

基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测算法

王卫华,牛照东,陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室,湖南长沙 410073)

摘要:针对红外警戒与跟踪系统中的实时弱小运动目标检测问题,提出了一种基于时空域融合滤波的小目标检测算法。算法在空域上利用形态学 Tophat 滤波抑制背景增强目标,在时域上通过改进的帧间差分方法增强运动目标,时空域处理结果融合分割后,根据目标运动的连续性和规则性,利用相邻帧中可能目标点之间的位置关系判别目标。算法全面考虑到了运动小目标在时域与空域方面的特性,时空域融合增强后可大大提高目标信噪比。通过实际录取的云层背景飞机目标红外数据检测表明,时空域融合滤波方法能更有效地从复杂背景中检测低信噪比运动小目标,减小虚警率,抗噪声干扰能力强。算法易于硬件实现,能够有效地应用于红外搜索与跟踪系统的实时目标检测中。

关键词:小目标检测; Tophat 变换; 时空域融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0714-05

Temporal-spatial fusion filtering algorithm for small infrared moving target detection

WANG Wei-hua, NIU Zhao-dong, CHEN Zeng-ping

(ATR Laboratory, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the real-time detection of small target in theIRST systems, a temporal-spatial fusion filtering algorithm is proposed. The algorithm suppresses background and enhances targets by morphologic Tophat transform in spatial, and detects moving target by improved frame difference method in temporal. After the fusion image segmentation of the temporal and spatial processing result, the real target can be detected by the relation of the possible target's position in adjoining frames on the basis of the target's moving continuity and regulation. The algorithm entirely considers the characteristic that the small moving target can be detected in temporal and spatial, it enormously increases the target's SNR after the temporal-spatial fusion enhancement. The detecting results of the true airplane's infrared image sequences in cloud background show that the algorithm can be more effective to detect low SNR moving small targets in complex background and reduce false alarm. The algorithm is easy to realize in hardware and can be applied effectively in the real-time target detection of theIRST systems.

收稿日期:2005-04-08; 修订日期:2005-05-19

作者简介:王卫华(1980-),男,湖北荆州人,博士生,主要研究方向为红外目标检测与识别。

Key words: Small target detection; Tophat transform; Temporal-spatial fusion

0 引言

红外警戒与跟踪系统(IRST)通过探测目标与背景之间微小温差或自辐射率差所引起的热辐射图像探测识别目标,具有智能化高、被动隐蔽、抗干扰能力强、跟踪精度高和作用距离远等优点,已成为目标光电探测技术的重要发展方向。为了尽可能早地发现目标,要求目标在很远处(通常为几十公里甚至上百公里)就能被探测到,此时目标的图像只占有一个或几个像素的面积,并且由于战场环境复杂、大气热辐射的不均匀性、探测器的内部噪声等因素的影响,目标几乎淹没在杂波背景中,不具有形状和结构信息,有时甚至可能丢失目标,给小目标检测带来了很大的难度。强杂波背景条件下低信噪比红外运动小目标的检测问题直接决定红外警戒与跟踪系统的作用距离及检测性能,其解决对于提高军用红外成像武器装备的作用距离具有非常重要的实际意义。

为了有效地从红外序列图像中检测到低信噪比的运动小目标,自20世纪70年代以来,国内外众多学者和研究人员进行了广泛而深入的研究,提出了许多有实际意义的检测算法,如基于高通滤波背景抑制的目标检测算法^[1,2]、基于神经网络的目标检测算法、基于小波变换的检测算法^[3]、基于时空三维匹配滤波的目标检测算法^[4]、基于动态规划的小目标检测算法^[5]、基于遗传算法的小目标检测算法等等。针对IRST系统要求的算法检测概率高,虚警概率小,实时性好,本文提出一种基于时空域融合滤波的小目标检测算法,在空域上,通过形态学方法^[6-8]增强目标;在时域上,根据多帧之间小目标的运动特性通过多帧差分方法检测目标。将时空域处理结果融合分割后,根据目标运动的连续性和规则性,利用相邻帧中可能目标点之间的位置关系判别目标。这样可以全面考虑运动小目标在时域与空域方面的特性,克服单从某一方面进行目标检测的局限性。通过实际录取的云层背景飞机目标红外数据检测表明,时空域融合滤波方法能更有效地从复杂背景中检测低信噪比运动小目标,减小虚警率,抗噪声干扰能力强,算法简单有效,实时性好。

