

一种基于小波与遗传算法的小目标检测算法

李红艳¹, 吴成柯²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071; 2. 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: 本文提出了一种快速检测序列图像中低信噪比 (< 2) 小目标的算法. 该算法采用小波滤波器对每帧图像滤波, 提高目标的信噪比, 剔除部分噪声点, 降低了低信噪比小目标检测算法的运算量; 设计了基于遗传算法的起始航迹搜索算法, 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 2 的小目标 (2×2) 的检测与跟踪.

关键词: 小波滤波; 遗传算法; 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 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0439-04

Detecting Dim Small Targets in Image Sequences Based on Wavelet Transforms and Genetic Algorithms

LI Hong-yan, WU Cheng-ke²

(1. School of Mechar Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Key Laboratory on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A fast algorithm is proposed for tracking low observable small targets in a digital image sequences. Wavelet transforms are used for image filtering to improve SNR. Tentative tracks are formed based on genetic algorithms which avoid target tracks missing. Coding and genetic operation are designed for this problem. Target trajectories are confirmed by truncated sequential probability ratio test. The simulation results show that it can efficiently detect and track small targets with size as small as 2×2 and $SNR < 2$.

Key words: wavelet transforms; genetic algorithms; multistage hypothesis; sequential images; detecting and tracking dim small target

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. 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方法, 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[1]中的三维匹配滤波可有效地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[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 ($SNR < 2$) 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. 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.

目前, 低信噪比小目标检测算法的发展趋势是检测性能

好、算法简单、易于硬件实时实现. 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 ($SNR < 2$), 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与遗传算法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; 采用遗传算法, 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 < 2 的小目标.

2 小波滤波器的设计

一维小波变换如式 (1) 所示^[4]:

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

a 为尺度因子, b 为平移因子, 当 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 与 $f(t)$ 的波形一致

时, (\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. 令 H_1 假设代表目标存在的情况, H_0 假设代表目标不存在的情况, 可记为:

$$H_0: y_k \sim N(0, \sigma^2), H_1: y_k \sim N(s, \sigma^2) \quad (2)$$

其中, s 为目标的灰度, σ^2 为高斯噪声的方差, 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 $2^a \times 2^a$, 小目标的左上角位于图像的第 $p \times 2^a$ 行和 $q \times 2^a$ 列, p, q 为整数. 经 a 级小波分解, 小目标在低频分量将会聚于点 (p, q) . 该点的均值为 $2^{2a}s$, 方差为 $2^{2a}\sigma^2$, 信噪比为 $2^a \times s/\sigma$. 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, 小波分解后, 小目标在低频分量中能量最高点的均值小于 $2^{2a}s$, 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 P_{d1} . 图像经 a 级小波滤波后, 进行阈值化处理, 其阈值 T_1 按式(3)计算.

$$T_1 = 2^{2a}SNR + 2^{2a}\sigma^2 \ln(1 - P_{d1}) \quad (3)$$

其中 ϕ 为标准正态分布函数.

4 基于遗传算法的起始航迹的构造

小波滤波器是在目标区域内积累目标能量, 此外, 还必须利用目标的运动特性, 沿目标的运动航迹积累能量, 才能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, 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[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, 采用遗传算法搜索目标起始航迹. 遗传算法是一种优化搜索算法, 其收敛性、收敛的速度、运

算量的大小与问题、问题的编码方案、遗传操作密切相关^[5]. 根据低信噪比小目标检测的特点, 本文设计了下面的编码方案及遗传操作, 其中, 合格个体保留法为文[6]所提出的遗传算子.

(1) 编码: 如假设目标做匀速直线运动, 只需确定起始航迹的起始点和第 2 点的位置, 即可构造一条起始航迹. 故起始航迹由下面 3 个参数唯一确定:

$root.x$: 起始点的横坐标;

$root.y$: 起始点的纵坐标;

$point$: 航迹第 2 点所指代的起始点的子点号.

$root.x$ 、 $root.y$ 采用二进制编码, 其二进制编码长度依据图像的大小而定, 如图像为 64×64 , 则可分别用 6 位长的二进制无符号整数表示. $point$ 在 0-8 范围内取值, 按十进制编码.

