

基于图像处理的炮弹跳角测量方法研究

姜 曼¹ 王 军^{1 2} 王 磊¹ 李 娜¹

¹(苏州科技大学电子与信息工程学院 江苏 苏州 215009)

²(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 吉林 长春 130033)

摘 要 传统的跳角测量方法,由于人工误差和实用性较弱,大部分有测量效率低、误差大、实用性小、测量范围窄等缺点。针对这些问题,提出一种基于图像处理的炮弹跳角测量方法。使用相机在炮筒中采集炮口图像,通过改进圆拟合算法检测炮口图像的中心位置;在双目摄像机的标定下得出炮弹射击目标点的位置,将炮口图像中心位置瞄准火炮射击目标后实弹射击;在数据处理中,计算得出炮弹初速度矢量的方向,结合炮口图像中心位置的瞄准方向,计算出火炮跳角的大小。实验结果表明,改进算法提高系统抗干扰能力的同时还提高炮口图像中心定位的精确度。拟合结果显示,改进的算法得到的炮口中心与理想中心之间的误差小于 0.20 个像素,具有较高的精度。

关键词 改进圆拟合算法 火炮跳角 图像处理

中图分类号 TP3 文献标志码 A DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2020.04.011

MEASUREMENT METHOD OF BULLETS' JUMP ANGLE BASED ON IMAGE PROCESSING

Jiang Man¹ Wang Jun^{1 2} Wang Lei¹ Li Na¹

¹(School of Electronic and Information Engineering , Suzhou University of Science and Technology , Suzhou 215009 , Jiangsu , China)

²(Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , Jilin , China)

Abstract The traditional measurement method of bullets' jump angle has the disadvantages of low measurement efficiency, large error, small practicability and narrow measurement range due to artificial errors and weak practicality. Aiming at these problems, we propose a measurement method of bullets' jump angle based on image processing. It used a camera to collect the images of the gun muzzle in the barrel, and detected the center position of the gun muzzle image through an improved circle fitting algorithm. Under the calibration of the binocular camera, we could obtain the position of the target point of the shell shooting, and aimed at the center position of the muzzle image at the target of the gun and then shot with real bullets. In the data processing, the direction of the initial velocity vector of the bullets was calculated, and the size of the bullets' jump angle was calculated according to the aiming direction of the center position of the muzzle image. The experimental results show that the improved algorithm improves the anti-interference ability and the accuracy of the muzzle image center location. The fitting results show that the error between the muzzle center and the ideal center obtained by the improved algorithm is less than 0.20 pixels, which has higher precision.

Keywords Improved circle fitting algorithm Bullets' jump angle Image processing

收稿日期: 2019-04-19。江苏省研究生科研创新项目(KYCX17_2060);苏州科技大学研究生创新项目(SKCX18_008);“十三五”江苏省重点学科项目(20168765);江苏省研究生工作站项目。姜曼,硕士生,主研领域:数字图像处理,光电检测。王军,副教授。王磊,讲师。李娜,硕士生。

0 引言

炮弹发射前身管轴线与炮弹发射后初速度矢量之间的夹角称为跳角。跳角是影响火炮射击精度的重要参数之一,火炮的射击精度越高,对目标的毁伤概率就越大。因此,准确测量火炮跳角,是火炮射击精度快速分析和诊断的关键环节,也是设计高性能火炮切急需的^[1]。

靶板法是目前广泛采用的火炮跳角测量方法,在炮口前面给定靶距位置竖立一面靶板,火炮射击后,弹丸在该靶板上留下弹孔,弹孔中心与靶板上瞄准中心之间的偏差量就表示跳角大小^[2]。由于靶板法具有不能满足大射角测量和测量效率低等固有缺陷,人们又提出了 PSD 法、陀螺仪法、线阵 CCD 立靶法和重叠法等改进方法。PSD 法能快速给出跳角时间曲线和幅值,但在炮口振动高加速度情况下,给 PSD 工作可靠性带来了技术挑战,因此目前为止,还未有火炮射击条件下 PSD 法跳角测量的文献报道^[3]。陀螺仪法主要应用于坦克炮,而且陀螺仪由于炮口振动加速度太大而不能正常工作,有用信号与干扰信号不能有效分离,最终不能达到设计目的^[4]。线阵 CCD 立靶法的优点是光幕靶代替靶板,立靶不影响弹丸飞行姿态,能快速自动给出测量结果,初速和跳角能同时测量,节省弹药,其缺点为可能出现漏测现象,位移分辨率还有待提高^[5-6]。

