

文章编号:1004-4213(2011)07-1020-5

基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的红外弱小目标检测

马文伟¹,赵永强¹,张国华²,揭斐然²,潘泉¹,李国强²,刘永进²

(1 西北工业大学 自动化学院,西安 710072)

(2 洛阳光电设备研究所 光电控制重点实验室,河南 洛阳 471009)

摘 要:针对低信噪比灰度图像中弱小目标检测的难题,分析了红外弱小目标成像的特点,提出了基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的目标检测算法.利用目标运动的连续性、规律性和噪音产生的随机性,结合数学形态学结构元素的特点,研究了一种多结构元素形态滤波的管道滤波方法,通过流水线管道检测目标运动轨迹.实验结果表明,该算法应用于复杂背景下低信噪比的红外弱小目标图像能够得到较理想的结果,并且目标检测概率高,速度快,虚警率低.

关键词:目标检测;背景抑制;数学形态学;自适应分割;管道滤波

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114007.1020

0 引言

红外远程精确打击和预警系统都离不开高性能的红外弱小目标检测算法的支持,红外弱小目标检测算法性能好坏将直接影响到打击准确度和预警性能.在红外图像中,远距离探测得到的红外目标呈现斑点状并且无明显形状信息,可检测到的信号相对较弱,特别是在复杂背景干扰下,目标被大量噪音所淹没,导致图像的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)很低,弱小目标检测工作变得困难起来. SPIE (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers)中定义弱小目标所占的像素大小不超过 80 像素(9×9),约是一幅 256×256 图像的 0.12%^[1].

目前,针对复杂背景下目标检测的问题已经提出了大量的算法,常用的主要是基于时域滤波^[2]、频域滤波^[3]、匹配滤波^[4]和小波域滤波^[5]等,这些算法在信噪比较高时效果不错,但在信噪比较低时容易产生大量的虚假目标,导致检测的失败.而基于 TBD(检测前跟踪)的算法如动态规划方法、多级假设检验方法等,一般逻辑结构比较复杂,计算量大、实时性差,不易于硬件实现.本文对于低信噪比弱小目标的检测问题,提出一种基于多结构元素形态滤波与自适应阈值图像分割相结合的算法,它能提高

图像信噪比,滤除孤立的噪音,自动分割出弱小目标,而且计算量小,实时性较好.实验证明,该算法应用于复杂背景下红外弱小目标能得到较理想的效果.

1 算法过程分析

1.1 图像预处理

根据红外传感器成像的特点,可建立包含有目标的红外场景图像 $f(m, n)$ 数学模型为

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_N(x, y) + f_B(x, y) \quad (1)$$

式中, $f(x, y)$ 是红外图像的灰度值, $f_T(x, y)$ 是目标点灰度值, $f_N(x, y)$ 是噪音图像灰度值, $f_B(x, y)$ 是背景图像灰度值^[6].

在红外图像中,温度场呈非线性分布,并且相邻行间有很强的相关性.根据红外图像的这一特性,可将某行红外图像的像素灰度减去上一行或同一行的灰度均值,将有效地抑制大气温度的非线性分布、大的云团和大部分地物,从而对原图像中目标点进行增强,以达到提高图像信噪比的目的.

1.2 多结构元素形态滤波

数学形态学是一种非线性滤波方法, Minkowski 结构和差运算,即形态和差(膨胀与腐蚀)是数学形态学的基础.形态滤波属于非线性信号

基金项目:国家自然科学基金(No. 61071172, No. 60602056, No. 60634030)、西北工业大学基础研究基金(No. JC200941)、航空科学基金(No. 20105153022)、国防科技项目(No. 9140C460205091303)和国防科技重点实验室项目资助

第一作者:马文伟(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为红外图像处理、图像融合以及模式识别的核方法. Email: 545656202@163.com

通讯作者:赵永强(1976—),男,副教授,主要研究方向为图像处理、模式识别、偏振遥感、仿生视觉、信息融合等. Email: zhaoyq@nwpu.edu.cn

收稿日期:2011-01-15; **修回日期:**2011-05-13

变换处理,它利用信号的局部特征对信号进行修正,形态滤波器能有效地滤除灰度图像中的噪音^[7].

