

文章编号:1001-5078(2024)08-1316-06

· 图像与信号处理 ·

一种真空深低温下的红外光斑定位算法

李善斌,倪磊

(1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室,四川 绵阳 621000;2. 西南科大 四川天府新区创新研究院,四川 成都 610299)

摘要:红外光斑中心定位是红外光学测量的关键技术一,针对红外光斑分辨率低、对比度差、目标边缘模糊和光斑定位精度低等问题,提出了一种具有高精度小尺寸的红外光斑定位算法。对于红外图像前处理从单一滤波和组合滤波进行图像的前处理,之后通过红外光斑质心法和形心法确定光斑中心所在的亚像素级坐标。结果表明:在有噪声污染的红外光斑图像中,与其他算法相比,本算法误差小于0.035个像素,保证了红外光板的高精度定位。

关键词:红外光斑定位;高斯滤波;小波变换;形心法

中图分类号:TP391.4;TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.020

An infrared spot location algorithm under vacuum deep low temperature

LI Shan-bin, NI Lei

(1. Key Laboratory of Manufacturing Process Testing Technology of the Ministry of Education,
Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China;

2. Tianfu Institute of Research and Innovation, Southwest University of Science and Technology, Chengdu 610299, China)

Abstract: Infrared spot center location is the key technology of infrared optical measurement. Aiming at the problems of low infrared spot resolution, poor contrast, blurred target edge and low accuracy of spot location, an infrared spot location algorithm with high precision and small size is proposed in this paper. For infrared image pre-processing, the image is pre-processed by single filter and combined filter, after which the sub-pixel level coordinates where the spot center is located are determined by the IR spot center-of-mass and form-center methods. The results show that the error of this algorithm is less than 0.035 pixels compared with other algorithms in the infrared spot image with noise pollution, which ensures the high-precision positioning of the infrared light plate.

Keywords: infrared spot location; Gaussian filter; wavelet transform; centroid method

1 引言

红外成像技术是把所要测试的目标的红外热辐射及其所处的背景信息采集后转化成为红外图像的过程。红外图像中目标的检测对于跟踪应用和红外搜索都非常重要,它已经在我们的生活各个方面都发挥着重要作用。

本课题背景为应用在航空航天领域光学材料的

折射率测量,通过将真空罐内样品温度降低到极低温模拟太空环境,之后使用红外相机捕获红外光斑图像(光斑由高温黑体发出,经过一定的光路最后从真空罐通过透镜发出映射在红外相机的镜头上)。在航空航天领域对光学元件的基础参数精度要求高,光学元件的基础参数的精度很大程度上决定了光学器件使用的稳定性,提高红外图像的定位

基金项目:四川省科技计划项目(No. 23ZDYF0471)资助。

作者简介:李善斌(1998-),硕士研究生,研究方向为红外图像处理与识别。

通讯作者:倪磊(1984-),副教授,硕士生导师,研究方向为低温环境下的精密测试技术,光学精密抛光技术。E-mail: 2476910285@qq.com

收稿日期:2023-11-16; **修订日期:**2023-12-14

精度有助于对后续目标参数的计算精度的提高。

针对复杂的背景下红外图像中的小目标检测定位困难、图像的信噪比较低等问题,自20世纪90年代以来,越来越多的新方法不断被提出,国内外都进行了大量的实验和探究,提出了许多较好的处理方法的同时,实时性、强鲁棒性和通用性成为了红外弱小目标信号处理技术的核心需求。综上所述,红外弱小目标的检测定位技术是近几年来红外图像信息处理技术的研究热点和难点之一,但是通用性好、强鲁棒性强、实时性佳的红外目标检测定位算法还没有出现,如何改善现有的红外目标检测定位算法的缺点,在强背景下高效可靠的弱小目标检测算法仍需要进行突破。研究强背景下的高精度目标定位算法在红外导引制导,火灾预警,空天防御等领域具有重要作用与研究意义。

