

末敏弹稳态扫描段红外特性的实验研究

张俊,刘荣忠,郭锐,马晓冬,赵博博,邦志辉,张鹏

(南京理工大学机械工程学院智能弹药国防重点学科实验室,江苏南京 210094)

摘要:以考核红外预警系统对末敏弹的探测识别效能为应用背景,通过在高空热气球上投放末敏弹,同时利用地面热像仪实时跟踪捕获的实验方法,获得了复杂云层背景下,末敏弹稳态下落过程中的红外图像序列。针对图像模糊、信噪比低等特点,提出一种组合空域滤波的目标检测方法,该方法利用小波阈值和中值滤波去噪,Top-Hat 变换抑制背景,最后通过形态学滤波提取目标并增强目标和背景的灰度对比度。多帧检测结果显示:该组合滤波算法能够有效提取实验图像序列中的末敏弹,为进一步的目标跟踪技术研究奠定了基础。

关键词:末敏弹; 稳态扫描; 红外图像; 弱小目标检测

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2876-06

Experimental study on infrared characteristics of terminal-sensitive projectile at steady-state scanning stage

Zhang Jun, Liu Rongzhong, Guo Rui, Ma Xiaodong, Zhao Bobo, Bang Zhihui, Zhang Peng

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Taking the infrared early warning system for detecting and identifying the terminal-sensitive projectile (TSP) as application background, thermal camera was used to capture and track the TSP which was thrown from a hot air balloon in real time, and the infrared image sequences in complex cloud layer background of TSP in steady-state falling were obtained. Since infrared images had the features of fuzzy, low SNR et al, a detection algorithm of combination spatial filter was introduced. In this method, the wavelet threshold and median filter algorithm were combined to denoise, the Top-Hat transform was presented to restrain the background, and target feature was extracted and the grayscale contrast between the target and the background was enhanced with the morphological filter. The multi-frame detection results show that the combined filter algorithm can effectively detect the TSP from the experimental image sequences, thus providing basis for further technology research of target tracking.

Key words: terminal-sensitive projectile; steady-state scanning; infrared image;
dim-small target detection

收稿日期:2013-03-05; 修订日期:2013-04-13

基金项目:国家自然科学基金(11102088);江苏省研究生培养创新计划(CXZZ12-0218)

作者简介:张俊(1983-),男,博士生,主要从事末敏弹红外辐射特性方面的研究。Email:15250980370@139.com

导师简介:刘荣忠(1955-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事末敏弹总体技术方面的研究。Email:Liurongz116@163.com

0 引 言

近年来,兼收传统弹药与导弹精华的灵巧弹药异军突起,末敏弹作为灵巧弹药的典型代表,是一种将复合探测系统与爆炸成形弹丸技术应用于子母弹的新型弹种。因其具有毁伤效果好、效费比高等突出优点,美国早在 80 年代就开始大批量装备部队并在实战中取得了良好的作战效果。据最新报道,国内的末敏弹研制技术也取得了突破性进展,但批量生产仍有一定距离。军事武器的不断发展归因于对抗与反对抗技术的不断斗争,因此,对抗这类灵巧弹药成为必须面临的一大难题,然而,就国内外公开文献来看,这一问题的研究鲜有报道。根据末敏弹的目标特性,包括运动规律、几何特征及红外辐射特性等,红外侦查预警系统尽可能早地发现末敏弹,使被攻击目标有足够的反应时间,以采取相应的应对措施,如弹射诱饵气囊、发射红外烟幕弹及干扰信号等,可以有效提高其生存概率。

复杂背景中红外小目标的检测是监视和告警系统的重要组成部分,国内外科科研人员针对该问题进行了大量研究。其中基于图像滤波的背景抑制方法最为普遍,主要包括:最小均方误差滤波;空间匹配滤波;中值滤波;形态学滤波;神经网络滤波;模糊理论滤波及小波变换滤波^[1-4]等。但是,针对具体实验结果,开展多级组合滤波的检测方法研究较少。

文中通过在热气球上投放末敏伞弹系统,模拟其稳态扫描运动,同时利用地面高分辨率热像仪实时跟踪捕获的方法,获得了复杂云层背景下的末敏弹红外图像序列。针对实验结果,提出一种组合空域滤波的目标检测算法,该算法由小波阈值去噪、中值滤波、Top-Hat 变换及灰度形态学滤波组成,检测结果表明:该方法能够有效提取红外实验图像序列中的末敏弹。