形态学运算与其他运算的结合以及多级结构元素的使用可以提高基于形态学的滤波器性能^[8].例如,经典的单一结构元素形态滤波器 Top-Hat 变换以灰度值开运算为基础,可过滤最大噪音,其定义为

$$\text{HAT}(f) = f - (f \circ b) \quad (2)$$

$$f \circ b = f \ominus b \oplus b \quad (3)$$

由于开运算是一种非扩展性运算,处理过程处在图像的下方,所以 $\text{HAT}(f)$ 总是非负的.由图 1^[9]可知,开启操作能够消除与结构元素相比尺寸较小的亮细节,而保持图像整体灰度值和大的亮度区域基本不受影响.由于被滤掉的噪音位于信号上方,故可将信号上方的尖峰滤掉.但如果图像中同时混有正、负脉冲信号,开运算在滤除正脉冲噪音的同时,也增大了负脉冲噪音的范围,原来呈离散状态的负脉冲噪音,在某些局部形成噪音块,当使用同样大小的结构元素去膨胀图像时,负脉冲噪音信号由于面积较大,而很难被滤去.

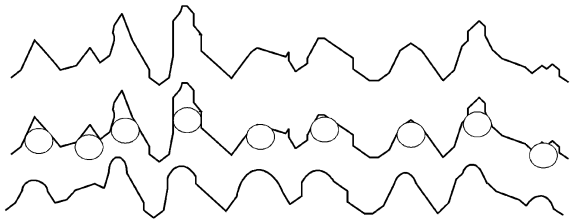


图 1 灰度开启示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gray open

为避免单一结构元素形态滤波带来的缺点,本文选择基于多结构元素的开闭滤波器(或闭开滤波器).它对原始图像依次进行开运算和闭运算,可用来同时抑制正、负脉冲噪音信号.同时,在开、闭运算级联过程中选择不同大小或形状的结构元素,将其定义为

$$\text{NOC}[f(x)] = (f \circ b_1 \cdot b_2)(x) \quad (4)$$

式中, b_1 和 b_2 为两个不同的结构元素,且 $b_1 \subseteq b_2$.

该方法可很好地抑制图像中的正、负脉冲噪音,在噪音抑制和细节保持方面有较好的性能.

1.3 自适应门限阈值分割

考虑到红外图像为热辐射图像,目标通常灰度值较高,而且小目标的面积小,亮度变化较小,本文提出基于图像均值的自适应阈值分割算法.

设一幅红外图像灰度矩阵为 $f(x, y)$, 大小为 $M \times N$, 采用对整幅图像进行逐行扫描的方式进行目标分割.在扫描第 k 次图像时,以第 $k-1$ 次图像的均值 $\text{mean}(k-1)$ 作为本次判断的门限,门限判决公式为

$$f(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & f(x, y) \geq \text{mean}(k-1) \\ 0, & f(x, y) < \text{mean}(k-1) \end{cases} \quad (5)$$

对于小目标图像,利用成像传感器的灵敏度、分辨率、可成像距离和目标可能的实际大小等信息,可估计目标在图像中的面积大小,即所占像素数目 S .故本文采用迭代的方式,以目标估计值和图像最大值作为整个循环进行的参考条件,这样做既可以提高目标检测率,又可以避免因为取值极端而造成的目标实际大小的“腐蚀”,即测量值小于实际值.由于多结构元素形态滤波效果较好,并且将小于 $\text{mean}(k-1)$ 的像素灰度取为 0,所以每次迭代的计算量不大,需要累加的元素数目较少,能够实现对图像中弱小目标较快、较完整的分割.

1.4 多结构元素形态滤波的管道滤波方法

在红外传感器采样帧率较大的条件下,可以认为小目标的灰度值具有空间的连续性和平滑性.在连续的两帧之间目标像素点不可能出现较大的跳跃.而噪音由于其随机性较大,所以每帧出现的位置具有不确定性.例如,沿着时间轴,一个采样周期,目标在空间坐标上运动一小段距离.针对这种情况,本文采用流水线结构^[10],它能够将有规律的目标轨迹与噪音的随机分布区分开.