(2) 交叉操作: 只对航迹起始点的位置 $root.x$ 、 $root.y$ 进行交叉操作, 以达到在整幅图像内搜索起始点的目的.

(3) 变异操作: 变异操作包括起始点变异和子点号变异. 通过起始点位置变异, 可使起始点达到一帧图像的任一点. 子点号的变异采用取随机数的方法, 在起始点的所有子航迹中搜索可能的起始航迹.

(4) 适应度函数: 设起始航迹的长度为 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. 适应度函数 f 可定义为:

$$f = \frac{N_1 \times a \times a}{\sum_{m=1}^N \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^a y_{mij}} \quad (4)$$

随着 N_1 的增加, 目标航迹的信噪比增加. 若目标信噪比较低, 为减少运算量, N_1 取得较小时, 遗传算法会收敛到虚假航迹. 为解决这一矛盾, 并实现多目标跟踪, 本文采用了合格个体保留法^[6].

(5) 合格个体保留法: 合格个体保留法就是将群体中适应度高而且适应度值大于规定门限的个体移出群体, 放入起始航迹区. 根据规定的漏检概率 α_1 , 起始航迹的判定门限 T_2 按式(5)计算. 给定虚警率 α_2 , N_1 应大于所需平均样本数 N_1^* .

$$T_2 = N_1 2^{2a} SNR + \sqrt{N_1} 2^{2a} \sigma^2 \ln(1 - \alpha_1) \quad (5)$$

$$N_1^* = \left[\ln(1 - \alpha_1) + \ln(1 - \alpha_2) \right]^2 / 2^{2a} \sigma^2 \quad (6)$$

该方法的优点是, 进化过程中某一代的最优个体(适应度值大于规定门限)可能是航迹, 也可能是虚假航迹. 若是航迹, 可以不被交叉和变异操作所破坏; 若是虚假航迹, 则可以避免由于最优个体遗传基因的急速增加, 而使进化陷入此虚假航迹. 当目标信噪比较低时, 这一点尤为重要.

(6) 选择操作: 根据给定的漏检率, 剔除噪声, 然后进行平移定标, 保证定标后的适应度值大于等于 0. 对剩余的个体采用期望值选择法进行选择与复制. 同时还采用了最佳个体保存法, 与合格个体保留法配合使用, 既加快了收敛速度, 又避免了陷入虚假航迹.

当目标信噪比较低时, 同时为了跟踪多目标, 该算法生成的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 多级假设检验

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, y_{mij} 服从均值为 $n \times 2^{2a} \times s$ 、方差为 $n \times 2^{2a} \times s^2$ 的高斯分布.而当航迹上的点均为杂波点时,则近似服从均值为 0、方差为 $n \times 2^{2a} \times s^2$ 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 ,漏警率为 β (检测概率 Pd_2),即:

$$P(D_1|H_0) = \alpha, P(D_0|H_1) = \beta \quad (7)$$

采用截断序贯似然比检验,其检验准则如下:

$$\begin{cases} n \times 2^{2a} \times s^2 & y_{mij} \geq a_n, \text{接受 } H_1 \\ m=1, i=1, j=1 & \\ n \times 2^{2a} \times s^2 & y_{mij} \leq b_n, \text{接受 } H_0 \\ m=1, i=1, j=1 & \\ b_n < n \times 2^{2a} \times s^2 & y_{mij} < a_n, \text{增加新样本继续检测} \\ m=1, i=1, j=1 & \end{cases} \quad (8)$$

其中, $a_n = \mu_1 \frac{2}{s} + \frac{n2^{2a}s}{2}$, $b_n = \mu_0 \frac{2}{s} + \frac{n2^{2a}s}{2}$. μ_0, μ_1 由给定的虚警概率 α 和漏检概率 β 确定:

$$\mu_0 = \ln \frac{\alpha}{1-\beta}, \mu_1 = \ln \frac{1-\alpha}{\beta} \quad (9)$$