1 末敏弹的作用过程与几何模型

末敏弹由弹体、减速减旋装置、稳态扫描装置、伞弹连接装置、中央控制器、复合探测系统以及 EFP 战斗部组成^[5]。当作为运载体的末敏母弹飞行至预定目标上空后,末敏弹被抛射出来,自由下落一定高度后,减速减旋装置弹出,在稳定末敏弹运动的同

时,将其速度和转速按规定的时间或距离降至有利于涡环旋转降落伞可靠张开的条件,随后以稳定的落速和转速下落,并保证弹体纵轴与铅垂方向以一定角度对地面进行螺旋式的稳态扫描,当复合探测系统搜索并锁定被攻击的装甲目标时,起爆 EFP 战斗部。图 1 为某型号末敏弹稳态扫描段的几何模型,由弹体、涡环旋转降落伞、伞绳、伞盘及连接杆组成。

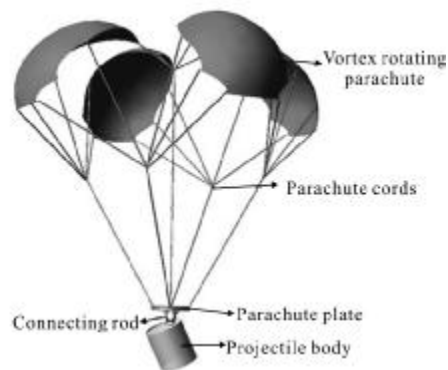


图 1 某型号末敏弹稳态扫描段的几何模型

Fig.1 Geometrical model of type TSP at steady-state scanning stage

2 末敏弹稳态扫描段的红外实验图像

2.1 红外辐射特性分析

末敏弹在稳态扫描运动过程中,由于降落伞的存在,其下落速度约 12 m/s,不存在气动加热,甚至气动降温显著,其表面热辐射主要来自于腔内热电池工作产生的热量传递和环境热辐射,因此,其辐射特征较弱。随着红外探测识别技术的迅速发展,尤其是非制冷型焦平面红外探测器的探测能力得到了很大提高,因此,可以利用高分辨率热像仪研究末敏弹稳态下落过程中的红外特性,其热成像对于考核侦查预警系统对末敏弹的探测识别能力具有重要应用价值。

2.2 实验布局与测试环境

图 2 为实验布局简图。热气球距地面 200 m,以热气球在地面的投影为中心,等间距对称布置六个模拟装甲目标,以考核末敏弹上的红外与毫米波复合探测系统对金属目标的识别能力。高速摄影机的视场角一定,用来测试末敏弹的落速。热像仪为美国 MIKRON 型号,采用黑体标定后,发射率设定为 0.6,工作波段为 8~14 μm 。采用热像仪的配套软件 MIKROSPEC R/T 实时监测并存储实验图像,每秒存

储 25 帧。热像仪距热气球的地面投影点之间的距离为 150m。实验时天空多云,气温为 22℃;湿度 75%。

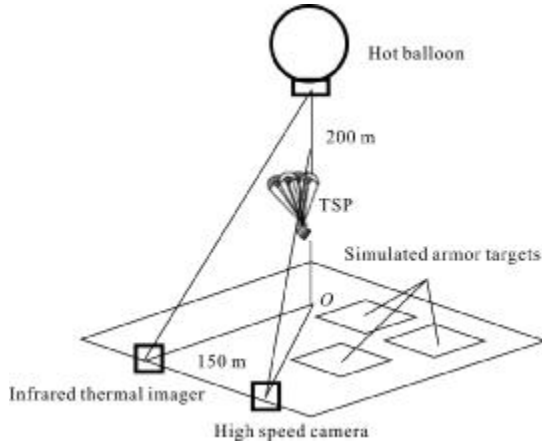


图 2 实验布局

Fig.2 Experimental layout

2.3 实验结果分析

图 3 为末敏弹稳态下落过程中的可见光成像,



图 3 末敏弹稳态下落的可见光图像

Fig.3 Visible image of TSP in steady-state falling

图 4 为末敏弹稳态下落过程中的红外图像序列。对比图 3、4 得出:在可见光成像中,能较清楚地分辨末敏弹的几何特征,而红外图像的空间分辨力比可见光低,这不仅是由于红外成像器件的灵敏度、分辨率以及噪声等原因,更主要是因为红外波段的辐射波长比可见光长。在红外成像中,复杂云层背景对成像的影响很大,目标为只占几像素到十几像素的灰度奇异点,缺乏目标的尺寸、形状等结构信息,属于典型的红外小目标图像特点。降落伞的红外特征比弹体明显,这是由于伞衣的几何尺寸相对较大,并且其表面辐射率相对较高。这里需要指出:由于目标的红外辐射特征弱,探测距离远,红外图像序列中的温度标尺基本是相同的,对进一步的目标检测没有利用价值,所以在图像中未加入温度标尺。