在红外图像中,在对红外弱小目标进行处理时有两个根本方面的难点:首先是红外小目标的尺寸较小,从整个图像的像素占比来看,只占了很小的一部分,通常情况下,人们常常将占比低于红外图像总像素0.15%的目标认定为小目标。另外一方面是由于小目标所处的环境的干扰影响,加上小目标本身的能量较弱,采集得到的红外图像中对应的目标灰度值较低,简言之就是小目标的灰度对比度和信噪比较低。针对于这一问题,2004年,张文超通过实验中运用基于小波变换的预处理算法,对图像进行处理后,有效抑制了背景的杂波^[1]。2006年,杨磊提出了自适应的巴特沃斯高通滤波器,此算法将红外环境的复杂度通过加权信息熵来度量,然后运用加权信息熵,对滤波器进行自适应地修改截断频率,以此达到了自适应调节高通滤波器的参数的目的,从而适应不同的场景^[2]。数学形态学滤波也是一种很常见的对于红外弱小目标图像的预处理算法,其中顶帽变换(Top-Hat)在红外弱小目标检测中应用极其广泛。2006年,曾明等人提出了一种自适应形态学的Top-Hat滤波算法,该方法对于信噪比较低的复杂图像有良好的滤波效果^[3]。之后,2010年,Xiangzhi Bai等人设计了新的形态学结构元素,以此来替换了传统Top-Hat的形态学结构元素,对于背景的消除作用增强,提升了Top-Hat滤波的效率,对于红外弱小目标图像有更好的预处理效果^[4]。

基于以上原因,本文采用小波变换和高斯滤波

后进行光斑形心检测,且考虑到在预处理时阈值选取会出现不准确的情况,本文提出一种基于形心法和组合式前处理的红外光斑定位算法,用以提高红外光斑定位精度,提高红外目标准确度。

2 红外小目标的图像特征

本课题所选取的红外图像是处于真空深低温环境下的红外光斑图像。

如图1所示,图像像素为 640×512 。其中光斑占比较小,且对比度较低。特征提取具有一定难度。并且从图中可以看出,光斑信号较弱,在提取的过程中容易受到噪声污染。在红外光学中,对红外光斑的定位精度要求较高,以满足实验要求,故在不影响光斑中心特征的情况下,我们所达到的红外光斑定位精度越高,越能使后续对红外光学材料的特性研究更加深入。

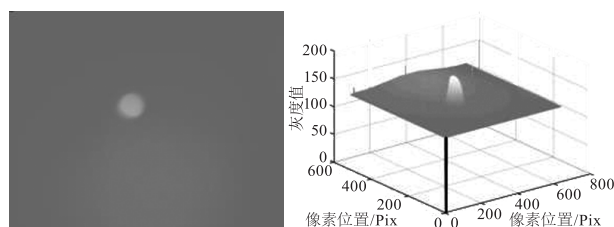


图1 原始图像

Fig. 1 Original image

3 传统质心处理算法

图1为对图片直接使用质心法处理以及使用阈值处理及中值滤波之后的原始图片,可以看出红外图像直接进行处理是不现实的,需要对其进行必要的前处理,经过基本滤波之后,其定位精度有了明显的提升。但由于所需的定位精度较高,故需要对算法进行极差处理分析。通过分析得到图2所示处理结果。

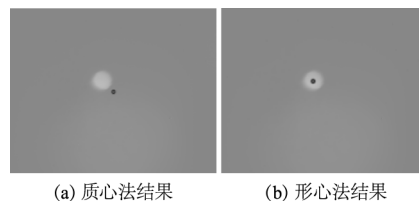


图2 常用光斑定位方法处理结果

Fig. 2 The results are processed by common spot location methods

图3为质心法和形心法^[5]对图片集处理结果。对数据库735张图片进行分析,图3只对图片进行质心处理,其 x 轴向极差为0.1240 pix,但由原始图片可以看出,其定位准确度较差。

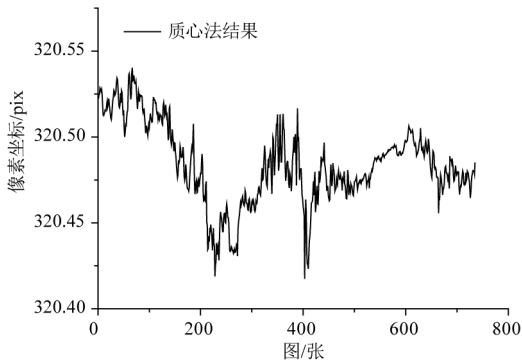


图 3 图片集质心法处理结果

Fig. 3 Image set mass center method processing results

图 4 对图片进行阈值处理之后进行中值滤波,其 x 轴向极差为 0.5240 pix,对图片进行预处理过后,图片准确度有了明显提高,但定位精度反而降低了。是因为预处理过程在去除噪声的过程中也去除了部分光斑的有效信息。

