

远距离红外弱小运动目标检测

田文山,王萌萌,刘 托,唐东凯,张远志

(河南科技大学 信息工程学院 河南 洛阳 471023)

【摘要】针对远距离红外弱小运动目标的检测,本文提出了一种空域-时域联合算法。该方法首先基于结构元素大小自适应的形态学顶帽变换进行红外复杂背景抑制,增强了图像的信噪比;接下来,利用平均迭代算法精确确定门限阈值,实现单帧图像分割;在此基础上,利用邻域多帧图像相与判决算法,实现基于时间序列图像的弱小运动目标检测。实验表明,本文提出的方法能够较好地进行背景抑制和消除噪声,准确有效地检测出红外运动弱小目标。

【关键词】红外;弱小目标;顶帽变换;分割;管道滤波

0. 引言

红外成像传感器因具有工作隐蔽性好、抗电磁干扰能力强、能有效提高系统全天候的工作能力,在军民领域中具有很广泛的应用性。为使系统具有足够反应时间,通常需要尽可能早地发现目标。但是,由于成像系统本身的影响及成像背景中杂波的干扰,增加了对弱小目标的检测的难度,使其成为了红外目标检测与跟踪研究领域中的重点和难点,也成为了红外目标检测研究中的热点部分。在图像信噪比较低的条件下,由于小目标边缘模糊,目标与成像背景的对比度差,随机噪声等局部干扰比较严重,因此对于小目标的检测算法来说,具有较强的抗干扰能力是其关键所在。在现实应用中,对弱小目标的检测通常是跟踪系统的一部分,检测算法的好坏关系着后续对目标进行跟踪处理甚至整个系统的跟踪性能。因此要求检测算法稳定可靠,计算量小,具有一定的鲁棒性。

弱小目标检测算法按照检测和跟踪的顺序可划分为跟踪前检测方法 (Detection Before Track DBT) 和检测前跟踪方法 (Track Before Detect TBD)^[1-2]。TBD 方法利用目标的灰度信息和时间信息,直接对原始序列图像中大量的候选目标轨迹同时进行评估,从中排除噪声,选择目标。TBD 算法主要包括假设检验方法、三维匹配滤波器、动态规划方法、基于投影变换的弱小目标检测等。TBD 方法主要应用于目标信噪比较低,单帧图像检测产生大量虚假目标的情况。该类算法往往较为复杂,运算量大,难于实现对目标实时检测。DBT 方法是传统的目标识别算法。首先,在单帧图像

中根据目标灰度信息检测目标,提供若干包含噪声在内的候选目标,再利用目标的时间特性在图像序列中识别、跟踪目标^[3-8]。

本文从 DBT 策略出发,提出了一种空域-时域联合的小目标检测算法。该算法在空间域上通过自适应结构元素的灰度形态学顶帽变换和平均迭代阈值算法实现复杂背景抑制和目标分割,进而将处理空间转换到时间域,基于邻域多帧图像相与判决算法实现红外弱小运动目标的检测。实验结果证明,本文提出的算法明显地提高了弱小目标物体的检测率。

文章从红外弱小运动目标检测模型着手,按照 DBT 算法流程对红外图像的背景抑制、图像分割以及图像序列检测进行研究分析。整个算法流程如图 1。

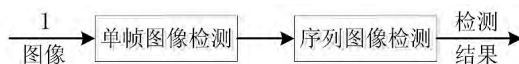


图 1 整体检测流程

单帧图像检测的流程如图 2。



图 2 单帧图像目标检测流程

本文得到河南科技大学 2013 年度大学生研究训练计划 SRTTP 项目资助。

1. 红外弱小运动目标模型

在远距离红外成像探测中,红外成像具有以下特点:

①弱小目标为只占几个或十几个像素的灰度奇异点,所占面积小、缺乏尺寸、形状、纹理等必要的结构信息,可供利用的只有目标的强度信息,即红外图像中的灰度特征;

②探测器成像的背景通常具有“强相关”性,占据了整个场景图像的低频空间;

③场景背景、传感器内部热分布不均匀,图像中局部灰度值分布可能会变化较大,表现出“强起伏”的特点;

④背景图像中包含部分空间域中的高频分量,它们主要分布在背景图像各个同质区的边缘处,如天空背景图像中的云层边缘;