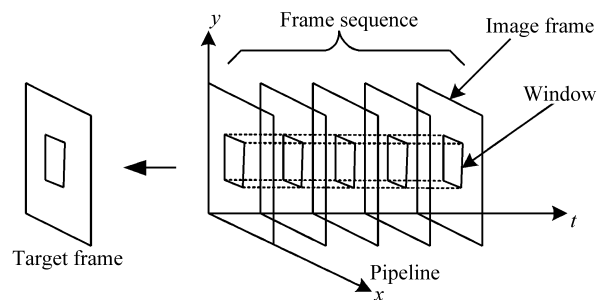


图 2 流水线结构

Fig. 2 Pipeline structure

原始图像序列经过逐帧处理后,已经成为一系列二值图像.一般情况下,保留下来的虚假目标较多,故在流水线结构之前加上连续性滤波环节,即定义一个“与”函数

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if}(x=1, y=1) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $x \in \{0, 1\}$, $y \in \{0, 1\}$ 都是二值图像的灰度值.

连续性滤波由一个“与”管道流水线完成,主要目的是将第 $n+1$ 帧二值图像与第 n 帧二值图像膨胀后的标记帧进行相“与”运算.

传统的管道滤波方法是将整个管道窗口在整个图像平面上进行移动,寻找窗口序列中像素和大于某个阈值,从而认定在该窗口中存在目标.该方法计算量较大,不适合实时的目标轨迹的检测,尤其是图像比较大的情况.本文采用质心窗口的方法,即以图

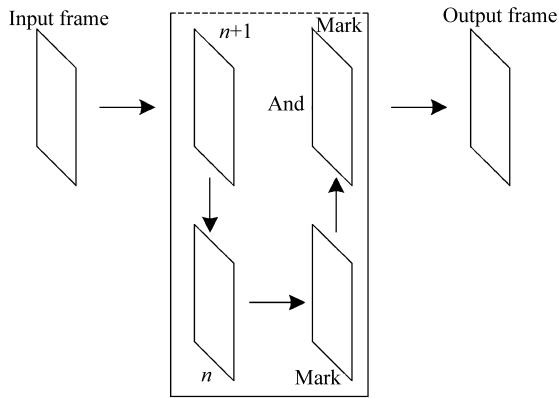


图3 连续性滤波
Fig. 3 Continuous filtering

像的质心为窗口的中心,进行管道的滤波.所谓质心,是指目标图像的灰度中心,二维图像中质心 (x, y) 定义为

$$x = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}} \quad (7)$$

式中, x_{ij} 和 y_{ij} 分别表示图像在 (i, j) 点出的横坐标和纵坐标.

改进的管道滤波方法的步骤如下:

1)对各参量进行初始化:假定管道所能容纳的图像帧数为 N ,直径(邻域)大小等,并设置一个空白的检测帧;

2)将“与”管道的第1帧图像进行膨胀得到标记帧,第2帧图像与第1帧的标记帧进行“与”运算,结果帧输入到流水线管道,并计算结果帧的质心.

3)从“与”管道的第2帧开始,用累计 N 次连续性滤波的结果初始化流水线管道;

4)从第 $N+1$ 帧开始,正式进入目标检测状态:流水线管道采取“先进先出”的原则,以头帧图像的质心为中心建立窗口,计算窗口序列中所有像素的和 sum ,并与阈值 T 进行比较,若 $sum > T$,则将头帧与检测帧进行“或”运算;

5)多次重复步骤4),将得到多帧图像弱小目标在检测帧中的轨迹.

2 实验结果与分析

实验环境为:Pentium(R) 4、CPU:3.06GHz、内存:1.99GB、软件平台:MATLAB7.8.0.

本次试验对象为红外传感器实际采集的图像序列,图像大小为 240×320 ,灰度级为256,背景为起伏的云层及地面.图4为用本文算法对目标大小为 1×2 (左侧)、 2×2 (右侧)的原始图像进行分割的结果,算法运行时间分别为1.374 s和1.363 s.其中图4(a₁)和(a₂)为原始图像,图4(b₁)和(b₂)为进行预处理的结果,图4(c₁)和(c₂)为多结构元素形态滤波的效果,图4(d₁)和(d₂)为自适应阈值分割结果.