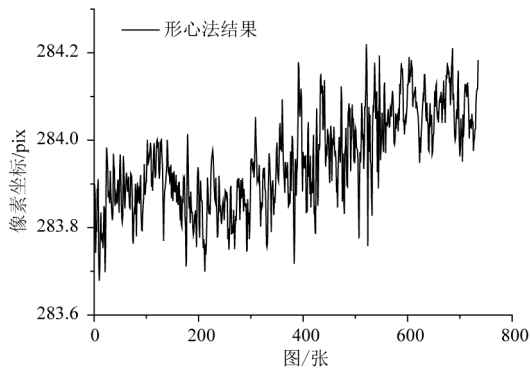


图 4 图片集形心法处理结果

Fig. 4 The results of image concentric processing

3.1 小波变换法

小波变换原理如图 5 所示,将傅里叶变换中无限长的三角函数基换成了有限长的会衰减的小波基,它的能量有限,都集中在某一点附近,而且积分的值为零。傅里叶变换,变量只有 w ,而小波变换则有尺度 a 和平移量 b ,尺度对应于频率,平移量对应于时间,所以小波变换可以用于时频分析,得到信号的时频谱。下面是小波函数的一般形式:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R \quad (1)$$



图 5 小波变换原理图

Fig. 5 Wavelet transform schematic diagram

3.2 形心定位算法

形心法定位作为对目标为中心对称图像高精度亚像素定位的优秀算法,它主要用到了零阶矩和一阶矩,简单易行,该方法对于几何特性对称的目标具有良好的定位效果。进行形心法定位前,需要对目标进行二值化处理,将所需要处理的目标范围切割出来,使得目标区域内的灰度值为常数 1,而非目标区域灰度值为 0,然后在运用形心法对二值化图像中目标的形心 (x, y) 进行定位,其计算公式如下:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iI}{\sum_{(i,j) \in S} I} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N} \\ y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jI}{\sum_{(i,j) \in S} I} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N} \end{cases} \quad (2)$$

其中, i, j 为图像元素的行列数; x_0 为定位中心的 x 坐标; y_0 为定位中心的 y 坐标,为了使定位精度较高^[6],在形心法计算前需要对图像进行预处理。以此来消除一部分噪声或者是背景中的其他干扰,降低二值化分割过程中的误差。

3.3 质心定位算法

灰度质心法^[7]是把目标图像的各个像素点灰度值作为权重,然后计算目标的质心坐标。

质心坐标计算的表达式为:

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)}, y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F(x, y)} \quad (3)$$

其中, m, n 是图像的长宽像素大小; (x_0, y_0) 为计算出来的目标质心坐标值; $F(x, y)$ 为图像内点 (x, y) 对应像素点的灰度值大小。

3.4 高斯滤波

高斯滤波是由高斯函数变换得来,高斯函数在统计学领域^[8]有非常广泛的应用,在统计学领域,其主要用于表述正态分布。在信号处理方面,其主要用于定义高斯滤波器。在图像处理中,二维核高斯函数常用于高斯模糊。

下式为一维高斯函数表达式:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, a, b, c \in R \quad (4)$$

为了适应图像中各像素的值的变化的,需要将一

维高斯函数拓展为二维高斯函数,以适应图像 x, y 轴坐标的元素值。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

高斯滤波其实就是对我们所采集的图像进行加权平均的过程,其中任何一个像素点的值,都是通过它本身和领域内的其他元素的像素值通过加权平均之后得到的。高斯滤波的具体实现其实就是用模板扫描图中的每一个像素,之后再模板确定的领域内像的加权平均灰度值去代替模板中心像素点的值。

在具体的实现中,可以通过定义一个 M 矩阵,矩阵大小为 $(2k+1, 2k+1)$, k 为模板中心,则 $M(i, j)$ 的值如下式所示:

$$M(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i-k-1)^2 + (j-k-1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

随后通过卷积实现图像滤波过程:

$$w(x, y) * f(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x+s, y+t) \quad (7)$$

式中, w = 高斯算子, a, b = 算子大小

4 数据处理

从图 2 和图 3 的结果可以看出,直接使用传统质心法和形心法明显是不可取的。对此,决定从红外图像的前处理来提高目标的检测精度。图 6 为红外光斑处理流程。

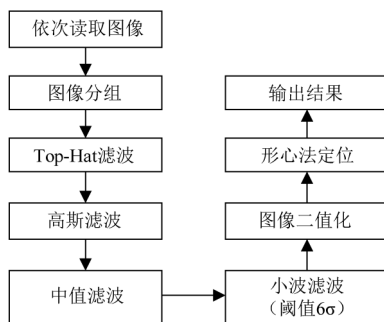


图 6 红外光斑定位处理流程

Fig. 6 Infrared spot positioning process

首先采用循环读取图像,为了提高定位精度和定位的准确度,将图片集的 735 张中的每 3 张分为一组,总共 245 组,之后对同一组图像叠加取均值处理,这样可以降低我们处理数据集的粗大误差。之后对得到的图片做前处理,前处理过程主要为 TOP-