1 空域滤波

1.1 红外场景模型

包含点目标的红外场景图像序列 $f(x,y,k)$ 可以描述为:

$$f(x,y,k) = f_T(x,y,k) + f_B(x,y) + n(x,y,k)$$

式中 $f_T(x,y,k)$ 为目标像素值; $f_B(x,y)$ 为背景图像; $n(x,y,k)$ 为噪声图像; k 为序列图像中的帧数。其中背景 $f_B(x,y)$ 是一个缓慢变化且非平稳的二维随机过程,通常在图像灰度空间分布上有较长的相关长度,它占据了场景图像 $f(x,y,k)$ 空间频率中的低频部分。噪声图像 $n(x,y,k)$ 是传感器及电路产生的各类噪声的总和,噪声与背景像素不相关,它在空间分布是随机的,帧间的空间分布没有相关性。

红外点目标孤立于背景,在灰度分布上表现出亮度高于背景的奇异。考虑到光学扩散影响,点目标一般可以用光学点扩散函数表示为:

$$f_T(x,y,k) = \tau \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\delta_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\delta_y}\right)^2\right]\right\}$$

式中 τ 为目标的强度幅值; δ_x, δ_y 为目标在 x, y 方向的扩散宽度。目标点像素 $f_T(x,y,k)$ 的亮度和尺寸在帧间只有较小变化,由于光学扩散的影响,每帧目标点尺寸大小为几个点左右,在图像中表现为是孤立的亮斑。

1.2 形态学滤波

形态学图像处理的基本思想是利用一个被称为结构元素的“探针”收集图像的信息,考察图像各个部分间的相互关系,了解图像的结构特征。这一点与人的视觉注意的特点有类似之处。作为探针的结构元素,可直接携带知识来探测研究图像的结构特点。

灰度形态学最基本的运算就是腐蚀、膨胀、开以及闭。其具体定义和运算规律可以参考相关文献^[9]。简言之,腐蚀灰度图像的结果是比背景暗的部分得到扩张,而比背景亮的部分受到收缩。膨胀灰度图像的结果是比背景亮的部分得到扩张,而比背景暗的部分受到收缩。而开运算定义为先作腐蚀再作膨胀的迭代运算,从消除比背景亮且尺寸比结构元素的结构小的

角度来看,开运算有些像非线性低通滤波器。但是开运算与阻止各种高空间频率的频域低通滤波器不同,当图像中的大小结构都有较高的空间频域时,开运算只允许大结构通过而能除去小的结构。对一幅图像进行开运算可消除图中的孤岛或尖峰等过亮的点。由前面分析的红外目标场景模型可知,开运算十分适合于红外小目标图像的背景估计和目标检测。当用目标图像作为模板结构对包含目标的红外图像进行开运算时,可以得到一幅去除了目标的背景图像。

基于形态学的 Tophat 变换滤波算子定义为:

$$HAT(f)=f-(f \circ g)$$

式中 g 为结构元素; $(f \circ g)$ 为用结构元素 g 对图像 f 进行灰度开运算,其结果即是估计出的背景,相减后,得到 $HAT(f)$ 即为滤除了背景的目标图像,当然,其中必然还包含了一些单点脉冲噪声,其可以在后面的时域融合处理中消除。

结构元素的选取对于 Tophat 变换的结果影响会很大,用不同的结构元素得到的结果会不同。由于光学扩散的影响,每帧小目标像素一般在 1×1 和 3×3 之间,有一定的面积,根据 Tophat 变换的概念,结构元素要大于或等于小目标的面积。所以,这里对原图像以 3×3 的方形模板作为结构元素进行变换。