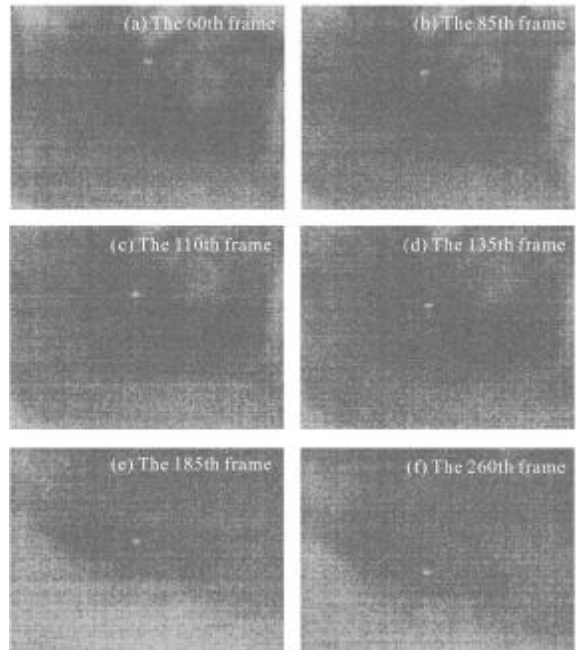


图 4 末敏弹稳态下落的红外图像序列

Fig.4 Infrared images of TSP in steady-state falling

3 实验结果处理

3.1 直方图均衡化与中值滤波

复杂背景中的动目标检测是提高红外预警系统、红外制导系统性能的关键技术,这是由于目标检测是跟踪与识别的基础,只有及时检测到背景中存在目标,才能保证后续工作的顺利开展^[6]。取其中一帧实验图像分析说明,图 5 为第 135 帧图像的三维灰度分布,图 6 为第 135 帧图像直方图均衡化前后的灰度概率分布。

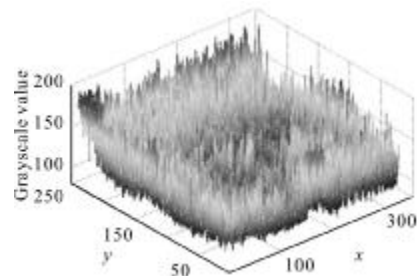


图 5 第 135 帧图像的三维灰度分布

Fig.5 3D grayscale distribution of the 135th frame

图 6 表明:红外实验图像的灰度集中在一个较窄的区间内,图像模糊,信噪比低,直方图均衡化是一种解决这一问题的常用方法,它根据图像的累积

直方图调整灰度级,其结果是扩展了像元的动态范围,以达到提高图像整体对比度的效果。

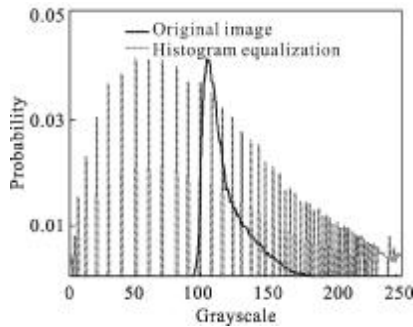


图 6 第 135 帧图像直方图均衡化前后的灰度概率
Fig.6 Grayscale probability of the 135th frame image before and after histogram equalization

图 7(a)为第 135 帧图像直方图均衡化后的图像,结果显示:末敏弹的目标特征得到了增强,但由于原灰度图像所占像素数偏少,经过灰度均衡化后,背景和噪声信号也被同时提高,不利于目标的进一步检测。因此,在直方图均衡化的基础上,又发展出了平台直方图均衡化和双向直方图均衡化^[7-8]。中值滤波是一种类似于卷积的邻域计算,把邻域中的像素按灰度级进行排序,然后选择该数组的中间值作为输出像素。采用三种结构元对第 135 帧图像进行处理,结果见图 7(b)、(c)、(d)。对比分析可知:结构元尺寸越大,抑制背景与噪声的能力越强,但容易引起图像

