

基于小波滤波背景预测的红外弱小目标检测方法

焦 姣 谢永杰 张华良 张 颂
(西北核技术研究所 西安 710024)

摘 要 红外弱小目标检测是红外图像研究领域的热点与难点。有效地从背景中检测出弱小目标对于后续的跟踪、识别工作具有十分重要的意义。针对现有检测方法的不足,提出了一种基于小波滤波背景预测的红外弱小目标检测方法。该方法利用小波滤波去噪的优良特性将目标作为噪声滤除,然后构建近似的前景分布图与背景分布图,最后基于连通体筛选与对比度门限完成弱小目标的提取。采用实测光电图像对该方法进行了验证,结果表明,提出的方法能够有效抑制噪声,完成背景预测以及红外弱小目标的检测。

关键词 红外图像,弱小目标检测,小波滤波,背景预测

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.2.013

Infrared Dim and Small Target Detection Based on Background Prediction by Wavelet Filter

JIAO Jiao XIE Yong-jie ZHANG Hua-liang ZHANG Song
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract Dim and small target detection is a critical technology in the infrared image field. The target can be detected effectively from the background, which is important for the work of target tracking and recognition. Aiming at defects of the existing target detection technology, an approach for infrared dim and small target detection based on background prediction by wavelet filter was proposed. The approach utilizes wavelet filter to remove the target as noise, then the background image and the foreground image are estimated, finally infrared dim and small target can be extracted effectively by connector screening and contrast thresholding. The approach was tested on the real images of photoelectric theodolite. Experiments show effectiveness of the method on anti-noise, background prediction, and infrared dim and small target detection.

Keywords Infrared image, Dim and small target detection, Wavelet filters, Background prediction

弱小目标检测作为红外图像弱小目标跟踪和识别系统的关键技术之一,一直是红外图像研究领域的热点。为尽早发现目标,要求在较远距离时就能够检测和跟踪目标,但这时获取到的目标在图像中的像素尺寸较小,其信噪比和对比度较低,且没有可以用于识别的形状信息和结构信息,同时具有不同复杂程度的背景,并存在噪声干扰,由此造成红外图像中的弱小目标检测成为一个难点问题,需要将目标从背景中检测出来的同时与噪声区分开。

通常将红外弱小目标的检测分为两个步骤:首先,在单帧图像中确定候选目标;其次,利用图像序列得到真实目标。目前单帧图像中的检测方法主要有:中值滤波法^[1]、空时域结合方法^[2]、形态学滤波法^[3]、背景预测法^[4]等。然而许多方法通常针对某一类型的图像或对图像中的目标和背景有特殊要求,并且许多算法的计算速度难以满足实际应用的实时性、可靠性需求。

由于红外图像中的弱小目标在整幅图像中占有非常小的比例,而绝大部分是背景,因此背景预测法具有其合理性。但

该方法速度慢,目标容易被背景中残余的噪声干扰。随着小波技术的发展^[5],许多人将其应用于弱小目标的检测。目前将小波用于目标检测的方法的基本思想为利用小波多尺度特性以及时频分辨能力在小波变换域中提取感兴趣的部分,然后用阈值法实现目标检测。其中文献^[4]根据小波域中背景信号与目标信号分别存在于不同的频带系数,提出了小波分析背景预测算法用于弱小目标检测,其算法流程为:首先对弱小目标图像进行小波分解;然后滤除高频小波系数,对图像进行小波逆变换完成重构,将原始图像与背景预测图像进行求差运算,得到预测残差图像;最后进行门限检测得到候选目标。该方法直接将高频小波系数置“0”去掉目标和噪声信号,得到背景预测图像,这样进一步得到的残差图像中同时存在目标及噪声信号,极易造成目标的误检。

本文在已有的弱小目标检测方法的基础上^[6-16],通过分析红外弱小目标的图像特性,提出了一种基于小波滤波背景预测的目标检测方法,该方法检测速度快,且能够有效抑制噪声。基于光电实测图像验证了所提方法,其取得了较好的效

到稿日期:2015-05-14 返修日期:2015-06-20 本文受国家 863 项目(2013AA8083027)资助。

焦 姣(1988—),女,硕士,工程师,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail:jiaojiao_nk@163.com;谢永杰(1973—),男,博士,研究员,主要研究方向为光学测量;张华良(1987—),男,硕士,工程师,主要研究方向为图像处理与应用光学;张 颂(1986—),男,硕士,工程师,主要研究方向为光学测量。