2 时域滤波

小目标在时域上表现为帧间的运动特性。对于背景相对固定的运动目标检测来说,差分图像法由于其简单、实时及有效性,成为目前应用最广泛、最成功的运动目标检测方法。传统的差分图像法一般可分为两类,一类是用序列中的每一帧与一个固定的静止的参考帧(不存在任何运动物体)做图像差,对于红外警戒跟踪系统来说,这一条件很难得到满足。另一类是用序列图像中的相邻两帧进行差分,然后二值化该灰度差分图像来提取运动信息。这种方法也存在弊端:一是两帧间物体重叠部分没有检测出来,即只检测出物体的一部分;二是检测出物体在两帧中的信息,即检测出的目标比真实的物体大很多。这里通过一种改进的三帧差分图像法^[10]可以克服传统差分方法的弱点,有效增强复杂景物环境下的运动目标。该方法流程如图 1 所示。

其中运动补偿用于当红外热像仪平台存在相对运动时对图像做预先配准,对于红外警戒与跟踪系统来说,在捕获检测目标阶段,通常是采用大视场的镜头等候在目标可能出现的区域,或者只有相对缓慢的运动,并且运动参数已知,所以此时的图像配准相对比较简单。当系统平台静止时,可以省略这一步。

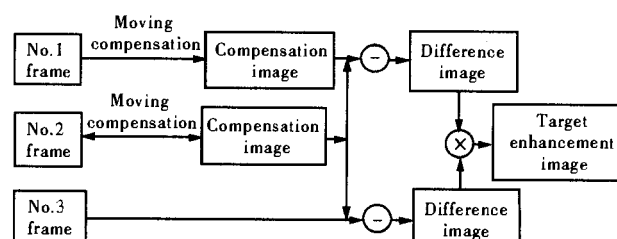


图1 三帧差分图像法框图

Fig.1 Framework of three frames difference method

图像相邻帧的差分处理采用三帧差分图像法,其主要思想是第一帧与第二帧做差分处理,第二帧与第三帧做差分处理,然后按下式增强目标图像:

$$d(x,y)=|f_1(x,y)-f_2(x,y)| \times |f_2(x,y)-f_3(x,y)|$$

理论上,通过三帧差分增强处理后, $d(x,y)$ 中只有运动目标对应的像素点位置为非零。但实际上,由于各种噪声的影响,使得差图像中在运动目标以外的很多像素点位置上 d 值不为零。这样就要求运用适当的手段从差图像 $d(x,y)$ 中提取真正的运动信息。

3 融合检测

在空域上利用形态学的 Tophat 变换滤波算子增强后的目标图像,主要包含了目标在单帧图像上的灰度分布信息,在时域上利用三帧差分增强处理后的目标图像,主要包含了目标在帧间的运动特性。二者融合可全面考虑运动小目标在时域与空域方面的特性,克服单从某一方面进行目标检测的局限性,大大提高运动点目标信噪比而抑制虚警。文中采用对应像素值相乘的方法融合。

对于融合后的目标增强图像,可以认为只有点目标与高斯白噪声点组成。考虑到可检测原始图像目标信噪比为 2,经统计,通过时域与空域增强融合后目标的信噪比至少可以提高到 5 以上,因此,在目标分割检测时,采用自适应门限的方法分割目标,选取阈

值 Th 作为分割门限, 阈值 Th 的定义为:

$$Th = \text{mean}(f) + \sigma \cdot \text{var}(f)$$

式中 $\text{mean}(f)$ 为图像均值; $\text{var}(f)$ 为图像方差; σ 取值为 5。

时空域融合分割后的目标图像, 相对于单独时域或空域检测, 目标检测率有显著提高, 更重要的是, 虚警率大大降低。对于分割后的图像, 根据目标运动轨迹的连续性和规则性, 利用相邻帧间可能目标点之间的位置关系可有效判别目标。

4 实验与总结

选取实际录取的云层背景红外运动小目标图像序列来验证算法。该小目标为穿越云层中的飞机目标, 图像大小为 320×240 , 录取帧频为 25 帧/s。由于光学扩散的影响, 目标约占 2~5 像素, 目标信噪比约为 2, 运动速度约为 1 像素/帧。在处理过程中, 形态学滤波结构元素取 3×3 的方形模板。图 2 为序列中一帧的处理结果。其中(a)为云层背景运动小目标原始图像, (b)为空域上形态学 Tophat 滤波算子增强后的目标图像, (c)为时域上利用三帧差分增强处理后的目标图像, (d)为融合处理后的图像。为了视觉可见, 图像均经过了灰度拉伸对比度增强, 真实目标点由白框标出。

