

全向激光探测系统中光斑精确定位方法研究

黄富瑜, 李刚, 何永强, 应家驹

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要:介绍了全向激光探测系统的成像特点,引入了两种亚像素激光光斑中心定位算法——灰度重心法和椭圆拟合法,并对两种算法进行了理论分析和实验验证,得到了不同光斑大小下光斑定位坐标均值和标准差数据,数据显示:灰度重心法和椭圆拟合法分别在光斑较小和较大时具有较高的定位精度。鉴于此,为提高系统定位精度,提出针对不同大小光斑分别使用灰度重心法和椭圆拟合法的綜合定位方法,由实验数据可知,綜合方法可以保证定位精度在0.15个像素以下,这有助于后续对激光源精确定向工作的开展。

关键词:激光光斑定位;亚像素;灰度重心法;椭圆拟合法;动态梯度

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

Algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser detecting system

HUANG Fu-yu, LI Gang, HE Yong-qiang, YING Jia-ju

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The imaging characteristic of omni-directional laser detecting system is introduced, and two algorithms of subpixel measurement are put forward. The two algorithms are respectively barycentre method and elliptic fitting method. The theoretical analysis and experimental verification were carried out with the two algorithms. The mean value and standard deviation of the spots' coordinates with different size were obtained. The result shows that: the locating precision of barycentre method is high when the laser spot is small, and precision of elliptic fitting method is high when laser spot is large. Thus, in order to heighten the system's locating precision, a comprehensive method, which automatically selects one of the two algorithms according to the size of laser spot, is put forward. The experiment data indicates that the comprehensive method has high locating precision, which can be under 0.15 pixels. The result of this work is helpful for the study of precise determination of threatening laser direction.

Key words: laser spot locating; subpixel; barycentre method; elliptic fitting method

1 引言

激光装备的运用,对军事目标构成了越来越严重的威胁,能否实现对来袭激光的精确定向直接关系到被保护目标的战场生存能力^[1-2]。与其他类型的激光探测系统相比,全向激光探测系统具有以下特点:①大空域接收;②凝视式探测;③固定波长探测。要实现激光源的定向,首先要完成对成像光斑的精确定位工作,当前常用的光斑定位方法有形心法、灰度重心法、Hough变换法、最小二乘法和空

间距法等^[3-6],受成像面光斑非均匀分布影响,这些算法在成像型激光探测系统中使用时定向精度受到一定限制。本文通过分析系统成像特点,提出了綜合灰度重心法和椭圆拟合法的激光定位方法。

2 全向激光探测系统成像特点分析

全向激光探测系统的组成部分为:鱼镜头、窄

作者简介:黄富瑜(1985-),男,硕士研究生,研究方向为光电对抗和信息处理。E-mail:hfy-516@163.com

收稿日期:2010-07-20;修订日期:2010-08-13

带滤光片和成像探测器,如图1所示。鱼眼透镜的超大视场,可覆盖半球空域;窄带滤光片滤除杂散光,降低虚警率,实现对特定波长的激光探测;成像探测器通常响应灵敏度高,像元密度大,像元尺寸很小,通常为微米量级,因而可以实现激光源的精确定位。其工作原理是:系统探测到威胁激光后,解算激光光斑中心与光轴的精确距离,再通过距离与激光入射角度之间的函数关系实现对入射激光的精确定向。

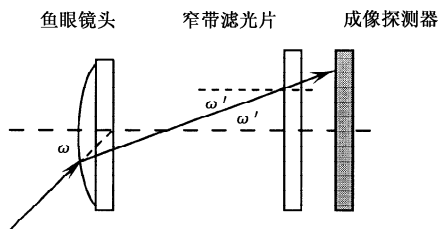


图1 全向激光探测系统结构

Fig.1 structure of omni-directional laser detecting system

系统成像特点决定于鱼眼镜头的“非相似”成像原理^[7]:采取对物空间实行“变形压缩”的方式实时获取高斯光学认为不能成像的角空域信息。从光学上说,这种压缩可通过人为地引入大量“桶形畸变”来实现,从数学角度讲,就是选择恰当的理想成像公式来代替高斯光学中的“相似”成像公式。

由于成像探测器的像元是由光敏区域和非感光区域的填充区域构成,因此激光光斑与像元之间的相互位置关系直接影响到探测器的像元响应灰度:当衍射激光光斑完全位于光敏区域之间的非感光填充区域时,则无像元响应,形成漏警;当衍射光斑覆盖像元的光敏区域时,随着激光强度的增大,像素的灰度值逐渐增大至饱和,并向四周扩散,引起周围像素灰度值的变化。在鱼眼镜头聚焦情况下,当平行激光入射时,在成像面上形成一定大小的衍射光斑。随着光线入射角的增大,像差增大,造成成像面上的光斑并非圆对称,甚至在弧矢面方向上的非轴对称。造成光斑非对称的主要原因是:子午面和弧矢面上,主光线和边缘光线不交于同一点所形成的彗差和像散。这就使得当入射光强较小时,探测器响应的像素点较少,光斑所能提供的像素和灰度信息也较少,容易造成光斑定位误差。