本文针对跳角测量方法效率低、误差大、实用性小、测量范围窄等缺点,提出一种基于图像处理的炮弹跳角计算测量方法。火炮跳角测量的精准度主要取决于炮口中心位置和火炮射击目标的瞄准,因而准确定位炮口中心的坐标位置十分重要,故本文侧重于研究测量过程中的关键算法——炮口图像中心定位算法。

1 基于图像处理的炮弹跳角测量方法

基于图像处理的炮弹跳角计算检测原理是在炮筒中放入 CCD 相机,用来采集炮筒出炮口的图像,通过改进的圆拟合算法得到出炮口的中心位置 O 。根据双目的标定得到炮弹射击目标的位置坐标 P_1 ,当炮口中心位置 O 瞄准射击目标 P_1 ,则炮弹发射前炮口身管轴线矢量方向为 OP_1 ,炮弹射击后,拟合炮弹运动轨迹,炮弹在飞行过程中受到重力下降的影响经过射击目标所在平面形成着弹点 P_2 ,根据重力下降计算得出炮弹初速度矢量的方向 OP_3 ,然后求解炮弹初速度矢量与

发射前炮口身管轴线之间夹角 θ ,即为火炮的跳角测量值。基于图像处理的炮弹跳角测量示意图如图 1 所示。

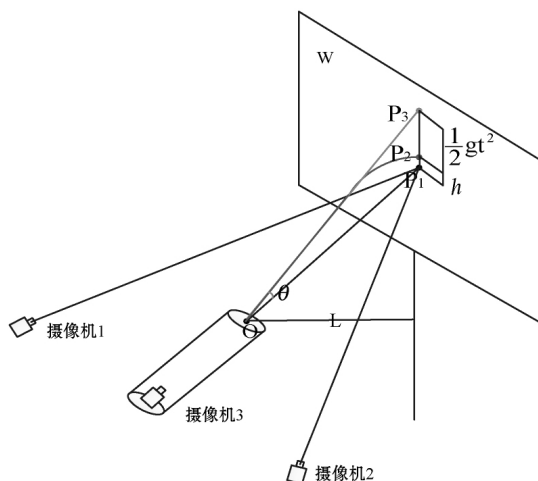


图1 基于图像处理的炮弹跳角测量示意图

图2为基于图像处理的炮弹跳角计算流程。

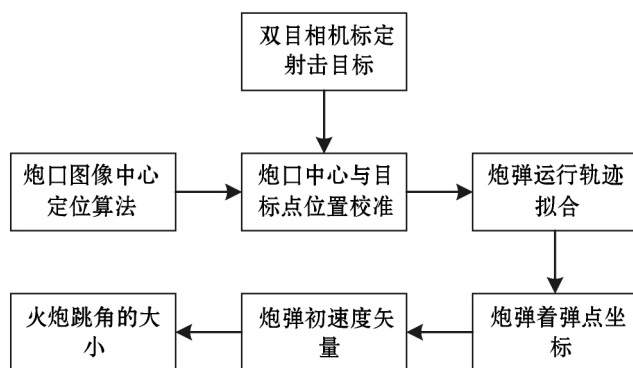


图2 基于图像处理的炮弹跳角计算流程

炮弹发射前身管轴线与炮弹发射后初速度矢量之间的夹角称为跳角,而炮弹发射前炮口身管轴线主要取决于炮口中心位置和射击目标的校准,因此高效精准的炮口中心定位算法十分重要。