从图 2 分析可知, 对于原始图像, 在空域上经形态学 Tophat 滤波增强后, 所有面积小于结构元素的孤立亮斑均保留, 其中包括真正目标点、小块的云团与亮噪声点, 并且部分小块云团与亮噪声点的灰度还强于目标点。在时域上经三帧差分增强处理后, 所有帧间存在相对运动的亮像元均保留, 其中包括真正目标点、少量飘动的云层边缘以及传感器的闪烁噪声, 一般来说, 对于现代高帧频的红外成像焦平面阵列成像来说云层漂移极其缓慢, 同时焦平面阵列像元属性基本稳定, 极少有闪烁噪声点。两者融合相乘后, 目标信噪比增强到 10, 我们可以准确地定位目标, 而其他的伪目标点得到了很好的抑制。同时, 每帧图像检测耗时约 80 ms (对于 P4 2.4G, 纯软件处理), 经 DSP 硬件加速后, 完全可以应用于高帧频的实时目标检测与跟踪。

本文提出的基于时空域融合滤波的小目标检测算法, 即考虑了小目标在单帧图像中表现出的孤立亮

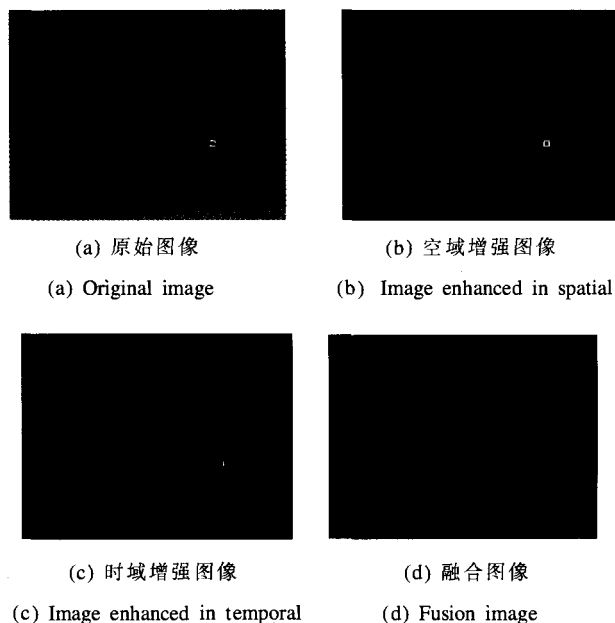


图2 红外小目标检测结果

Fig.2 Results of small infrared target detection

点性质, 又保留了目标在帧间的运动特性。大量实际录取数据分析结果表明, 时空域滤波处理融合分割后, 真正目标点的信噪比大大增强, 同时, 虚警率较单从某一方面进行检测时大大降低。算法全面考虑运动小目标在时域与空域方面的特性, 克服单单从某一方面进行目标检测的局限性, 更能有效地从复杂背景中检测低信噪比运动小目标, 减小虚警率, 抗噪声干扰能力强, 同时, 单帧的形态学 Tophat 滤波与帧间的三帧差分方法硬件实现相对简单, 非常适用于实时的红外搜索与跟踪系统。

参考文献:

- [1] PENG Jia-xiong, ZHOU Wen-lin. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. Acta Electronica Sinica (彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测. 电子学报), 1999, 27(12): 47-51.
- [2] GAO Ying-hui, LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang. Study of pretreatment technology for detecting infrared small target [J]. Infrared and Laser Engineering (高颖慧, 李吉成, 沈振康. 红外小目标检测的预处理技术研究. 红外与激光工程), 2004, 33(4): 154-158.
- [3] Hewer G, Kenney C, Hanson G, et al. Detection of small objects using adaptive wavelet-based template matching [A]. SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Target 1999 [C].