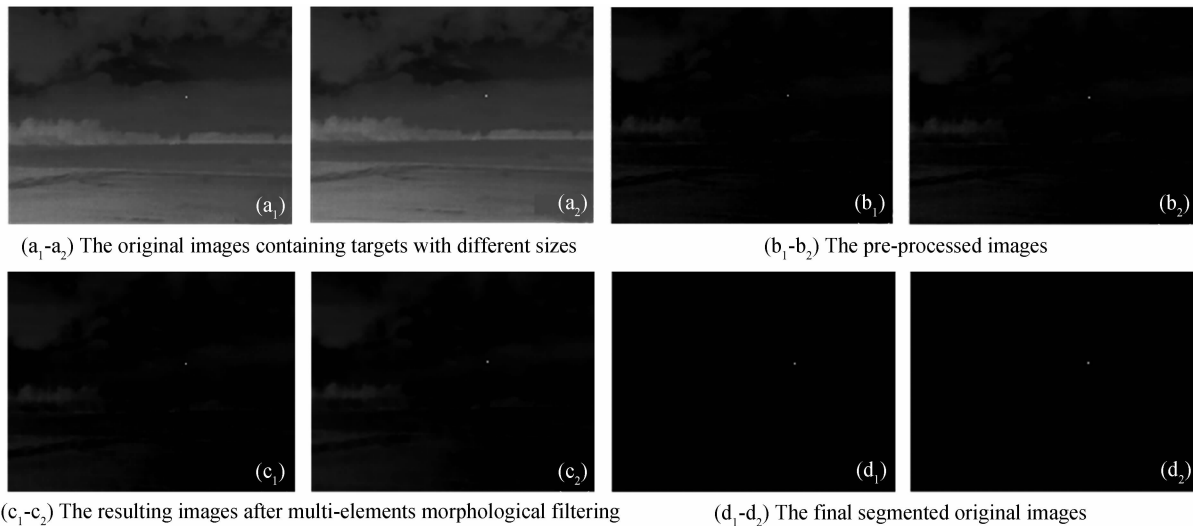


图4 复杂背景下红外弱小目标检测

Fig. 4 Infrared dim target detection in complex background

图4的原始图像可近似为无噪音污染图像,为验证本文算法的抗噪性,故对以上两幅图像施加不同信噪比的高斯噪音,其中,信噪比的定义为

$$SNR = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \text{mean}(f)]^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - g(x, y)]^2} \right\} \quad (8)$$

$$\text{mean}(f) = \frac{1}{M * N} \left[\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \right] \quad (9)$$

式中 $\text{mean}(f)$ 是原始图像的灰度均值, $f(x, y)$ 为原始图像的灰度, $g(x, y) = f(x, y) + \text{noise}(x, y)$ 为加入噪音后每个像素的灰度, $\text{noise}(x, y)$ 为噪音图像的灰度值.统计不同信噪比条件下图像中弱小目标的检测率与虚警率,得到如图5的结果.

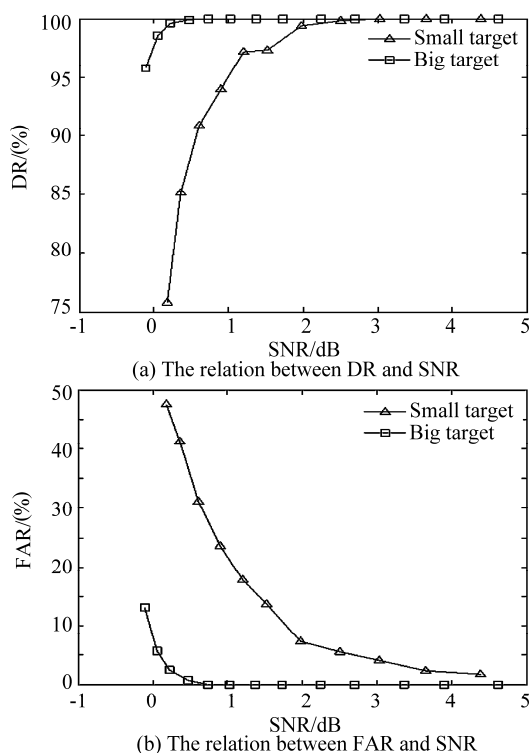


图 5 目标像素为 1×2 、 2×2 的图像检测率 (Detection Rate, DR)、虚警率 (False Alarm Rate, FAR) 分别与信噪比的关系