当检验次数 n 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 n 等于 N_2 时,检验准则如下式所示:

$$\begin{cases} N_2 \times a & y_{mij} \geq a_n, \text{接受 } H_1 \\ m=1, i=1, j=1 & \\ N_2 \times a & y_{mij} < b_n, \text{接受 } H_0 \\ m=1, i=1, j=1 & \end{cases} \quad (10)$$

$$= N_2 2^{2a} s + \sqrt{N_2 2^{2a}} \cdot \ln(\alpha) \quad (11)$$

N_2^* 按下式计算:

$$N_2^* = \lceil \ln(\alpha) + \ln(\beta) \rceil \cdot \frac{2}{2^{2a} s^2} \quad (12)$$

6 算法描述

- (1) 离线构造候选航迹树;
- (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,采用遗传算法搜索起始航迹;
- (5) 对起始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,移入确认航迹区;
- (6) 对确认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,小目标的大小为 2×2 个小目标均以 1 像素/帧的速度作匀速直线运动.目标 1 的起始位置为 (31 31),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 31 列,其中第 31、32 点为目标

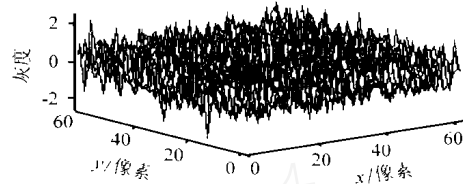


图 1 第 1 帧图像像素点的灰度

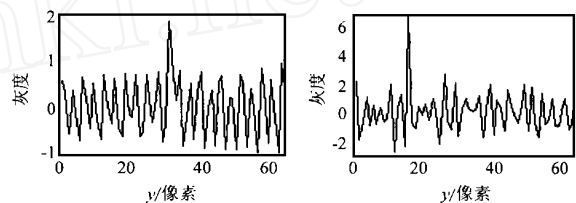


图 2 第 1 帧第 31 列像素点的灰度 图 3 小波滤波结果

点.令 Pd_1 等于 0.999,根据式(3), α 为 1.22,第 1 帧图像经小波变换后,取其第 16 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 取 0.2,根据式(6),起始航迹的长度 N_1 取 3,采用遗传算法搜索起始航迹,生成的起始航迹如图 4 所示,起始航迹数为 258.遗传算法的参数设置为:群体规模为 150,进化代数取 40,起始点的交叉概率为 0.3,起始点的变异概率为 0.4,航迹子点的变异概率为 0.4.对起始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. β 取 0.01, β 取 0.999.根据式(12), 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 627 点;采用遗传算法,相当于对 6000 (150×40) 条候选航迹进行检验;对 258 条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.其后的运算量相当于对 6258 ($6000 + 258$) 条航迹进行长度为 N_2 的固定长度似然比检验,运算量显著降低.

8 结论

经典的目标检测与跟踪方法为先检测后跟踪,即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.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.

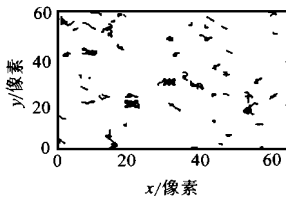


图4 起始航迹

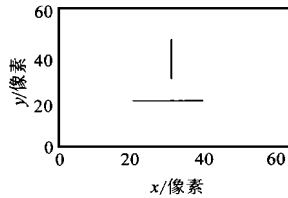


图5 确认航迹

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;采用遗传算法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;应用截断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2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] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B. Optical moving target detection with 3-D matched filtering [J]. IEEE Trans on AES, 1988, 24(1) : 327 - 336.

- [2] Blostein S D, Richardson H S. A sequential detection approach to target tracking [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(1) : 197 - 211.
- [3] Rao R M, Bopardikar A S. Wavelet Transforms. MA: Addison Wesley Longman [M], 1998: 183 - 214.
- [4] 陈国良等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [5] 李红艳, 吴成柯. 遗传算法在低信噪比图像点目标检测中的应用 [J]. 航空学报, 1999, 20(6) .

作者简介:



李红艳 1966年生,副教授,博士生.1988年毕业于西安交通大学,1991年获西安交通大学自动控制理论及应用硕士学位.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 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.