2 炮口中心定位算法

2.1 圆拟合算法

基于圆拟合的检测炮口中心的算法的依据是:基于最小二乘法圆拟合原理(最小残差平方和)来逼近炮筒出炮口的轮廓^[7-8]。然后求解得出炮口的中心位置。圆的参数方程如下:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2 \quad (1)$$

在此,取残差为:

$$\varepsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \quad (2)$$

式中 $i \in E$, E 表示所有边界的集合; (x_i, y_i) 为图像边界点的坐标。

残差的平方和如下:

$$Q = \sum_{i \in E} \varepsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (3)$$

根据最小二乘原理,可知:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$\begin{cases} a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b - r^2 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = 0 \\ \bar{x}a^2 - 2\bar{x}^2a + \bar{x}b^2 - 2\bar{x}\bar{y}b - \bar{x}r^2 + \bar{x}^3 + \bar{x}\bar{y}^2 = 0 \\ \bar{y}a^2 - 2\bar{x}\bar{y}a + \bar{y}b^2 - 2\bar{y}^2b - \bar{y}r^2 + \bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}^3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\bar{x}^m \bar{y}^n = \frac{\sum_{i \in E} x_i^m y_i^n}{\sum_{i \in E} 1} \quad (6)$$

由此可以推算出参数 a 、 b 、 r 的表达式,即圆参数:

$$\begin{cases} a = \frac{(\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ b = \frac{(\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2\bar{y})(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{cases} \quad (7)$$

根据计算过程,可以看出基于最小二乘原理的圆拟合方法虽然形式略复杂,但是基于此算法的炮口中心定位算法仅需对边界点循环一次就可计算出各圆参数,半径 r 也只需计算一次就可获得,因此算法的整个计算速度很快。算法还能够多次迭代,运算的精度很高^[9-10]。

但是基于最小二乘原理的圆拟合算法抗干扰能力比较差,当存在随机噪声时,计算得到的中心位置的精确度会明显降低;当遇到外界的强干扰时,得到的中心位置甚至可能会有很大的偏差^[11-12]。

2.2 改进算法

针对最小二乘法炮口中心定位算法的抗干扰能力差的缺点和火炮炮口图像特征明显的特点,本文在圆拟合算法的基础上进行改进,以提高算法的抗干扰能力和炮口中心定位的精度。结合炮口采集图像的特征,对各种外界干扰噪声进行滤除,来达到提高抗干扰的目的,改进算法主要分以下4个部分:(1)如图3(b)、(c)所示,为了方便提取图像信息,对原始图像进行灰度化和二值化,图像二值化后可以大幅减少图像中的数据量,同时能凸显出目标物体的轮廓;(2)如图3(d)所示,对图像进行平滑滤波操作,图像滤波处理不仅能够去除一些噪声,还可以保留图像的边缘信息,

有利于图像的进一步处理;(3)如图3(e)所示,对滤波后的图像进行边缘检测,边缘检测算子选择 Canny 算子,Canny 算子相比于其他算子能更好地保留物体边缘;(4)如图3(f)所示,对图像进行圆拟合,得出炮口中心位置,以便炮口中心位置与射击目标位置的瞄准。