果,可以有效滤除背景和噪声,完成弱小目标的检测。

1 红外图像背景预测

1.1 弱小目标图像特性分析

红外图像中弱小目标的检测问题主要涉及目标、背景以及噪声这3部分。弱小目标有两个主要特征:1)在整幅图像中的信噪比和对比较低;2)在图像中的像素尺寸较小,即所谓“弱”和“小”。对于背景,光电设备获取到的图像多为空背景,天空背景中往往有云,云在整幅红外图像中相对于空背景有时具有较高的对比度,但其具有较为均匀的内部灰度分布,与背景的交界处通常会有较为剧烈的灰度跳变,容易产生虚假目标,造成误检。对于噪声,一般认为红外图像中噪声是满足高斯分布的。

一幅红外图像在数学上可描述为:

$$f(i, j) = t(i, j) + b(i, j) + n(i, j) \quad (1)$$

式中, $f(i, j)$ 表示红外图像, $t(i, j)$ 表示图像的目标部分, $b(i, j)$ 表示图像的背景部分, $n(i, j)$ 表示图像的噪声部分。

1.2 近似背景分布估计

本文利用小波优良的去噪特性以及时频分辨能力,基于对红外弱小目标图像特性的分析,通过小波滤波完成红外图像 $f(i, j)$ 低频与高频部分的分离。因为红外弱小目标图像经过小波变换之后,其噪声和目标位于高频子带,与背景分离开来,且目标对应较大的小波系数值,噪声对应较小的小波系数值,据此通过对小波分解最高层细节系数进行阈值量化处理,将目标作为噪声滤除,并对保留下来的背景及噪声信息进行重构得到图像的背景分布。

红外图像的背景分布图的具体计算步骤为:首先选取合适的小波分解层数,在灰度图像上进行 N 层小波分解;然后通过低通滤波将目标部分作为噪声滤除,并做一层小波重构,得到背景分布的缩略图;最后利用图像插值将背景分布缩略图放大至原始图像大小,即得到近似的背景分布图。算法流程图如图1所示。

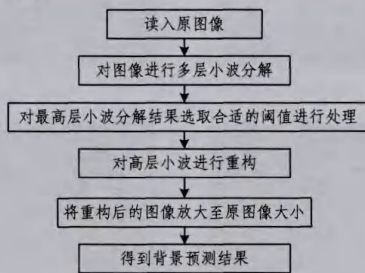


图1 算法流程

1.2.1 多尺度小波分解

首先在原始图像上进行 N 层小波分解,分解层数由图像信息来决定^[17],图像中目标较大时适合选取较高的小波分解层数,由于红外弱小目标图像背景模糊,目标较小,实验证明小波分解层数 $N=3$ 时效果最好。每一级小波分解可得到4个频带系数,分别为3个高频子带:水平细节系数 HL 、垂直细节系数 LH 和对角细节系数 HH ,以及1个低频子带:图像近似系数 LL 。再对分解得到的信号 LL_1 进行第二层小波分解。每一级小波分解均对上一级分解得到的近似系数 LL_x 继续做分解。

红外弱小目标图像经过小波分解后,其背景部分主要存

在于低频子带中,而目标和噪声部分主要存在于3个高频子带中。

1.2.2 小波系数阈值量化处理

由于空背景的红外图像中背景变化相对缓慢,可认为其属于图像低频部分,而噪声和目标则位于图像高频部分。小波滤波去噪即将多层小波分解的最高层细节系数进行阈值量化处理。

图像的目标区域经过多层小波分解后得到的系数值较大,图像中的噪声经过小波分解后所对应的系数值较小,数目较多。因此本文针对最高层小波分解结果中的系数幅值对阈值进行设置,将红外图像中的目标部分过滤掉,对背景及噪声信息予以保留。

对于小波分解的阈值选取,本文借鉴一种较为常用的方法:Dohono^[18]提出的统一阈值去噪方法,阈值计算公式为:

$$T_n = \sigma_n * \text{sqrt}(2 \ln N) \quad (2)$$

式中, N 为 L 层小波分解结果中3个细节系数子带的系数数目, $N=3 * H_L * W_L$, H_L 与 W_L 分别为经过 N 层小波分解得到的系数矩阵的行数与列数。 $\sigma_n = c/0.6745$, c 为去噪前小波分解细节系数的绝对值中值。

