

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0471

基于运动方向估计的管道滤波算法

董维科, 张建奇, 刘德连, 王晓蕊

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘要:管道滤波算法提出了从时域角度解决弱小目标检测问题的思路, 对于红外强起伏天空背景中弱点目标的检测问题, 管道内强噪音的干扰以及低信噪比的条件会导致检测概率降低的情况出现. 本文提出了一种运动方向估计的管道滤波算法, 分析了红外弱点目标的运动特性, 依据弱点目标在相邻帧间位置具有连贯性的特征, 建立了弱点目标的运动方向估计模型. 在模型中利用弱点目标逐帧检测的先验位置信息, 估计弱点目标的运动方向和轨迹, 根据估计结果去除管道内噪音对弱点目标的干扰. 仿真结果表明, 该方法能够很好地抑制管道内噪音的影响, 提高弱点目标的检测概率, 增强弱点目标抗管道内噪音干扰的能力.

关键词: 红外图像序列; 弱点目标检测; 管道滤波; 运动方向估计

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0471-4

Pipeline Filter Algorithm Based on Movement Direction Estimation

DONG Wei-ke, ZHANG Jian-qi, LIU De-lian, WANG Xiao-ru

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Pipeline filter algorithm proposes a solution of detection of dim small target from the perspective of time domain. In terms of detection of weak point target in the strongly undulant infrared sky background, a pipeline filter algorithm is proposed based on motion direction estimation as a method to improve the flaw of detection probability deduction due to the strong interferential noise within the pipeline and low signal noise ratio. The motion characteristics of infrared weak point target are analyzed and the motion direction estimation model was established according to the continuity characteristic of the targets between consecutive frames. Through the model, the prior position information of the targets is detected frame by frame and analyzed in order to estimate the motion direction and trajectory of the targets. The estimation results are used to eliminate the interference on the targets caused by the pipeline inner noises. Experiments and simulation results show that the algorithm can suppress noises in the pipeline effectively, increase the detection probability of the targets, and strengthen the resistance characteristic of the targets against the noises within the pipe.

Key words: IR image sequences; Weak point target detection; Pipeline filter; Movement direction estimation

0 引言

红外成像系统在国防与国民经济中的广泛应用对红外成像系统中弱小目标的检测技术提出了严格的要求. 由于在成像时大气辐射对红外传感器的影

响, 红外图像中包含有强烈的起伏背景; 同时由于要求作用距离远, 目标在图像平面上的投影通常只有单个像素甚至是亚像素, 没有任何空间分布信息可以利用; 此外, 目标灰度极弱, 信噪比也很低, 这些都给弱小目标检测带来了很大难度. WANG G. 等人

基金项目: 教育部基本科研业务费(No. 50511050005)和国家自然科学基金(No. 61007014)资助

第一作者: 董维科(1973-)男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为红外图像处理. Email: wkdong@mail.xidian.edu.cn

导师: 张建奇(1960-)男, 教授, 博士, 主要研究方向为红外场景仿真. Email: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2012-10-15; 录用日期: 2012-12-14

首先提出了管道滤波算法^[1],这种方法从时域的角度解决弱小目标的检测问题,取得了较好的效果;在国内,彭嘉雄等人应用管道滤波算法对弱小目标检测进行了卓有成效的研究^[2];刘刚等人针对序列图像中固定位置强噪音,通过设置位置变化门限加以滤除^[3],提高了管道滤波算法对固定位置噪音的抗干扰能力;连可等人在序列图像中采用“一次建立,逐帧消除”的方法对管道进行操作,避免了复杂的管道滤波过程^[4],提高了管道滤波算法的实时运算能力;西安电子科技大学红外实验室利用加权位移式管道滤波算法实现了低信噪比下目标的有效检测^[5],减少了管道边缘噪音对检测效果的不利影响;此外,国内还有许多研究群体围绕管道滤波法检测弱小目标提出了不同见解^[6-9].