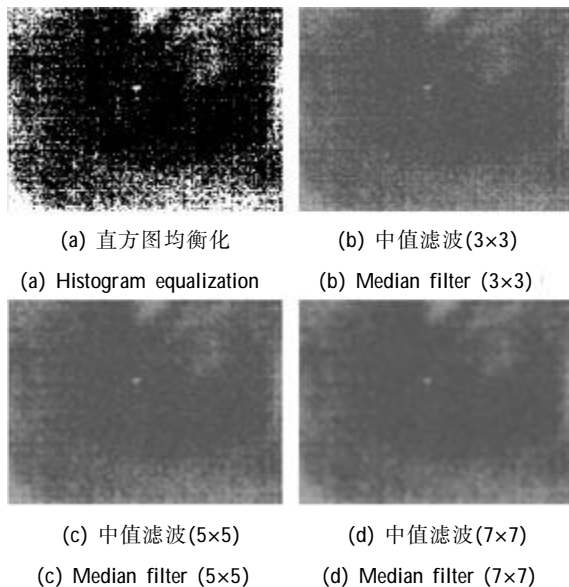


图 7 第 135 帧图像直方图均衡化与中值滤波检测结果
Fig.7 Histogram equalization and median filter of the 135th frame image

模糊;其中 5×5 结构元的处理效果最好,有效消除了孤立噪声点,并且在使末敏弹特征丢失的情况下,云层背景和随机噪声也得到了较好的抑制。

3.2 组合空域滤波检测方法

针对实验图像结果,通过应用 Matlab 多次仿真实验,总结出一套组合空域滤波的目标检测算法,首先利用小波阈值和中值滤波去噪,其次利用 Top-Hat 变换抑制背景,最后利用灰度形态学滤波提取目标并增强目标和背景的灰度对比度,图 8 为实验结果的处理流程。

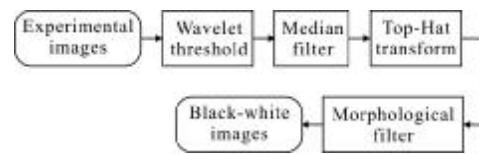


图 8 实验结果的处理流程
Fig.8 Flow chart of the experimental processing

图 9(a)为第 135 帧图像经小波阈值去噪后的图像,(b)为图 9(a)经 5×5 中值滤波后的图像,(c)为(b)经 Top-Hat 变换后的图像,(d)为(c)经形态学滤波后的图像。

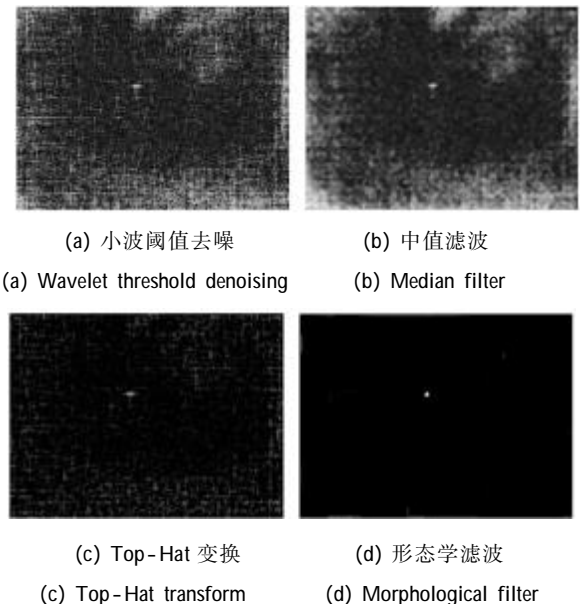


图 9 第 135 帧图像组合滤波检测结果

图 9 Combined filter of the 135th frame image

小波阈值去噪是寻找从实际信号空间到小波函数空间的最佳映射,以便得到原信号的最佳恢复。主要基于以下事实:即比较大的小波系数一般都是以实际信号为主,而比较小的系数则很大程度是噪声,

因此,通过选择合适的阈值,将小于阈值的系数置零,而保留大于阈值的小波系数;然后经过阈值函数映射,得到估计系数;最后对估计系数进行逆变换,就可以实现图像的去噪和重建。阈值或阈值函数的选取参见参考文献[9]。图 9(a)、(b)显示:经小波阈值去噪和中值滤波后,随机噪声和云层背景得到了抑制。为进一步的目标特征提取奠定了基础。Top-Hat 变换通过选取合适的结构元素去除小目标,使图像中只剩下背景,再用原始图像减去背景,就可将小目标提取出来。图 9(c)结果显示:经 Top-Hat 变换后,起伏变化的云层背景得到了大范围抑制,但目标特征也有所降低。在不使目标信号过度降低的情况下,应尽量选取大的结构元素,可得到更好的效果。形态学滤波是通过目标和结构元素相互作用的运算,得到目标更本质的形态。常用的灰度形态学运算有腐蚀和膨胀,腐蚀是一种消除边界点,使边界向内收缩的过程,膨胀则是使边界向外扩张的过程,在这两个基本运算的基础上,可以构造出数学形态学的运算族,如开、闭运算。