鉴于以上分析,为克服鱼眼镜头聚焦情况下存在的缺点,并获取丰富的光斑灰度信息,实验中镜头采用微离焦方式工作。经实验验证,当镜头处于微离焦状态时,入射激光能量较强时像面上光斑呈现圆形或椭圆形,包括主光线在内的所有光线均在这

个圆形或椭圆形区域内,此时便克服了彗差和像散带来的非均匀性影响。实验中发现,像面上激光成像光斑形状服从以下规律:

(1)在入射激光能量很小时,成像光斑只占数个像素,光斑形状信息较少;随着入射激光能量的增强,光斑逐渐呈现圆形或椭圆形;

(2)当激光入射角度较小时,光斑形状成圆形;随着角度的增大,光斑形状的椭圆特征越来越明显。

3 算法介绍

3.1 灰度重心法

传统的重心法是将图像二值化,判断光斑的几何中心,故又叫形心法。形心法将丢失光斑分布的细节,这里采用灰度重心法。灰度重心法可以看成是以灰度为权值的加权形心法。灰度图像 $I(i, j)$ 中目标 S 的灰度重心为:

$$x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i \times W(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i, j)} \quad (1)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j \times W(i, j)}{\sum_{(i,j) \in S} W(i, j)} \quad (2)$$

式中, $W(i, j)$ 为权值,灰度重心取 $W(i, j) = I(i, j)$ 。

如果背景灰度值较小,目标灰度值较高,而且目标的灰度分布为抛物面或高斯曲面,那么灰度重心法可以获得较高的定位精度。但是实际图像中目标特征的情况很复杂,例如亮背景和暗目标、目标和背景的灰度值都比较高,因此用灰度作为权重的应用是有限的。由此给出一种改进的权值选取方法,即阈值灰度重心法,权值 $W(i, j)$ 定义为:

$$W(i, j) = \begin{cases} I(i, j) & (I(i, j) > T) \\ 0 & (I(i, j) \leq T) \end{cases} \quad (3)$$

式中, T 为区分目标和背景的阈值。

3.2 椭圆拟合法

拟合法是一种基于最小二乘准则的数学方法,通过对目标的坐标或灰度进行拟合,可以得到目标的连续函数形式,从而可以确定描述物体的各个参数值。当目标的特征是圆或椭圆时,对提取的目标边界的一组点进行椭圆最小二乘拟合^[8],从而确定光斑中心位置。在拟合之前需对目标边缘信息进行提取。

3.2.1 基于 Roberts 算子的目标边缘提取

椭圆拟合法的前提是获取目标边缘信息,即对激光光斑边缘点信息进行提取,以此来得到光斑中心,因此边缘提取决定了光斑定位的好坏。

边缘是图像灰度变化比较剧烈的地方,边缘点处有一阶导数的峰值,同时会有二阶导数的零交点。

微分算子^[9]就是以此为理论基础,在空域进行卷积,然后设置门限来提取边缘点集。由于边缘、轮廓在一幅图像中常常具有任意的方向,所以需要找到一些各向同性的检测算子,它们对任意方向的边缘、轮廓都具有相同的检测能力。

目前常用的边缘检测算子有 Sobel 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子等。鉴于 Roberts 算子对于低噪声图像效果较好,而实验图像为均匀低背景下的激光光斑图像,因此利用 Roberts 算子对光斑图像进行边缘提取。经实验验证,Roberts 算子的提取效果确实优于其他微分算子,该算子原理如下^[10]:

Roberts 算子是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子,其模板如图 2 所示。

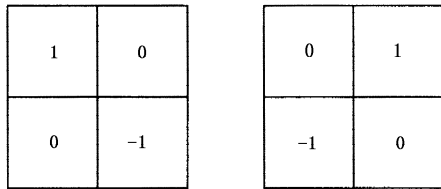


图2 Roberts 算子模板

Fig.2 template of Roberts operator

Roberts 算子的定义为:

$$G[f(i, j)] =$$

$$\sqrt{[f(i+1, j+1) - f(i, j)]^2 + [f(i+1, j) - f(i, j+1)]^2} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过求解该方程组便可以得到五个参数的值,进而求出椭圆中心坐标,即:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \end{cases} \quad (10)$$