⑤由于电路及传感器系统本身的因素,在探测器成像平面上还可能会产生一些随机噪声,它们各像素之间互不相关,且与背景像素也不相关,在空间域中表现为和小目标类似的高频特征。

根据以上对探测器成像平面上图像中的弱小目标、图像背景、噪声等因素特点的分析,可将红外弱小目标图像分为三个主要成分对其进行分析处理,并抽象出以下红外弱小目标场景序列图像模型:

$$f(x, y, t) = b(x, y, t) + s(x, y, t) + n(x, y, t) \quad (1)$$

t 表示采样时刻 (x, y) 代表图像中像素点的位置坐标 $b(x, y, t)$ 表示 t 时刻背景图像 (x, y) 处的灰度值 $s(x, y, t)$ 是 t 时刻弱小目标灰度值 $n(x, y, t)$ 表示 t 时刻噪声的灰度值 $f(x, y, t)$ 代表 t 时刻红外图像 (x, y) 处的灰度值。

对此,可以得出在一段连续的时间内分别以天空、地面为背景的仿真图像如图3和图4。



图3 以天空为背景的目标仿真图像



图4 以地面为背景的目标仿真图像

2. 红外复杂背景抑制

通过对红外弱小运动目标模型的建立易知,目标

灰度与图像背景之间必须要有一定差异才能检测到弱小目标的存在。因此,需要注意的是图像中那些包括待测目标和噪声的灰度奇异点。为了将可能的目标点从图像中提取出,去除一般像素点,尽量减少背景和其它噪声对目标检测过程的影响,需要对图像的背景进行抑制处理。

数学形态学在图像分析中得到了广泛的应用。由于目标、噪声以及背景的边缘表现为图像中的高频部分,故可采用形态学来对检测图像进行背景估计。红外图像中的目标区域通常为亮区域,选用比目标区域尺寸大的结构元素,灰度形态学开运算将亮目标区域看作噪声而进行滤除,对可能目标区域外的图像进行背景估计而不破坏目标区域特征。将原始图像与估计出的图像背景做差即可得到包含候选目标且抑制大量背景的增强图像。该过程在灰度形态学中称为顶帽变换。

目前,大多数学者对形态学滤波顶帽变换算法中结构元素(滤波窗)大小的确定还没有较好的方法,大都是根据经验值人为设定的固定值。本节对形态学滤波顶帽变换进行了研究分析,提出了一种结构元素大小自适应确定的算法,保证了顶帽变换算法对包含不同大小目标图像的通用性、灵活性。

在红外目标图像中,由于目标区域灰度值较大且灰度分布较均匀,即方差值较小,因此可以根据目标区域的灰度分布特征,对候选目标区域进行初始判定,步骤如下:

(1)按一定大小将图像分成子图像;

(2)计算每一子图像区域内的灰度均值 E_i 和 σ_i 方差,令

$$m = \frac{E_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

(3)计算整幅图像的灰度均值 E 和方差 σ ,令

$$n = \frac{E}{\sigma} \quad (3)$$

对每一子图像区域比较 m 与 n 的大小,如果 m 大于 n ,则认为该子区域可能为候选目标区域,并标记该区域。最后通过计算所有候选目标的八联通区域,即将最大的目标区域的大小作为结构元素大小。

3. 图像分割

图像经过背景抑制后,需要从背景抑制后图像剩余的高频成分中分割出可能的目标点,同时使分割出的虚假目标点数尽可能的少。

本文提出了一种利用平均迭代的阈值分割方法,对图像进行了有效地分割,其流程如图5所示。平均

迭代方法将图像灰度级进行逐步细化,从细化后的灰度级中确定分割阈值 T ,这样最后确定的 T 更精确。具体描述如下:

假设图像的灰度范围为:

$\{G_{\min}, G_{\min}+1, \dots, G_{\max}\}$ 其中 G_{\min} 为最小灰度值, G_{\max} 为最大灰度值。设灰度值为 g 的像素点有 n_g 个,则图像像素点个数为:

$$N_0 = \sum_{G_{\min}}^{G_{\max}} n_g \quad (4)$$

图像的灰度均值为:

$$E_0 = \frac{1}{N_0} \sum_{G_{\min}}^{G_{\max}} n_g \quad (5)$$

由于目标像素灰度值比图像的平均灰度要大,所以可以利用 E_0 做门限将图像分为两部分,灰度值小于 E_0 的为背景。灰度值大于 E_0 的灰度范围为 $\{E_0, E_0+1, \dots, G_{\max}\}$,总的像素点数为

$$N_1 = \sum_{E_0}^{G_{\max}} n_g \quad (6)$$

灰度均值为:

$$E_1 = \frac{1}{N_1} \sum_{E_0}^{G_{\max}} n_g \quad (7)$$

同理,以 E_1 为门限将图像再次分为两部分。如此反复利用 OTSU 算法,设目标区域灰度均值为 E_k ,当 $E_k \geq 90\% E_l$ 时,即可将 E_k 确定为最终门阈值 T ,对图像进行分割处理。



图5 平均迭代分割算法流程图

经过图像分割,灰度图像转换成二值图像,图像中包含目标、残留背景和噪声,后两者是虚警产生的主要来源。在分割图像的基础上进行单帧检测,进一步滤除虚警,确定目标的候选区域。

根据背景抑制中结构元素的大小,选择大小为 $M \times M$ 的滑窗,对整幅图像从左到右,从上到下依次进行扫描。滑窗每滑动一次便对滑窗邻域内像素点的个数 M_n 进行统计。对于某一点来说,如果 M_n 大于给定

检测阈值,则认为其为候选目标点,否则将其视为噪声进行剔除。

采用此方法对整幅图像进行扫描检测后,可将图像中的大面积的背景和小噪声有效剔除,使图像中仅仅保留了目标和与目标特性接近的噪声,大大提高了图像的信噪比,为序列检测打下良好的基础。

4. 序列图像检测

单帧检测能把图像上较大的噪声过滤掉,但是不能将图像上的一些像素较小甚至和目标像素大小相同的噪声滤掉。

由于序列图像中的弱小目标运动具有不同于背景的独立运动特性,且运动轨迹是连续的,因此根据目标的“运动形态”特征,找出序列图像中满足“运动形态”的像素集合,就可以将剩下的噪声剔除,降低虚警率。

本文提出了一种基于邻域多帧图像相与判决的算法,实现红外弱小运动目标的序列检测。

在单帧检测的基础上,假设在连续的三帧图像中,对三帧图像选取相同大小的波门 $M \times M$,分别采用单帧检测的方法,利用波门在每一帧图像上循环扫描。对于连续三帧图像上相同的像素位置,若每一帧图像上的波门统计的像素个数 n_1, n_2, n_3 如果 $|n_1 - n_2| \leq 3, |n_1 - n_3| \leq 3, |n_2 - n_3| \leq 3$ 同时成立,则可判断第一帧图像波门检测的位置为目标,并记录下来,接下来以相同的方式对第二帧、第三帧、第四帧的图像进行检测,确定第二帧上目标的位置,依次类推,即可确定每一帧图像上目标的位置。该方法结构简单,易于实现。

多帧图像相与的流程图如图6所示。

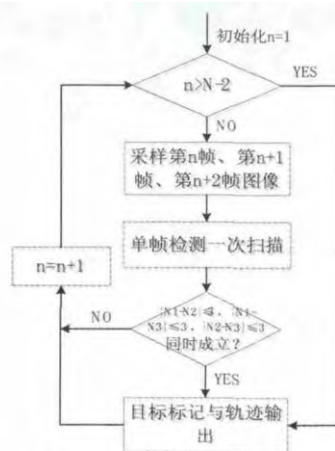


图6 多帧图像相与流程图

5. 实验成果

实验硬件平台为方正台式机, CPU 主频 3.4Ghz, 内存 4GB, 软件平台为 matlab 2008a。利用本文提出的

算法分别对空空背景和地面背景各自 120 帧图像进行处理,相邻三帧的处理结果如图 7-14 所示。其中图 7-10 是对图 3 相邻三帧进行背景抑制、平均迭代分割、单帧检测和序列检测的结果。图 11-14 是图 4 相邻三帧的处理结果。实验中,根据估计的小目标大小,将图像划分为若干 5×5 区域。单帧检测的滑动窗口大小 M 取 5,阈值为 $0.5M^2$ 。从实验结果中可看出,红外图像经过自适应顶帽变换后抑制了大部分背景。经过图像分割和单帧检测后,存在小目标和虚警,在接下来的序列检测后确认了真正的目标并实现了虚警的滤除。本文方法对两个图像帧序列的小目标检测率都达到了 100%。