Dohono 将其分为软阈值法和硬阈值法。硬阈值法将绝对值小于阈值的小波系数直接置为0,将大于阈值的保留并保持系数值不变。本文借鉴其思想,将目标视为噪声滤除,即保留真实噪声及背景部分对应的系数值,将大于阈值的系数置0。

1.2.3 重构及插值

根据滤波后的系数,通过小波逆变换对最高层小波分解结果进行重构,得到的重构图像为背景分布的缩略图。由于重构图像与原图像大小不同,利用图像插值将背景分布缩略图放大至原始图像大小,即得到近似的背景分布。本文中采用双三次图像插值法完成重构图像的放大。

图2为背景分布处理结果示例,(a)为原图像,(b)为经过小波滤波处理得到的背景分布图。

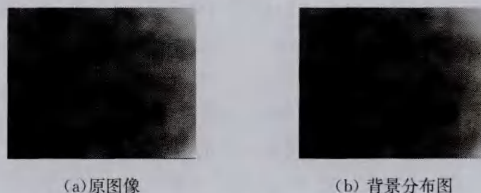


图2 背景分布处理结果示例

2 基于对比度检测的图像分割

通过背景分布图与原图像的差运算,可计算得到近似的前景分布图。差图像整体的亮度较低,前景分布图中目标与背景的灰度值差异不是很大,即目标不一定是亮的,但是在局部区域中被检测的弱小目标较为突出时才能被检测出来,即目标是具有一定的对比度的,是可区分的,因此通过对比度门限检测对前景图像中的弱小目标进行提取。

2.1 候选目标提取

将得到的前景分布图进行扫描,对得到的每一个连通体区域进行编号及筛选,过滤掉一部分残余背景与噪声连通体即可得到候选目标连通体。

筛选包括连通体提取和连通体过滤两个步骤。连通体提取的过程实际上也是对连通体进行标注的过程,具体做法是

给图像中的每一个连通体分配一个唯一代表该连通体的编号,在输出图像中该连通体区域内的所有像素的像素值就赋值为该连通体的编号。根据弱小目标特性,筛选条件为连通体像素尺寸,通过设置像素尺寸门限过滤掉一部分非目标连通体。由于弱小目标的几何尺寸一般小于 6×6 ,像素总数不超过30,而像素尺寸为1的单点连通体极有可能是噪声点,结合其灰度值与该红外图像中最大灰度值的差异进行过滤。

2.2 图像分割

根据对比度阈值对过滤后的红外图像进行图像分割操作。对比度的计算公式如下:

$$C(i,j) = \frac{I(i,j) - A(i,j)}{D} \quad (3)$$

式中, $C(i,j)$ 为当前像素点的对比度值; $I(i,j)$ 为当前像素点的灰度值; $A(i,j)$ 为当前点所处局部背景区域的灰度均值; D 为最大灰度值与最小灰度值之差,本文取值255。

若图像中的当前像素点的对比度值大于阈值,将其分割为目标像素点,否则将其分割为背景像素点,如式(4)所示。

$$BW(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } C(x,y) > LT \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

图3所示为目标检测的具体流程。首先将原始图像通过小波滤波处理得到背景分布图,然后将原灰度图与背景分布图做差运算得到前景分布图,再通过连通体筛选与对比度门限得到弱小目标检测结果。

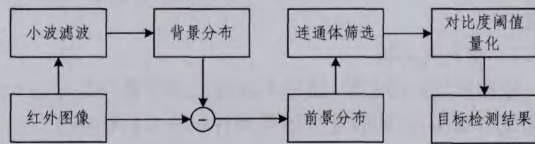


图3 目标检测流程

3 实验结果

基于光电设备拍摄的红外图像(图像大小均为 320×256),对本文提出的方法进行了有效性验证。图4—图7为本文方法的弱小目标检测结果示例。图像(a)为原图;(b)为背景分布图;(c)为前景分布图;(d)为二值图,即目标检测结果。图4中的目标位于较为复杂的云背景中,但对比度较高。图5中的目标同样位于较为复杂的云背景中,但对比度相对较低。图6中的噪声较小,背景较为单一,目标与背景具有较大的对比度。图7中存在对比度较高的噪声点。