4 实验和数据分析

为验证两种算法的可行性,在实验室条件下,组建激光光斑定位测试平台,如图 3 所示。固定激光源和系统的相对位置,通过调节衰减系统的衰减倍

由于上述算法的处理工作量很大,因此在实用中常采用绝对差算法对上式化简如下:

$$G[f(i, j)] = |f(i+1, j+1) - f(i, j)| + |f(i, j+1) - f(i+1, j)| \quad (5)$$

Roberts 梯度以 $[i-0.5, j-0.5]$ 为中心,所以它度量了 $[i-0.5, j-0.5]$ 点处 45° 和 135° 方向(相互正交)的灰度变化,适当选取门限 $T, G[f(i, j)] > T$ 为阶跃状边缘点。

3.2.2 椭圆拟合

在对光斑边缘信息获取的基础上,再经拟合计算便可得到光斑圆(或椭圆)及光斑中心的亚像素位置坐标。基于椭圆拟合的激光光斑中心检测算法是根据最小二乘原理(残差平方和最小)用椭圆来逼近激光光斑轮廓。椭圆方程的一般方程为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0 \quad (6)$$

其残差平方和函数为:

$$Q = E^2 = \sum_{i=1}^N (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + 1)^2 \quad (7)$$

式中, (x_i, y_i) 为激光光斑边缘点坐标。

根据最小二乘原理,应有:

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{\partial Q}{\partial B} = \frac{\partial Q}{\partial C} = \frac{\partial Q}{\partial D} = \frac{\partial Q}{\partial E} = 0 \quad (8)$$

由此可以得到包含 5 个方程和 5 个未知数的方程组,如下:

率,得到不同光斑大小的八幅图像(对同一光斑图像各采集十幅),如图 4 所示(图中标注 n 表示光斑所占的像素大小)。

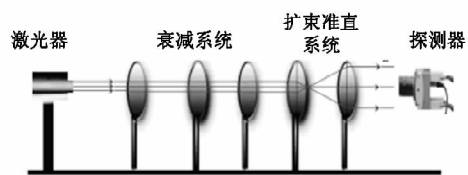


图3 激光光斑定位测试平台

Fig.3 experimental platform of laser spot locating

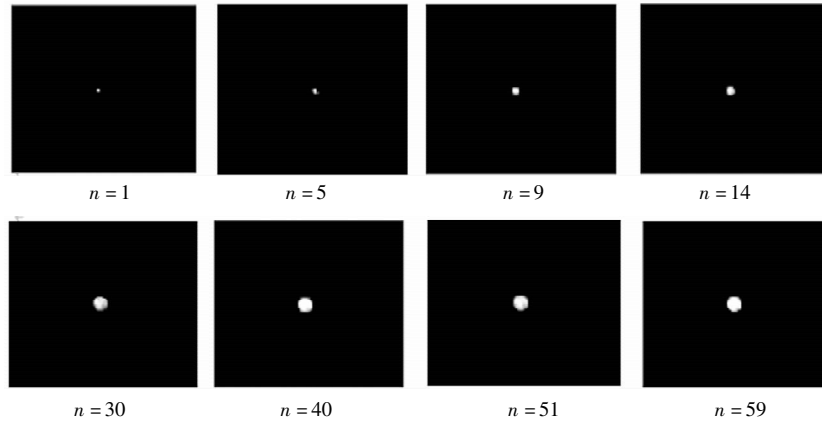


图4 不同大小的激光光斑图像

Fig. 4 images of laser spots in different size

由图4也可以看出,随着光斑所占像素的增多,光斑逐渐呈现椭圆形,对采集到的激光光斑图像分别采用灰度重心法和椭圆拟合法进行光斑中心定位。表1给出了定位后光斑中心横坐标值(纵坐标

情况类似)及其对应的标准差值,其中坐标值为对十幅相同光斑图像进行定位的坐标均值。对表中数据分析如下:

表1 激光光斑定位结果

Tab. 1 result of laser spot locating

光斑大小/像素		1	5	9	14	30	40	51	59
坐标值/像素	灰度重心法	106.00	105.95	106.24	106.33	105.45	105.67	105.78	106.47
	椭圆拟合法	NAN	NAN	106.01	106.10	105.89	106.08	105.83	105.84
标准差/像素	灰度重心法	0.01	0.04	0.25	0.34	0.53	0.32	0.20	0.48
	椭圆拟合法	NAN	NAN	0.05	0.14	0.07	0.12	0.13	0.12