Hat 滤波、高斯滤波、中值滤波、小波滤波^[9],其中可以根据结果选取合适的小波阈值,最后就是图像形心法定位,通过我们所采用的前处理方法对图像进行二值化,并将定位点的 x 坐标和 y 坐标输出。

首先选取小波阈值为 2σ ,结果如图 7 所示。其他条件都相同的情况下,从单一图像上可以看出,除了中心红外光斑信息,出现了边缘信息未经过滤除。考虑原因是因为出现了信号较为强烈的噪声干扰,此时会影响红外光斑定位准确度^[10]。

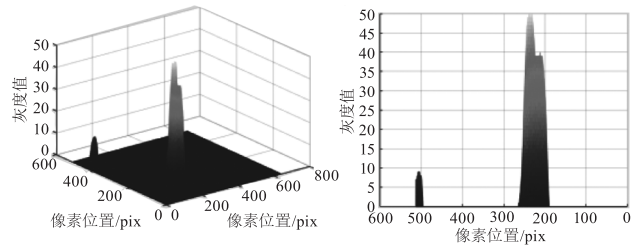


图 7 2σ 小波阈值单一图片结果

Fig. 7 2σ wavelet threshold single picture result

之后对数据集进行定位分析处理,结果如图 8 所示,将所有结果加入数组进行分析,得到红外光斑图像数据集在小波阈值为 2σ 时,结果 x 轴向极差小于 0.04 pix, y 轴向极差小于 0.08 pix。

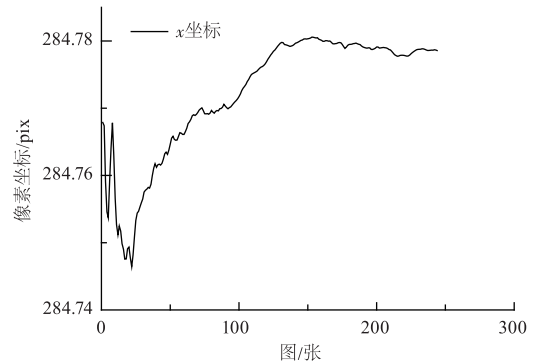


图 8 2σ 小波阈值处理 x 坐标结果

Fig. 8 The 2σ wavelet threshold processes the x -coordinate result

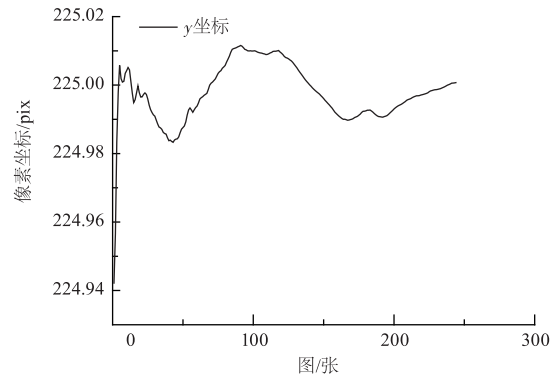


图 9 2σ 小波阈值处理 y 坐标结果

Fig. 9 The 2σ wavelet threshold processes the y -coordinate result

之后将小波阈值换为 6σ 。得到图 10 结果,从单一图像上看,小波阈值为 6σ 时,得到的图像已经几乎无干扰信息,只剩下了所需要的中心红外光斑信息。由图 10 可以看出,在小波阈值为 6σ 时,红外光斑定位准确度较为出色,并且从图片上可以看出,背景已经过滤得较为干净。

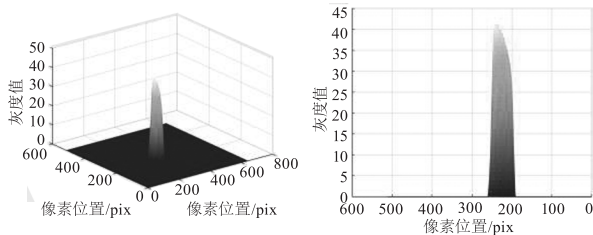


图 10 6σ 小波阈值单一图片结果

Fig. 10 6σ wavelet threshold single picture result

之后对数据集进行定位分析处理,将所有结果加入数组进行分析,得到红外光斑图像数据集在小波阈值为 6σ 时,结果 x 轴向极差小于 0.035 pix , y 轴向极差小于 0.08 pix 。