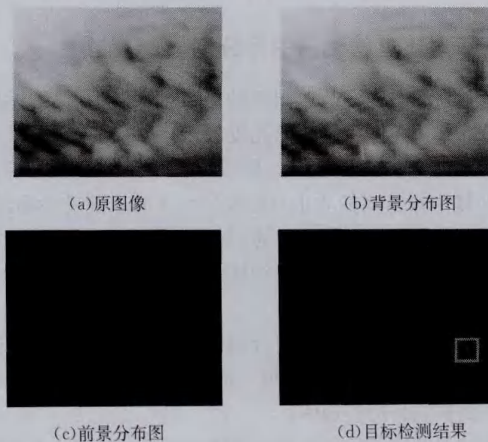


图4 目标检测结果示例1

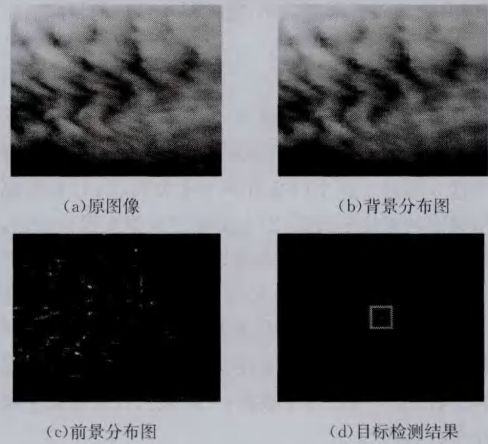


图5 目标检测结果示例2

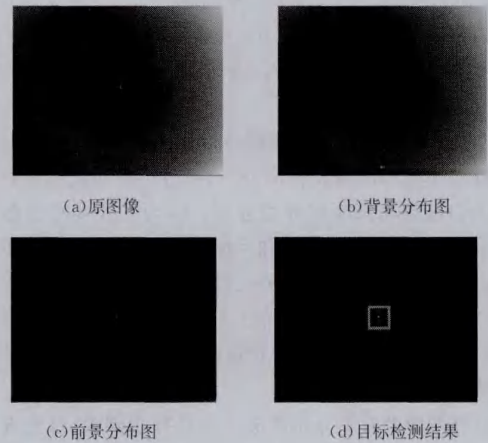


图6 目标检测结果示例3

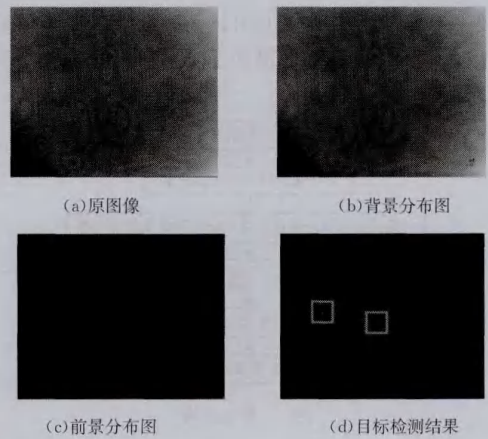


图7 目标检测结果示例4

分析实验结果,对于较为复杂的云背景图像,如图4和图5所示,从前景分布图(原图像(a)与背景分布图(b)的差图像)中可以看出,背景基本被抵消,噪声也得到了较好的抑制,能够准确地检测到云层中的弱小目标。当空背景较为简单,但设备本身的噪声较大时,如图7所示,同时存在噪声对比度相对较高的问题,此时虽然小波滤波可以得到较为准确的背景分布估计,但是差图像中依然存在部分噪声点,其对比度甚至高过目标,而且在图像中所占的像素点尺寸与弱小目标较为接近,此时通过连通体筛选与对比度门限检测也几乎无法

避免噪声点的误检。

在空中背景的红外图像中往往有云层的干扰,云层内部区域的灰度分布较为均匀,但其与背景的交界处通常会有较为剧烈的灰度跳变,部分边界点相对于背景就会形成较高的对比度,甚至可能超过目标区域;红外图像中还可能存在一些对比度较高的噪声点,也容易造成误检。此类问题可通过后期图像序列的检测解决。从实验结果可以看出,本文的弱小目标检测方法有较强的噪声抑制能力,能够快速有效地检测到目标。