(1)当光斑较小时,由于光斑信息较少,边缘提取无法获取足够的信息,使得椭圆拟合法不能完成精确定位,但此时灰度重心法具有较高的定位精度。经反复实验验证,当光斑小于9个像素时,灰度重心法的光斑定位标准差在0.15个像素以下,而此时椭圆拟合法失效。

(2)随着光斑的增大,椭圆拟合法的优势逐渐显现出来,当 $n \geq 9$ 时,通过椭圆拟合法确定的光斑中心标准差很小,均在0.15个像素以下,而此时由灰度重心法定位精度降低。

(3)分析原因:当光斑较小时,激光光斑形状特征不明显,灰度重心法是基于灰度加权的定位方法,此时参与加权计算的像素较少,引入的误差因素也相应减少,定位精度较高;当光斑较大时,激光光斑形状凸显出来,椭圆拟合法通过提取光斑边缘信息完成中心定位,有较高的定位精度;而此时灰度重心法参与加权计算的像素增多,但由于光斑灰度分布不均匀等因素使定位精度下降。

通过比较两种亚像素光斑中心定位算法的结果,为提高整个系统的光斑定位精度,在软件实现上

综合两种算法的优点,根据激光成像光斑的实际情况选择使用相应的定位算法,具体光斑定位流程如图5所示。首先对读取的光斑图像进行直方图统计,从而得到图像的灰度值分布,并以此确定阈值 T ,判断光斑大小,根据光斑大小确定亚像素光斑定位算法。

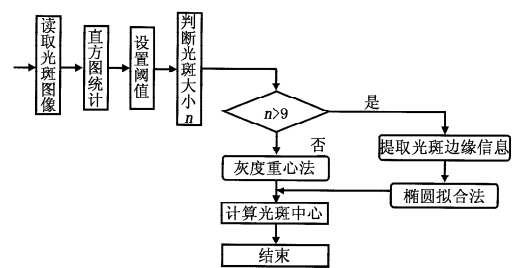


图5 全向激光探测系统的光斑定位流程图

Fig. 5 flow chart of spot locating for omni-directional laser detecting system

5 结论

光斑精确定位是全向激光探测系统的一项关键技术。本文结合全向激光探测系统的成像特点,在分析成像光斑特点和实验的基础上,实验验证了灰

度重心法和椭圆拟合法的各自特点:灰度重心法在光斑较小时具有很高的定位精度,而椭圆拟合法在光斑较大时定位精度较理想,鉴于此,提出了针对不同大小的光斑分别使用灰度重心法和椭圆拟合法的综合定位方法。综合方法可以有效保证光斑定位精度,使其控制在0.15个像素以内,这有助于后续对激光威胁源精确定向工作的展开。

参考文献:

- [1] Zhou Zhongliang, Zhou Bing, He Yongqiang, et al. Research on the technology of false alarm rejection in pulse laser detection by CMOS[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(2): 169 - 172. (in Chinese)
周中亮,周冰,何永强,等.用CMOS探测脉冲激光中的虚警抑制技术研究[J].*激光与红外*, 2008, 38(2): 169 - 172.
- [2] Wang Yongzhong. *Modern military optical technology* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
王永仲. *现代军用光学技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] Ying Jiaju, He Yongqiang, Zhou Zhongliang. High speed gradient hough transform algorithm for laser spot location [J]. *SPIE*, 2008, 6625: 66250J - 66250J - 6.
- [4] Lyvers E P, Mitchell O R, Akeym L, et al. Sub-pixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12): 1293 - 1309.
- [5] Yang Yaoquan, Shi Ren, Yu Xining, et al. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on hough transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 12(12): 1655 - 1660. (in Chinese)
杨耀权,施仁,于希宁,等.用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J].*光学学报*, 1999, 12(12): 1655 - 1660.
- [6] Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1): 61 - 64. (in Chinese)
唐冠群.几种激光光斑中心定位算法的比较[J].*北京机械工业学院学报*, 2009, 24(1): 61 - 64.
- [7] Wang Yong-zhong. *Fish-eye lens optics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
王永仲. *鱼镜头光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275 - 279. (in Chinese)
孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J].*红外与激光工程*, 2002, 31(3): 275 - 279.
- [9] Ma Yan, Zhang Zhihui. Comparison of some operators of edge detection [J]. *Industry and Mine Automation*, 2004, (1): 54 - 56. (in Chinese)
马艳,张治辉.几种边缘检测算子的比较[J].*工矿自动化*, 2004, (1): 54 - 56.
- [10] Luo Junhui, Feng Ping, Halidan A, et al. Application of MATLAB 7.0 in image processing [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007. (in Chinese)
罗军辉,冯平,哈力旦A,等. *MATLAB 7.0在图像处理中的应用* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.