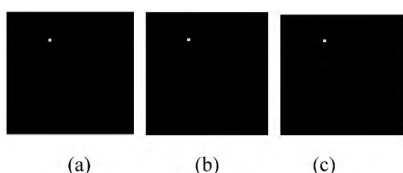


图 7 空中背景抑制图像

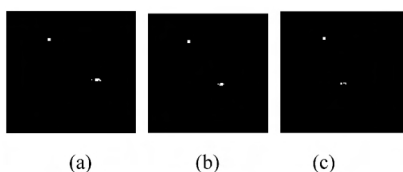


图 8 图像分割图像

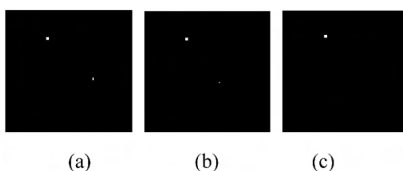


图 9 单帧检测图像

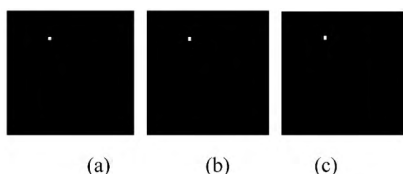


图 10 序列检测图像

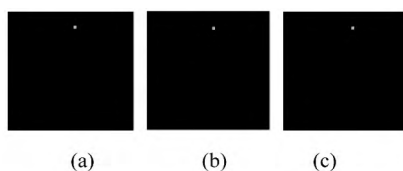


图 11 地面背景抑制图像

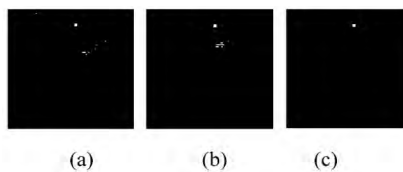


图 12 图像分割图像

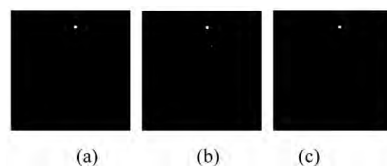


图 13 单帧检测图像

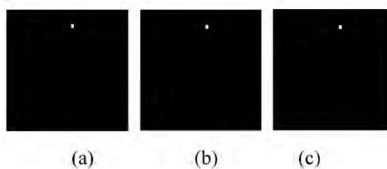


图 14 序列检测图像

6. 结语

本文针对红外弱小运动目标检测的实际问题,在当前较流行的图像处理算法基础上,提出了一种结构元素大小自适应的背景抑制算法,增强了结构元素的通用性和灵活性;针对图像的分割,提出了一种平均迭代分割算法,使得门限阈值的确定更加精确,图像分割后的信噪比得以大大降低;对于图像的序列检测,提出了一种基于邻域判决多帧图像相与的管道滤波算法。可以看出,结构元素大小的确定对整个图像目标检测的过程起到了至关重要的作用。

对本文提出的算法的各个阶段进行 MATLAB 仿真的结果表明,该实现思路可以较好地检测出弱小运动目标,达到了预期的目的。

但是本文所采用的滤波方法只是简单利用了矩形结构的形态学算子,没有具体研究不同类型的结构元素以及不同形状的结构元素对弱小目标检测结果的影响,对此还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 许彬,郑链,王永学等. 红外序列图像小目标检测与跟踪技术综述[J]. 红外与激光工程,2004,33(5):482-487.
- [2] 汪国有,陈振学,李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述[J]. 红外技术,2006,28(5):287-292.
- [3] 杨磊,杨杰,郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(1):41-45.
- [4] 刘刚,梁晓度. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检测[J]. 计算机工程与应用,2011,47(30):198-201.
- [5] 王浩,高晓光. 基于连续帧的红外小目标检测技术[J]. 火力与指挥控制,2012,37(11):153-156.
- [6] 侯洁,辛云宏. 基于高通滤波和图像增强的红外小目标检测方法[J]. 红外技术,2013,35(5):279-284.
- [7] 罗大鹏,魏龙生,桑农. 基于聚类分析的红外弱小目标检测[J]. 计算机工程与应用,2013,49(8):17-22.
- [8] 李静,刘兴森,薛福来. 基于循环平移 Contourlet 变换的红外小目标检测算法[J]. 红外,2013,34(2):39-43.