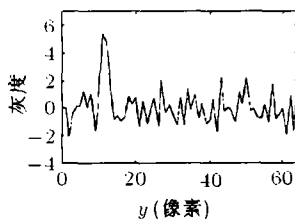


图 3 小波滤波结果

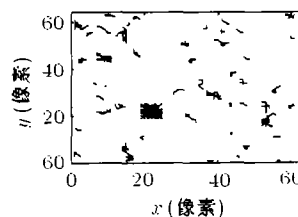


图 4 起始航迹

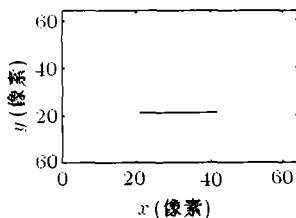


图 5 确认航迹

对起始航迹区中的航迹进行外推及截断序贯似然比假设检验, 形成确认航迹。对确认航迹区中的航迹进行跟踪, 获得图 5 所示的确认航迹。 α_2 取 0.01, β_2 取 0.001。根据 (14) 式, N_2^* 等于 5。这里 N_2 取 7。

N_2 取 7 时, 根据本文中的候选航迹树, 由一帧图像中所有点出发的候选直线航迹数为 $37748736(64 \times 64 \times 9 \times 4^5)$ 条。如仅采用固定长度的似然比检验算法进行航迹的检测, 需检验所有候选航迹。采用本文所提出的算法, 经小波滤波后, 第一帧图像还剩 621 点; N_1 取 3, 对 $22356(621 \times 9 \times 4)$ 候选航迹进行检验, 获得 262 条起始航迹; 继续对起始航迹进行截断序贯似然比假设检验, 获得确认航迹。小波滤波器的算法简单, 易于采用硬件实时实现。将其后的运算量放大, 相当于对 22618 ($22356+262$) 条航迹进行长度为 N_2 的固定长度似然比检验, 运算量为原来的 6%。

8 结 论

经典的目标检测与跟踪方法为先检测后跟踪, 每获取一幅图像先进行硬判断: 是否存在目标, 然后进行点迹与航迹的相关。这种方法要求信噪比较高 ($>10\text{dB}$)^[2]。图像中低信噪比小目标检测与跟踪, 从理论上讲是一个难题。因无形状信息可利用, 无法采用传统的图像处理方法, 只能沿目标航迹进行能量积累, 来检测目标, 即边检测边跟踪的算法。

以往的文献中已提出多种边检测边跟踪的算法, 其中截断序贯似然比检验算法的运算量最小。但其缺点是, 当目标信噪比较低时, 若航迹起始点被噪声污染严重, 会导致漏检, 当然也可以以每帧图像中的点作为起始点, 运算量将增加。

本文采用小波变换与截断序贯似然比检验相结合的算法, 首先利用小波变换的多尺度滤波的思想, 滤除部分噪声点; 对一定长度的候选航迹进行检验, 生成起始航迹, 避免了航迹漏检缺陷; 应用序贯似然比检验对起始航迹进行确认, 并采用跟踪滤波算法对已确认航迹进行跟踪。仿真结果表明, 该算法运算量小, 可有效地检测并跟踪信噪比低于 2dB 的小目标航迹, 对于工程实现有较好的理论参考价值。

参 考 文 献

- [1] I. S. Reed, R. M. Gagliardi, L. B. Stotts, Optical moving target detection with 3-D matched filtering, *IEEE Trans. on AES*, 1988, AES-24(1), 327-336.
- [2] S. D. Blostein, H. S. Richardson, A sequential detection approach to target tracking, *IEEE Trans. on AES*, 1994, AES-30(1), 197-211.
- [3] Y. Bar-Shalom, Multitarget Multisensor Tracking, Advanced Applications, MA, Artech House, 1990, 151-211.
- [4] R. M. Rao, A. S. Bopardikar, Wavelet Transforms, MA, Addison Wesley Longman, 1998, 183-214.

DETECTING AND TRACKING DIM SMALL TARGET IN IMAGE SEQUENCES BASED ON WAVELET TRANSFORMS

Li Hongyan Wu Chengke*

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

*(National Key Lab. on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract A fast algorithm is proposed for tracking low observable small targets in a digital image sequence. Wavelet transform is used for image filtering to improve SNR. Fixed sample size hypothesis testing is applied to generate tentative tracks which avoids target tracks missing. Target trajectories are confirmed by truncated sequential probability ratio test. The simulation results show that it can detect and track small targets efficiently with $\text{SNR} < 2\text{dB}$.

Key words Wavelet transforms, Multistage hypothesis, Sequential images, Detecting and tracking dim small target

李红艳: 女, 1966年生, 副教授, 博士, 现从事多目标相关与多目标跟踪、图像目标跟踪的研究。

吴成柯: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 现从事计算机视觉、计算机图形学、图像编码等方面的研究工作。