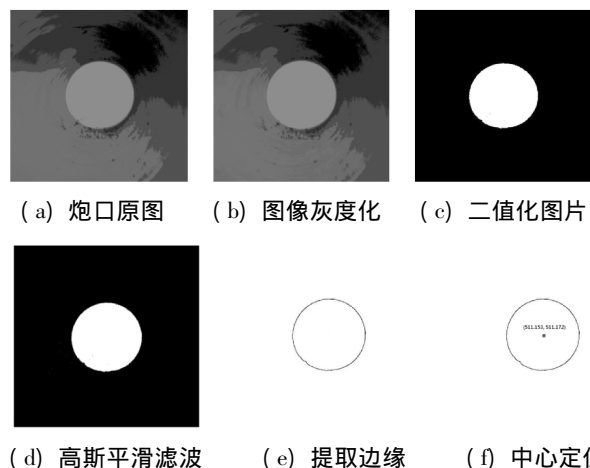


图3 改进算法图像处理分析
改进算法的基本流程图如图4所示。

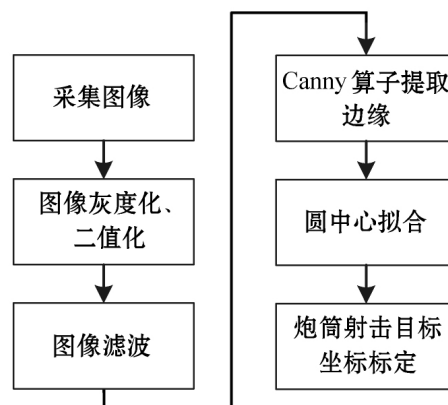


图4 改进算法的基本流程图

本文使用 DALSA 公司 1M60 相机采集炮口图像,将 CCD 测量相机装置放入火炮炮筒中,该 CCD 相机图像传感器的中心点与火炮瞄准光轴对齐。采集到的炮口图像的大小为 1024×1024 像素,在实验中,采集 10 组炮口图像,用传统的最小二乘圆拟合算法、霍夫算法^[13-14]和本文改进的算法对炮口图像中心进行定位处理后,处理结果如表1所示。理想的炮口图像中心像素坐标为(511.00, 511.00),霍夫算法的中心坐标为(511.884, 511.768),最小二乘算法得到的中心位置坐标为(511.499, 510.515),本文算法的中心坐标为(511.116, 511.138)。三组中心位置与实际理论坐标的误差散点图如图5所示,可以看出,最小二乘圆拟合算法的中心测量精度高于霍夫算法,但本文算法与最小二乘法圆拟合算法相比,稳定性好,精度高,算法误差在 0.20 个像素以内,具有较高的精度。

表 1 炮口图像中心算法计算结果对比分析

像素

Image		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
本文算法	x	511.15	511.05	511.05	511.15	510.88	511.14	511.15	510.91	511.15	510.89
	y	511.18	511.15	511.19	510.95	510.87	511.05	510.85	511.16	510.84	511.16
最小二乘圆拟合算法	x	511.55	512.09	511.65	511.40	511.20	511.40	511.60	511.30	510.60	510.40
	y	511.80	511.45	511.20	511.85	511.30	511.65	511.30	511.65	511.40	511.55
霍夫算法	x	511.85	512.32	511.42	511.65	511.86	512.18	511.87	512.01	511.67	512.01
	y	511.80	512.15	511.83	511.65	511.47	511.96	511.69	511.65	511.39	512.09

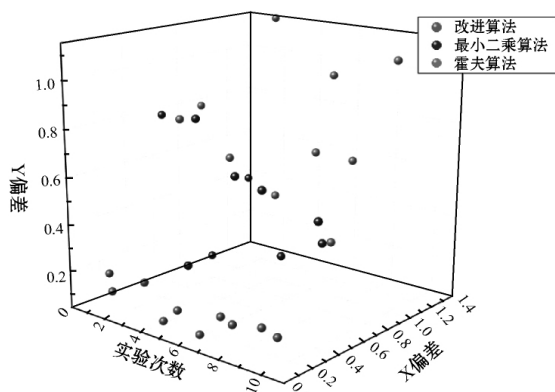


图 5 误差散点图

3 火炮跳角的计算

当炮口中心位置和射击目标精准对准时,根据双目相机的标定,建立三维世界坐标,建立以炮弹射击目标所在平面 W 深度方向为 Y 轴,水平垂直于 Y 轴方向为 X 轴,竖直垂直于 Y 面方向为 Z 轴建立三维坐标系,如图 6 所示。