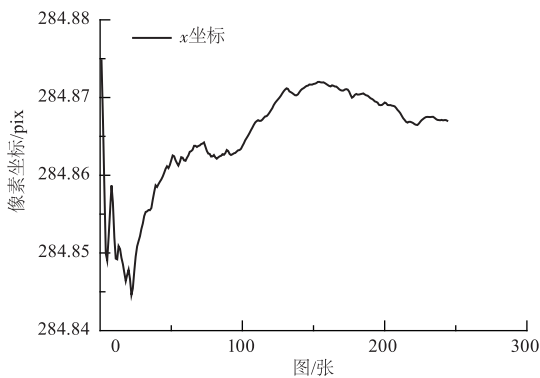


图 11 6σ 小波阈值处理 x 坐标结果

Fig. 11 The 6σ wavelet threshold processes the x -coordinate result

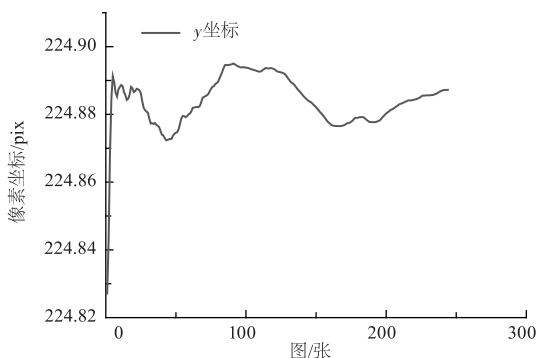


图 12 6σ 小波阈值处理 y 坐标结果

Fig. 12 6σ wavelet threshold processing y coordinate results

对比测试结果,当小波阈值取为 6σ 时,红外光斑定位准确度较高,且红外光斑定位精度较高。本算法在对小目标红外光斑进行定位时具备高精度和

高准确度的特性,符合红外光斑定位所需要的定位参数要求。

5 结 语

本文主要研究了对于强背景辐射条件下的红外图像中微弱目标的高精度定位算法,从红外图像的滤波前处理算法和定位算法两个层面入手,展开了对所需处理实验图像的目标定位和精度分析。通过数据集对比提出了一种组合滤波的前处理方法,其中主要是 Top-Hat 滤波、小波变换和高斯滤波,通过分析得到小波滤波的最佳阈值。以此减弱红外背景的噪声干扰。最后通过形心法对其进行定位处理。本算法精度可以达到亚像素级别,定位精度高,并且图像高斯性越好,定位精度越高,是一种可行的红外光斑中心定位方法。

参考文献:

- [1] Zhang Wenchao. Study on the algorithms for small moving object detection in complex background[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)
张文超. 复杂背景下运动小目标识别算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [2] Yang Lei. Study on infrared small target detection and tracking algorithm under complex backgrounds [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
杨磊. 复杂背景条件下的红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [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, (1): 90-93, 97. (in Chinese)
曾明, 李建勋. 基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小目标检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, (1): 90-93, 97.
- [4] Bai X Z, Zhou F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. Pattern Recognition; the Journal of the Pattern Recognition Society, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [5] Li Tianyu, Wang Mingquan, Hao Lihua, et al. Signal flare spot center location method based on Gaussian fitting [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(3): 422-426. (in Chinese)
李天宇, 王明泉, 郝利华, 等. 基于高斯拟合的信号弹光斑中心定位方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(3): 422-426.

- [6] Zhao Jingxin, Zhou Fuqiang. High-precision center location algorithm of small-scale focal spot [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (8): 2690 – 2693. (in Chinese)
赵婧鑫, 周富强. 小尺寸光斑中心的高精度定位算法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43 (8): 2690 – 2693.
- [7] Xu Meiqi. Research on detection methods of the infrared dim small target in the complex background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
许美琪. 复杂背景下红外弱小目标检测方法研究 [D]. 长春: 中国科学院大学: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [8] Wang H, Yang F, Zhang C C, et al. Infrared small target detection based on patch image model with local and global analysis [J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2018, 18 (1): 1850002.
- [9] Zhao Pengpeng, Li Shuzhong, Li Xun, et al. Infrared dim small target detection based on visual saliency and local entropy [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15 (2): 267 – 275. (in Chinese)
赵鹏鹏, 李庶中, 李迅, 等. 融合视觉显著性和局部熵的红外弱小目标检测 [J]. *中国光学*, 2022, 15 (2): 267 – 275.
- [10] Chen Jing. Infrared small target detection [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
陈静. 红外弱小目标检测 [D]. 南京: 东南大学, 2017.