结束语 本文针对红外弱小目标图像,提出了一种基于小波滤波背景预测的目标提取方法。该方法首先通过小波滤波将目标作为噪声滤除,将真实噪声与背景信号重构,得到近似的背景分布图;然后将原灰度图与背景分布图做差运算,得到近似的前景分布图,很好地抑制了背景和噪声;再通过连通体筛选与对比度门限完成最终的图像分割,得到弱小目标检测结果。根据实验结果,该方法能够更好地预测背景,具有较强的噪声抑制能力,能够快速有效地检测到弱小目标,为后续的弱小目标识别工作提供了有利条件。

参 考 文 献

- [1] Barnett J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds[C]// Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE 1989). 1989;10-18
- [2] Wang Bo, Zhang Jian-qi. Moving dim point target detection based on the spatial and temporal combined filter[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2010, 37(3): 524-528 (in Chinese)
王博,张建奇.一种空时域结合滤波的运动弱小目标检测方法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2010,37(3):524-528
- [3] Lai J, Ford J J, O' Shea P, et al. A study of morphological pre-processing approaches for track-before-detect dim target detection[C]//Proceedings of the 2008 Australian Conference on Robotics & Automation. 2008;1361-1370
- [4] Yuan Guang-lin, Wang Jian, Wang Shu-yu, et al. Background prediction algorithm of small and dim target detection based on wavelet analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(27): 59-61 (in Chinese)
袁广林,王健,王书宇,等.一种基于小波分析的弱小目标检测背景预测算法[J].计算机工程与应用,2007,43(27):59-61
- [5] Ganesan A. Automatic target detection using wavelet transform[J]. Applied Signal Processing, 2004, 2004(17): 2663-2674
- [6] Yang Lei, Yang Jie, Ling Jian-guo, et al. Infrared images pre-processing based on evaluating the complex degree of backgrounds[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(8): 1150-1153 (in Chinese)
杨磊,杨杰,凌建国,等.基于背景复杂程度估计的红外图像预处理[J].系统工程与电子技术,2006,28(8):1150-1153
- [7] Yang Jie, Yang Lei. Small target detection algorithm based on infrared background complex degree description[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 382-386 (in Chinese)
杨杰,杨磊.基于红外背景复杂程度描述的小目标检测算法[J].红外与激光工程,2007,36(3):382-386
- [8] Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhong-qi, et al. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1715-1720 (in Chinese)
罗寰,王芳,陈中起,等.基于对称差分 and 光流估计的红外弱小目标检测[J].光学学报,2010,30(6):1715-1720
- [9] Bai X Z, Zhou F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(6): 2145-2156
- [10] Kim S, Lee J. Scale invariant small target detection by optimizing signal to clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(1): 393-406
- [11] Hu Xiao-dong, Peng Xin, Yao Lan. Study of wavelet domain gaussian mixture model with median filtering mixed image denoising[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2381-2385 (in Chinese)
胡晓东,彭鑫,姚岚.小波域高斯混合模型与中值滤波的混合图像去噪研究[J].光子学报,2007,36(12):2381-2385
- [12] Wan Ming, Zhang Feng-ming, Lei Hong-li, et al. A novel detection method of infrared dim and small target based on cross window[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 764-768 (in Chinese)
万明,张凤鸣,雷洪利,等.一种利用十字窗口识别红外弱小目标的新方法[J].光子学报,2011,40(5):764-768
- [13] Su Xiu-qin, Liang Jin-feng, Lu Tao, et al. IR Target detection & tracking algorithm based on sea-sky background[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1309-1312 (in Chinese)
苏秀琴,梁金峰,陆陶,等.海天复杂背景下红外目标的检测跟踪算法[J].光子学报,2009,38(5):1309-1312
- [14] Chen J Y, Irving S R. A detection algorithm for optical targets in clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(1): 46-59
- [15] Gong C. Infrared Dim Small Target Detection Based on Morphological Band-Pass Filtering and Scale Space Theory[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10)
- [16] Lei L, H Zhi-jian. Infrared dim target detection technology based on background estimate[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62(2): 59-64
- [17] Han Li-na, Geng Guo-hua, Jie Xiong. Real-color Image Denoised and Enhanced Synchronously Based on Wavelet Transform[C]// Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2009; 658-661
- [18] Li Xing-mei, Yan Guo-ping, Chen Liang. Image denoise based on soft-threshold and edge enhancement[C]// Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages. 2007; 53-56