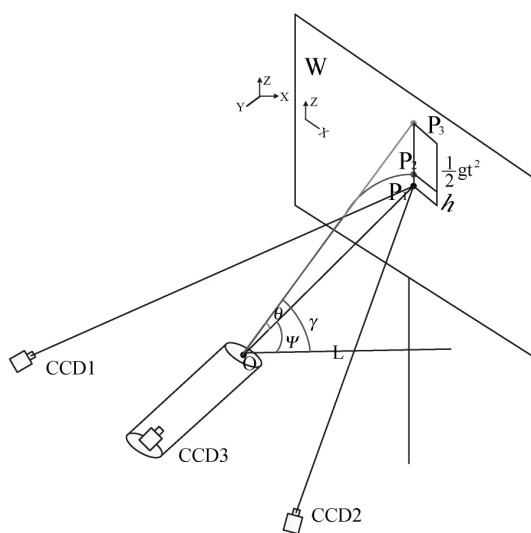


图 6 火炮跳角计算示意图

CCD 相机 1 和 CCD 相机 2 双目相机用来标定炮弹射击目标的位置,CCD 相机 3 用于将炮口中心位置 O 和炮弹射击目标 P_1 对准。在炮弹射出后,弹丸在飞

行过程中受到重力下降的影响在 W 平面形成着弹点 P_2 。 P_3 是炮弹初速度方向到达 W 平面所在交点。由相机标定可得 P_1 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , O 坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 则 P_2 的坐标是 $(x_2, y_2, z_1 + h)$, h 是炮弹着弹点和射击目标点之间的垂直距离(高低偏差), $\frac{1}{2}gt^2$ 为重力影响下降的距离,其中 t 为弹丸从炮口至着弹点的飞行时间,则 P_3 的坐标为 $(x_3, y_3, z_1 + h + \frac{1}{2}gt^2)$, L 为炮口中心位置到炮弹射击目标所在平面的水平距离。

炮弹初速度矢量的方向为:

$$OP_3 = (x_3 - x_0, y_3 - y_0, z_1 + h + \frac{1}{2}gt^2 - z_0)$$

炮弹发射前炮口身管轴线矢量方向为:

$$OP_1 = (x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$$

跳角定义得跳角 $\theta = \gamma - \varphi$ 。其中 γ 和 φ 的表达式为:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{z_1 + h + \frac{1}{2}gt^2}{L}\right) \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{z_1 + h}{L}\right) \quad (9)$$

则跳角 θ 的大小为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{z_1 + h + \frac{1}{2}gt^2}{L}\right) - \arctan\left(\frac{z_1 + h}{L}\right) \quad (10)$$

4 结 语

本文通过对圆拟合算法的改进,有效地减少了图像采集时所引入的噪声,提高了抗干扰性,综合考虑 CCD 图像畸变,图像采集处理所产生的误差,基于图像视觉的火炮跳角测量方法的检测误差远小于人工测量误差。其实用性、可行性,对部队检测火炮射击精度具有极大帮助。该系统已开始应用于部队火炮的跳角检测测量中,正在进一步推广。

(下转第 94 页)