已经发表的有关管道滤波的检测方法仅仅排除了管道外与管道内固定位置的强干扰,在实际场景中,管道内仍然存在各种强噪音干扰,根据红外目标的运动学特性,相邻帧目标位置具有连贯性,因此,可以利用该特性对管道内强噪音干扰进行抑制.本文针对红外强起伏天空背景中管道内强噪音的干扰导致在低信噪比条件下弱点目标检测概率降低的情况,在利用红外弱点目标运动特性的基础之上,提出一种基于运动方向估计的管道滤波算法,该方法利用目标的先验运动信息,根据目标运动轨迹估计目标运动方向,根据估计结果去除管道内噪音对目标的干扰.理论推导和仿真结果表明,这种方法可以有效地去除管道内噪音对目标检测的不利影响,有效提高弱点目标的检测概率.

1 管道滤波模型

1.1 管道结构

当红外热像仪以适当的采样频率进行采样时,在相邻帧间,目标的运动不会有大的跳跃,目标的信号强度也不会突变.因此,可以认为目标在空间的运动轨迹是光滑的,并且目标的灰度在时间上是连续的.相比而言,随机噪音不具备目标的上述特征.

原始图像序列经过逐帧处理后,成为一个更新的二值图像序列.更新的图像序列中绝大部分像素点的灰度值为“0”,其中包围有随机分布的灰度值为“1”的像素点,这些像素点既有可能是目标,也有可能是虚警.为了检测出真正的目标,需要依据目标运动的连续性,将更新的图像序列放入管道结构^[1]中进行处理.

管道结构是一个由 $n(n=3\sim 5)$ 帧 $M\times N$ 图像组成的先入先出(First Input First Output, FIFO)结构,如图 1. 经过一个帧周期,图像序列就在管道

结构中沿着时间轴依次向前推进一帧,从尾部推入一帧,就从头部推出一帧,这个过程就是“管道更新”.

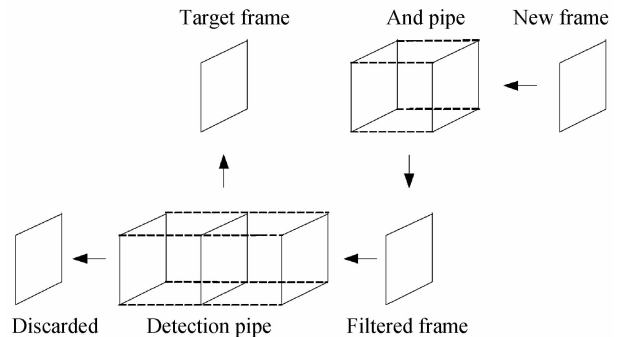


图 1 目标检测管道滤波器结构
Fig. 1 Diagram of pipeline filter

每次管道更新后,在管道中移动一个窗口序列,当窗口移动到有目标的位置时,由于目标出现的连续性,必然有较多的可疑像素聚集于窗口内,窗内像素的累加值会大于一个门限.如果没有目标,由于噪音的随机分布性,窗内像素的累加值就较小.因而可以检测出图像序列中的某一帧是否存在目标并确定目标的位置.

1.2 连续性滤波

为了在目标检测时尽量减少检测管道中非目标点的干扰,需要在图像进入检测管道前先进行连续性滤波.根据目标运动的连续性,如果第 k 帧中在像素 (x, y) 处有目标,则该目标在第 $k+1$ 帧中必然会出现于像素 (x, y) 的一个小邻域内.连续性滤波由一个“与”管道结构完成,如图 2.