在图 9(c)的基础上进行灰度形态滤波可将末敏弹从背景中分离出来,首先通过开、闭及侵蚀运算去除孤立小点和毛刺,弥合孔洞和裂缝,进一步消除高斯噪声,使图像中只剩目标,但此时目标特征很弱,其次通过膨胀运算在不使目标过度失真的情况下增强目标特征,并且提高目标和背景的灰度对比度,结果见图 9(d)。图 10 为多帧实验图像经组合滤波处理

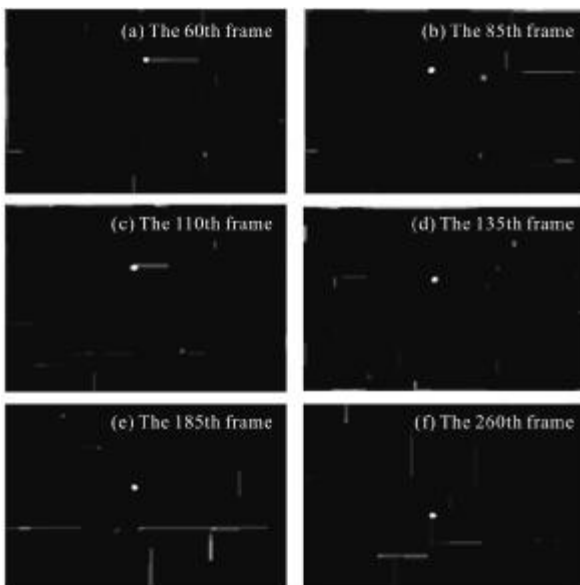


图 10 组合滤波处理后的图像序列

Fig.10 Image sequences after processing by combined filter

后的结果。由于在实验过程中,红外热像仪跟踪目标,背景发生变化,对目标检测有一定影响,如第 185 帧原始图像的背景和噪声信号相对较强,所以,其他帧的检测效果优于第 185 帧,但影响不大,基本得到了末敏弹与背景的二值化图像序列。说明该组合算法可以满足实验结果的处理要求,从而为进一步的末敏弹跟踪技术奠定了基础。

4 结论

通过外场实验方法获得了复杂云层背景下,末敏弹稳态下落过程中的动态红外图像序列,针对目标的红外辐射特征弱、淹没于云层背景中的弱小目标特点,提出一种组合空域滤波检测方法,多帧图像的检测结果显示:该算法可有效提取实验图像序列中的末敏弹。方法与结果可以为进一步的末敏弹跟踪捕获以及红外小目标的分割与检测等相关技术提供参考。

参考文献:

- [1] Hanbury A G, Serra J. Morphological operators on the unit circle [J]. *Image Processing*, 2001, 10(12): 1842-1850.
- [2] Su Xinzhu, Ji Hongbing, Gao Xinbo. Detection method for dim small IR targets based on mathematical morphology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 307-310. (in Chinese)
- [3] Zeng Ming, Li Jianxun. The small target detection in infrared image based on adaptive morphological Top-Hat filter [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(1): 90-93. (in Chinese)
- [4] Luo Jiqiang, Wu Zhensen, Dong Yanbing, et al. New method of IR small dim target detection in big clutter background [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 47-49. (in Chinese)
- [5] Zhang Jun, Liu Rongzhong, Guo Rui, et al. Surface temperature and infrared characteristics of terminal-sensitive

- projectile at deceleration and despinning stage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 311-316. (in Chinese)
- 张俊, 刘荣忠, 郭锐, 等. 末敏弹减速减旋段表面温度与辐射特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 311-316.
- [6] Li Junshan, Yang Wei, Zhang Xiongmei. *Infrared Image Processing, Analysis and Fusion* [M]. Beijing: Science Press, 2009: 99-108. (in Chinese)
- 李俊山, 杨威, 张雄美. *红外图像处理、分析与融合* [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 99-108.
- [7] Chen Qian, Bai Lianfa, Zhang Baomin. Histogram double equalization in infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 12(6): 428-430. (in Chinese)
- 陈钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2003, 12(6): 428-430.
- [8] Wang Bingjian, Liu Shangqian, Zhou Huixin, et al. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299-301. (in Chinese)
- 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. *光子学报*, 2005, 34(2): 299-301.
- [9] Xie Jiecheng, Zhang Dali, Xu Wenli. Overview on wavelet image denoising [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(3): 209-217. (in Chinese)
- 谢杰成, 张大力, 徐文立. 小波图像去噪综述[J]. *中国图像图形学报*, 2002, 7(3): 209-217.