较高时仍然可以更加精准地预测;在电离层 f_0F_2 预测中,其精度明显高于未优化的 Elman 神经网络,为飞机高频通信中通信频率选择提供更加精确的计算方法。

4 结 语

利用北京观测站提供的 f_0F_2 观测数据,对其进行混沌特性分析及预测。1) 通过计算 Lyapunov 指数对 f_0F_2 进行混沌检验,得到最大 Lyapunov 指数大于 0,验证了电离层的混沌特性。2) 提出了混沌算法和思维进化算法共同优化 Elman 神经网络。3) 数值仿真结果表明,相比 Elman 和 MEA-Elman 神经网络算法,本文提出的 Chaos-MEA-Elman 模型的频率预测值更接近真实值,对 f_0F_2 预测精度有很大的提升。所以,Chaos-MEA-Elman 模型对电离层参数变化趋势的预测是可行的,为飞机高频通信频率选择提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] 王健,冯晓哲,赵红梅,等. 高频率预测方法中国区域的精细化研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1797-1808.
- [2] 戴开良,罗发根,权坤海,等. 亚太地区 F2 电离层预测方法和 CCIR 方法的比较[J]. 空间科学学报, 1992(2): 153-156.
- [3] 万德煊,黄江,邓柏昌,等. 基于 IRI-2012 模型广州地区 f_0F_2 实测与预测的对比分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(2): 166-177.
- [4] 孔庆颜,柳文,焦培南,等. 电离层 f_0F_2 参数提前 24 小时预测[J]. 空间科学学报, 2009, 29(4): 377-382.
- [5] 张想,李明齐,王潮. 基于 BP 神经网络的短波通信信道预测方法[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(10): 55-56, 59.
- [6] 任淑婷,郭黎利. 基于模糊小波神经网络的短波频率预测[J]. 通信技术, 2011, 44(4): 37-39.
- [7] 赵德群,陈鹏宇,孙光民,等. 基于 MEA-WNN 的短波通信最佳频率预测[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(2): 215-219.
- [8] 行鸿彦,刘刚. 混沌系统相空间重构参数选取的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(7): 212-216.
- [9] Nath S, Kotal S D, Kundu P K. Seasonal prediction of tropical cyclone activity over the north Indian Ocean using three artificial neural networks [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2016, 128(6): 751-762.
- [10] 杨永锋,仵敏娟,高喆,等. 小数据量法计算最大 Lyapunov 指数的参数选择[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(3): 371-374.
- [11] 王嵘冰,徐红艳,李波,等. BP 神经网络隐含层节点数确定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(4): 31-35.
- [12] 艾格林,孙永辉,卫志农,等. 基于 MEA-Elman 神经网络的光伏发电功率短期预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 119-125.
- [13] 谢杰,黄筱调,方成刚,等. MEA 优化 BP 神经网络的主轴热误差分析研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(6): 1-4.
- [14] 王振华,龚殿尧,李广焘,等. 遗传算法优化神经网络的热轧带钢弯辊力预报模型[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(12): 1717-1722.

(上接第 68 页)

参 考 文 献

- [1] 涂炯灿,薛百文,詹博勋. 火炮后效期对具有跳角弹丸的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(2): 76-79.
- [2] 王宝元,高小科,李宝辉,等. 火炮跳角测量方法综述[J]. 测试技术学报, 2013, 27(4): 294-299.
- [3] 赵成吉. 关于传统的跳角测定方法存在问题的试验分析[J]. 兵工学报, 1985, 6(4): 61-64.
- [4] Xue C S, Lu A M, Deng Q B, et al. A study of measurement method of gun dump angle [C]//Proceedings of 4th International Symposium on Test and Measurement (Volume2), 2003: 1154-1156.
- [5] 左丹. 线阵 CCD 立靶在低伸弹道测量中的应用[J]. 无线电工程, 1993, 23(5): 57-61.
- [6] 王钦钊,白帆,李小龙,等. 直瞄武器综合修正量测试技术[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(S1): 131-132, 147.
- [7] 秦运柏,徐汶菊,朱君. 基于激光光斑中心检测的改进算法[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(5): 60-63, 67.
- [8] Zhou P, Wang X, Huang Q, et al. Laser spot center detection based on improved circled fitting algorithm [C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communications, Electronic and Automation Control Conference (IM-CEC). IEEE, 2018.
- [9] 吴泽楷,李恭强,王文涛,等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 346-350.
- [10] 王拯洲,许瑞华,胡炳樑. 基于圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 708-711.
- [11] Liu D, Wang Y, Tang Z, et al. A robust circle detection algorithm based on top-down least-square fitting analysis [J]. Computers & Electrical Engineering, 2014, 40(4): 1415-1428.
- [12] 邓凯鹏,陶卫,赵辉,等. 远距离激光光斑定位中的光晕抖动抑制算法[J]. 中国测试, 2017, 43(1): 96-100.
- [13] 郑云富,赵越,钱斌,等. 基于 Hough 变换与最小二乘拟合的香烟小包拉线错牙检测方法[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(1): 118-122.
- [14] 朱正伟,宋文浩,焦竹青,等. 基于随机 Hough 变换改进的快速圆检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(7): 1978-1983.