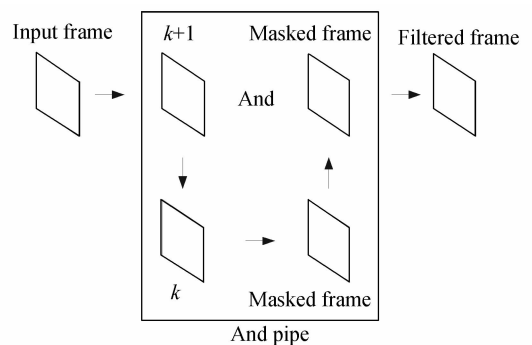


图 2 “与”管道示意图
Fig. 2 Diagram of “AND” pipe

1) 对于先进入“与”管道的第 k 帧二值图像进行数学形态学的膨胀运算,得到一个掩膜帧,使原二值图像为“1”的像素的小邻域都为“1”;

2) 将第 $k+1$ 帧二值图像和掩膜帧进行逻辑“与”运算,得到连续性滤波后的第 $k+1$ 帧.

把连续性滤波管道同检测管道连接起来就构成一个完整的目标检测管道滤波器结构,如图 1,这种结构可以对图像序列连续地进行处理.

2 基于运动方向估计的管道滤波算法

首先需要对原始图像序列逐帧进行单帧检测,由于是多帧序贯处理,漏警的风险大于虚警的风险,因此,不需要追求高的单帧检测概率,可以给出一个较高的虚警阈值。

2.1 恒虚警阈值

对于红外天空背景,经过单帧检测处理后,大量的云层背景被抑制,可以认为,弱点目标和背景噪音保留了下来,而红外背景噪音的强度服从高斯分布,依据高斯分布的特征就可以方便地估算出每一帧红外场景中背景噪音强度的均值和标准差。

一般情况下,红外图象背景噪音的概率密度函数为

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, X 是表示背景噪音强度的随机变量, μ 表示背景噪音强度的均值, σ 表示背景噪音强度的标准差。

构造一个新的随机变量 X_1 , 即

$$X_1 = (X - \mu) / \sigma \quad (2)$$

对应概率密度函数为

$$P(X_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{X_1^2}{2}} \quad (3)$$

对于新构造的随机变量 X_1 , 选定一个门限值 L_1 (也即选定一个门限值 $L = L_1 \cdot \sigma + \mu$), 如果 $f(x, y) \geq L$, 则判定为目标像素, 并保留该像素值; 如果 $f(x, y) < L$, 则判定为非目标像素, 并将该像素值置零。因此, 首要任务是选取 L_1 , 或 $L = L_1 \cdot \sigma + \mu$, 使虚警率为一恒定值。

根据 Neyman-Pearson 准则^[10], 虚警率 P_f 为

$$P_f = \int_{L_1}^{+\infty} P(X_1) dX_1 = 1 - \int_{-\infty}^{L_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{X_1^2}{2}} dX_1 \quad (4)$$

给定虚警率 P_f , 可由式(4)查表求出 L_1 , 进而得到门限值 L 。

2.2 运动方向估计

单帧处理确定出候选目标点后, 就可以使用管道滤波器对目标进行检测确认, 红外弱小目标对噪音非常敏感, 传统的管道滤波算法能够对管道外的噪音进行有效的抑制。

然而, 弱点目标在强起伏红外天空背景中具有极低的信噪比, 以至于仅仅依据单帧数据就无法检测弱点目标; 另一方面, 根据管道滤波的处理原理, 在处理流程中也无法完全排除导致管道内出现强噪音的可能; 因此, 传统的管道滤波算法容易使弱点目标受管道内噪音的影响而导致检测失败。如果在管道中有一帧图像误检测到管道内噪音, 则容易导致下

一帧图像检测时目标丢失。为了有效消除管道内噪音的影响, 必须充分利用目标在时域中运动连续性这一先验信息, 对目标的运动方向进行估计, 并最终根据估计结果, 排除管道内运动方向区域以外的噪音干扰。

目标的运动状态方程由牛顿运动方程确定, 目标的横坐标、纵坐标分别为

$$X_{k+1} = X_k + X'_k T + \frac{X''_k T^2}{2} \quad (5)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + Y'_k T + \frac{Y''_k T^2}{2} \quad (6)$$