- 1999, 3809.95-106.
- [4] Reed I S, Gagliardi R M, Shao H M. Application of three-dimensional filtering to moving target detection [J]. IEEE Trans AES, 1983, 19(6): 898-905.
- [5] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1): 144-156.
- [6] Holger Lange. Real-time contrasted target detection for IR imagery based on a multiscale tophat filter [A]. SPIE Proceedings [C]. 1999, 3720. 214-226.
- [7] ZHANG Fei, LI Cheng-fang, SHI Li-na. Algorithm based on mathematical morphology for dim moving point target detection [J]. Optical Technique (张飞, 李承芳, 史丽娜. 基于数学形态学的弱点状运动目标的检测. 光学技术), 2004, 30(5): 600-602.
- [8] SU Xin-zhu, JI Hong-bing, GAO Xin-bo. Detection method for dim small IR targets based on mathematical morphology [J]. Infrared and Laser Engineering (苏新主, 姬红兵, 高新波. 一种基于数学形态学的红外弱小目标检测方法. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 307-310.
- [9] CUI Yi. Image Processing and Analysis: Mathematical Morphology Method and Application [M]. Beijing: Science Press (崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用. 北京: 科学出版社), 2000.
- [10] YANG Wei, ZHANG Tian-wen. A new method for the detection of moving targets in complex scenes [J]. Computer Research & Development (杨威, 张田文. 复杂景物环境下运动目标检测的新方法. 计算机研究与发展), 1998, 35(8): 724-728.

(上接第 713 页)

- [2] LIU Shi-jian, GUO Li, DUAN Bo, et al. Real-Time detection algorithm of infrared image and its implementation on CPLD [J]. Journal of University of Science and Technology of China (刘士建, 郭立, 段勃, 等. 基于数学形态学的红外点目标实时检测算法及其 CPLD 实现. 中国科学技术大学学报), 2004, 34(3): 366-370.
- [3] XIONG Hui, SHEN Zhen-kang, WEI Ji-bo, et al. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. Acta Electronica Sinica (熊辉, 沈振康, 魏急波, 等. 低信噪比运动红外点目标的检测. 电子学报), 1999, 27(12): 26-29.
- [4] PENG Jia-xiong, ZHOU Wen-lin. Infrared background suppression and small target segmentation and detection [J]. Acta Electronica Sinica (彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测. 电子学报), 1999, 12(27): 47-51.
- [5] Alexis P Tzannes, Dana H Brooks. Detection of point targets in image sequences by hypothesis testing: a temporal test first approach [A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. 1999, 6.3377-3380.
- [6] LI Ji-cheng, SHEN Zhen-kang. Small moving target detection in clutter infrared background [J]. Infrared and Laser Engineering (李吉成, 沈振康. 红外起伏背景下运动点目标的检测方法. 红外与激光工程), 1997, 26(6): 8-13.
- [7] Askar H, LI Xiao-feng, LI Zai-ming. Background clutter suppression and dim moving point targets detection using nonparametric method [A]. IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions [C]. 2002, 2.982-986.
- [8] Askar H, LI Xiao-feng, LI Zai-ming. Performance analysis of dim moving point target detection algorithms [A]. IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions [C]. 2002, 1.605-609.
- [9] YE Bin, PENG Jia-xiong. Moving point target detection based on order morphology filtering [J]. Infrared and Laser Engineering (叶斌, 彭嘉雄. 基于顺序形态滤波的运动点目标检测. 红外与激光工程), 2001, 30(1): 25-29.
- [10] HAN Ke-song. Pretreatment of infrared point target in complicated background [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics (韩客松. 复杂背景下红外点目标检测的预处理. 系统工程与电子技术), 2000, 22(1): 52-54.
- [11] GONG Wei, SHI Qing-yun, CHENG Min-de. Mathematic Morphology in Digital Space - Theory and Application [M]. Beijing: Science Press (龚伟, 石青云, 程民得. 数字空间中的数学形态学—理论与应用. 北京: 科学出版社), 1997.
- [12] LI Zheng-zhou, DONG Neng-li, JIN Gang. Method of quickly detecting and tracking dim moving point target in image sequences [J]. Infrared and Laser Engineering (李正周, 董能力, 金钢. 序列图像运动点目标快速检测与跟踪算法. 红外与激光工程), 2002, 31(6): 473-477.