Fig. 5 Relations between DR and SNR, FAR and SNR for images with target pixels 1×2 、 2×2

从统计数据可以看出, 目标大小 1×2 的图像在 $SNR > 2$ dB 时检测率为 100%, 在 $SNR \geq 4.3855$ dB 时虚警率为 1.7%。目标大小为 2×2 的图像在 $SNR > 1$ dB 时检测率为 100%, 在 $SNR \geq 1$ dB 时虚警率为 0。并且多次实验发现, 在 SNR 不变的条件下, 目标越大, 检测率越大, 虚警率越小。

另外, 本文将多结构元素形态滤波和 Top-Hat 变换做了对比, 如图 6, 处理对象是加过噪音的图像, 其中, 6(a) 为图像做 Top-Hat 变换后的曲线图, 图 6(b) 为图像做多结构元素形态滤波后的曲线图。

由图 6 看出, 经过多结构元素形态滤波后, 目标幅值明显大于背景和噪音, 这为以后的自适应阈值

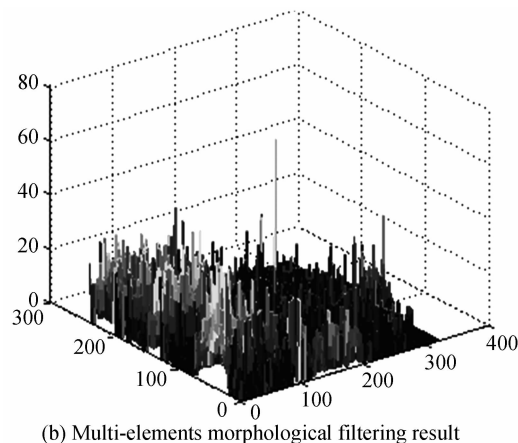
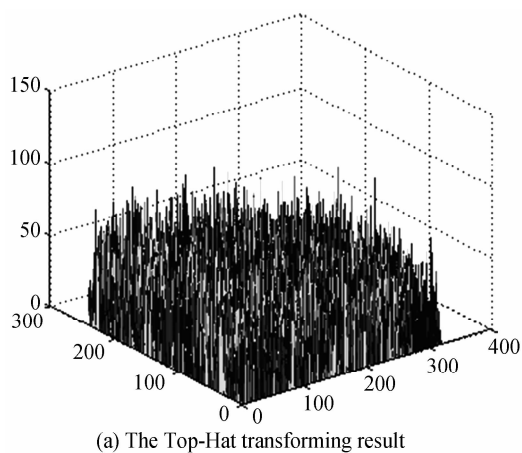
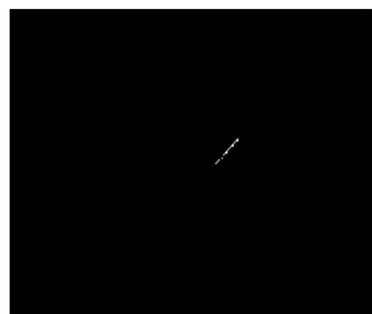


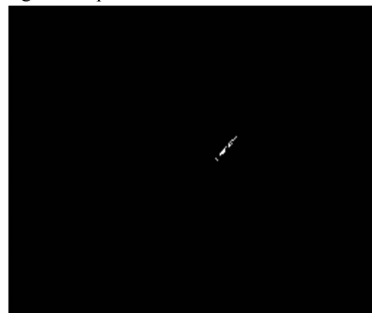
图 6 目标像素为 1×2 的图像做 Top-Hat 变换和多结构元素形态滤波的曲面图
Fig. 6 Surface figures of Top-Hat transformation and multi-elements morphological filtering for image with target pixels 1×2

滤波提供很大的空间, 而经过 Top-Hat 变换后的图像小目标淹没在背景和噪音里, 对比可知, 多结构元素形态滤波在抗噪性方面具有较强的鲁棒性。

图 7 为包含不同大小目标的图像经过管道滤波后的结果。其中, 图 7(a) 为目标大小为 1×2 像素的图像在 $SNR = 0.1774$ dB 时滤波结果, 图 7(b) 为目标大小为 2×2 像素的图像在 $SNR = -0.1074$ dB 时的滤波结果。从图 7 可以看出, 在这两个 SNR 下, 图像分割后虚警率较大, 但经过管道滤波之后, 多帧图像中目标的轨迹依然可以辨别出来。