式中 (X_{k+1}, Y_{k+1}) , (X_k, Y_k) 分别表示管道在第 $k+1$ 帧和第 k 帧时的中心点坐标位置, (X'_k, Y'_k) 表示管道内检测到的点目标在第 k 帧时的运动速度, (X''_k, Y''_k) 表示管道内检测到的点目标在第 k 帧时的运动加速度, T 表示帧时。

由于是点目标, 假设目标的运动速度不超过 1 pixel/frame。因此, 可以认为目标是匀速运动的, 式(5)和式(6)可以简化为

$$X_{k+1} = X_k + X'_k T \quad (7)$$

$$Y_{k+1} = Y_k + Y'_k T \quad (8)$$

通过式(7)和式(8)对目标下一帧的运动方向进行估计, 满足条件的像素判定为目标, 其余像素则判为噪音干扰。

2.3 算法步骤

首先, 假设目标的运动速度不超过 1 pixel/frame, 并且目标最大丢失率为每 5 帧中有一帧丢失。在此假设基础上, 按下列步骤进行:

第 1 步, 取第 1 帧图像作为当前帧, 确定该图像中的所有候选目标点 P_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), 并记录它们的位置信息;

第 2 步, 构造一个由 n 帧图像组成的检测管道, 一个由两帧图像组成的与管道和一个空白的检测帧, 并进行初始化; 针对本文的点目标, 设置管道大小为 5×5 , 管道长度为 5;

第 3 步, 从第 1 帧图像开始, 连续输入 n 帧图像, 对于即将进入管道的每一帧图像, 都要同已存在于管道内的经过形态学膨胀处理的前一帧图像进行相与运算, 管道建立后每新进入一帧图像, 完成检测的图像就推出管道, 其余图像依次流动;

第 4 步, 从第 2 个帧周期开始进行目标运动方向估计, 根据第 $k-1$ 帧和第 k 帧目标位置数据估计第 $k+1$ 帧目标位置;

第 5 步, 对所有的候选目标点 P_i , 在下一帧中根据运动方向估计结果判定目标位置, 记录该帧中的目标点位置, 并将其设为候选目标点的当前位置;

第6步,更新管道,转到第4步,直到所有图像处理完毕;

第7步,输出目标运动轨迹.

3 实验结果与分析

采用美国空军实验室拍摄的实测图像^[11]验证算法的有效性,该图像的红外场景是在云层中飞行的红外弱点目标图像序列.图像数据是12位无符号整型,图像大小为 320×244 ,帧频为每秒30帧,一共95帧.

图3(a)显示的是没有经过处理的初始图像,图

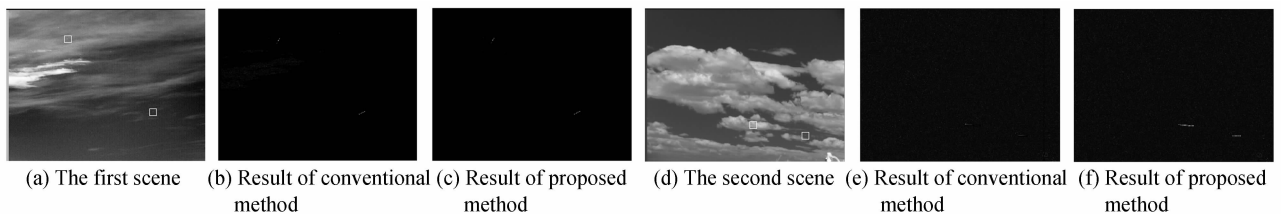


图3 仿真结果图

Fig. 3 Diagram of simulation results

图3(d)显示了另一幅红外场景,图中一共含有两个目标,一个位于像素(175,186)附近,一个位于像素(256,203)附近,两个目标都很小,接近于单个像素,从单帧的角度来看,几乎可以认为是噪音;图3(e)是传统管道滤波法的检测结果,因为噪音干扰的影响,目标的检测轨迹并不清晰;图3(f)是本文算法的检测结果,可以看出,复杂云背景和系统噪音的影响都被基本消除了,目标的检测轨迹更加清晰.