(a) The pipeline filtering result for images containing target with pixels 1×2 under $SNR = 0.1774$



(b) The pipeline filtering result for images containing target with pixels 2×2 under $SNR = -0.1074$

图 7 含有不同大小目标的图像在不同 SNR 下管道滤波结果

Fig. 7 The results of pipeline filter for images with targets of different sizes under different SNR

3 结论

在多结构元素形态滤波方法基础上,引入自适应阈值分割技术,使复杂背景下红外弱小目标的检测率和虚警率得到较大改善,改进的管道滤波算法可以在一定程度上弥补低信噪比条件下虚警率较高的缺点,并且该算法运行速度快。相比传统的 Top-Hat 变换滤波方法,本文算法能够有效地抑制背景和噪音,为后面进一步的阈值分割提供了较大的空间,另外,整个运行过程计算量不大,所需时间较短。但该方法在目标大小估计方面更多的要依据经验值,因此如何根据红外传感器分辨率、灵敏度和成像距离等因素估计目标大小成为今后的研究方向。

参考文献

- [1] ZHANG Wei, CONG Ming-yu, WANG Li-ping. Algorithm for optical weak small targets detection and tracking: Review[J]. *IEEE International Conference on Neural Networks & Signal Processing*, 2003, **12**:643-647.
- [2] LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang, LI Qiu-hua. Detection of moving and weak target in heavy clutter background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(2):208-211.
李吉成, 沈振康, 李秋华. 强背景杂波条件下运动的弱小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(2):208-211.
- [3] ZHANG Bi-yin, ZHANG Tian-xu, CAO Zhi-guo, et al. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(10):106401-1-6.
- [4] REED I S, GAGLIARDI R M, STOTTS. Optical moving target detection with 3-Dmatched filtering[J]. *IEEE Trans on AE-S*, 1988, **24**(4):327-336.
- [5] ABDELKAWY E, MCGAUGHY D. Wavelet - based image target detection methods [C]. *SPIE, Automatic Target Recognition XIII*, 2007, **5094**:337-347.
- [6] LIU Jin, JI Hong-bing. Detection method for small targets in the IR image based on the variable weighted pipeline filter[J]. *Journal of Xidian University*, 2007, **34**(5):743-747.
刘靳, 姬红兵. 基于移动式加权管道滤波的红外弱小目标检测[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **34**(5):743-747.
- [7] PHILIPPE S M, CHEN J S, MEDIONI G. Adaptive smoothing: A general tool for early vision [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(6):514-529.
- [8] YANG Li-rui, DING Run-tao. Morphological filters with multiple structuring elements [C]. *China 1991 International Conference on Circuits and Systems*, 1991:812-815.
- [9] 章毓晋. 图像工程(中册)图像分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2005:402-407.
- [10] WANG Gan, Inigo Rafael M, McVev Eugene S. A single pixel target detection and tracking system [C]. *International Conference on Pattern Recognition*. 1990, **1**:99-103.

Infrared Dim Target Detection Based on Multi-Structural Element Morphological Filter Combined with Adaptive Threshold Segmentation

MA Wen-wei¹, ZHAO Yong-qiang¹, ZHANG Guo-hua², JIE Fei-ran²,
PAN Quan¹, LI Guo-qiang², LIU Yong-jin²

(1 College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2 Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang Institute of Optical Electronic Equipment, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: Aiming at detection puzzle of small target in grayscale image with low SNR, the characteristics of infrared small targets were analyzed and a detection algorithm was put forward based on multi-structural element morphological filter combined with adaptive threshold segmentation. In view of the continuity and regularity of motion for target and the randomness of generation for noise, and considering the characteristics of structure element, the design of morphological filter and a technique via assembly line and pipe scheme were considered to detect target trajectory. Experiments show that the algorithm is able to obtain excellent results toward low SNR infrared image under complex background, and has high detection probability, high speed and low false alarm rate.

Key words: Target detection; Background suppression; Morphology; Adaptive segmentation; Pipeline filter