4 结论

本文提出的基于运动方向估计的管道滤波算法,利用目标的先验信息,根据目标运动轨迹估计目标运动方向,然后依据估计结果去除管道内噪音对目标的干扰.仿真结果表明,针对复杂红外背景中管道内强噪音的干扰导致在低信噪比条件下目标检测概率较低的情况,本方法能够很好地抑制管道内噪音的影响,提高目标的检测概率,增强目标抗管道内噪音干扰的能力.

参考文献

- [1] WANG G, INIGO R M, MCVEY E S. A single-pixel target detection & tracking system[C]. *IEEE Inter. Confer. On Pattern Recognition*, 1990, 99-103.
- [2] PENG Jia-xiong, ZHOU Wen-lin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(12): 47-51. 彭嘉雄,周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. *电子学报*, 1999, **27**(12): 47-51.
- [3] LIU Gang, LIANG Xiao-geng. Detection of aerial small target in infrared image based on wavelet transform and pipeline filter[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, **47**(30): 198-201. 刘刚,梁晓庚. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检

中一共含有两个目标,一个位于像素(98,51)附近,一个位于像素(235,167)附近,两个目标都很小,接近于单个像素,为了便于指示,两个目标分别被正方形的白色方框包围,从单帧的图像特征来看,两个目标几乎都可以认为是噪音;图3(b)是传统管道滤波法的检测结果,图中左上部分存在大量的云杂波噪音干扰;图3(c)是本文算法的最终检测结果,其中较亮的两处对应目标出现的位置,可以看出,相对于传统方法,本文算法表现出了更优的抗噪音干扰能力,复杂云背景和系统噪音的影响都被明显消除了.

- [4] LIAN Ke, WANG Hou-jun, LI Dan. Pipeline filtering method based on feature analysis of local gray level of small infrared target[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, **31**(4): 200-203. 连可,王厚军,李丹. 基于红外目标局部灰度特性分析的管道滤波算法[J]. *弹箭与制导学报*, 2011, **31**(4): 200-203.
- [5] DONG Wei-ke, XIANG Jian-yong, YUAN Sheng-chun. A precisely tracking method of IR weak target[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3): 184-186. 董维科,向健勇,袁胜春. 一种红外弱小目标精跟踪方法[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(3): 184-186.
- [6] WANG Rui, GUO Zhi, LI Qing-bo. Dynamic targets automatic detection in infrared image based on enhanced morphology algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(z2): 141-145. 王睿,国智,李庆波. 一种自动检测红外运动目标的改进形态学方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(z2): 141-145.
- [7] HAN Yu-sheng, YUAN Guang-lin, LI Cong-li, et al. Design and implement of pipeline filter algorithm based on across linker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(z4): 202-206. 韩裕生,袁广林,李从利,等. 基于十字链表的管道滤波算法设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(z4): 202-206.
- [8] ZHOU Hua. Detection algorithm of infrared weak targets in the sky background image[J]. *Journal of Xi'an University of Post and Telecom*, 2010, **15**(3): 116-118. 周花. 一种空背景下红外弱小目标检测算法[J]. *西安邮电学院学报*, 2010, **15**(3): 116-118.
- [9] ZHAO Xiao-ming, YUAN Sheng-chun, MA Xiao-li, et al. Research on infrared small target detection technique based on moving pipeline filtering[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(5): 295-297. 赵小明,袁胜春,马晓丽,等. 基于移动式管道滤波的红外小目标检测方法研究[J]. *红外技术*, 2009, **31**(5): 295-297.
- [10] STEVEN M K. Fundamentals of statistical signal processing [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2003, 502-512.
- [11] MURGUIA J E, MOONEY J M, EWING W S. Evaluation of a PtSi infrared camera[J]. *Optical Engineering*, 1990, **29**(7): 786-794.