

基于改进最小二乘法的火炮跳角测量方法

姜曼^{1*}, 王军^{1,2**}, 杜博军^{2,3}, 王海峰³, 陈海松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;

³中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000

摘要 传统的跳角测量方法存在测量效率低、误差大、实用性差、测量范围窄等问题。针对这些问题,提出一种基于改进最小二乘法的火炮跳角测量方法。该方法采用改进圆拟合算法检测炮口图像的中心位置,并在双目摄像机的标定下得出火炮射击目标点的坐标位置,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,计算得出火炮射击初速度矢量的方向,结合炮口图像中心位置与射击目标的瞄准方向,最终得出火炮跳角的实际测量值。实验结果表明,改进算法包含的参数少,目标函数简单,计算复杂度低,在缩短计算时间的同时还提高了炮口图像中心定位的精确度。测量结果显示,跳角实测值精度误差在 $0.5'$ 之内,验证了跳角测量系统的准确性。

关键词 信号处理; 最小二乘法; 火炮跳角; 双目交会

中图分类号 TP399

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.030701

Measurement Method of Gun's Jump Angle Based on Improved Least-Squares

Jiang Man^{1*}, Wang Jun^{1,2**}, Du Bojun^{2,3}, Wang Haifeng³, Chen Haisong¹

¹*School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;*

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

³*Center of Arms Experiment of Baicheng, Baicheng, Jilin 137000, China*

Abstract Traditional methods measuring the gun's jump angle have the disadvantages of low measurement efficiency, large error, weak practicability, and narrow measurement range. Aiming at these problems, a gun's jump angle measurement method based on the improved least-squares algorithm is proposed. The method uses the improved circle fitting algorithm to detect the center position of the muzzle image, and obtains the coordinates of the gun shooting target point under the calibration of the binocular cameras. The target is collimated with the center position of the muzzle image and then shot. In data processing, direction of the gun initial velocity vector is calculated and used to obtain the actual measurement result of the gun's jump angle, combined with the center position of the muzzle image and the aiming direction of the shooting target. The experimental results show that the improved algorithm is with fewer parameters, simple objective function, and low computational complexity, and it shortens the calculation time and improves the accuracy of the muzzle image center positioning. The measurement results show that the accuracy of the measured jump angle is within $0.5'$, which verifies the accuracy of the jump angle measurement system.

Key words signal processing; least squares; gun's jump angle; binocular vision

OCIS codes 070.4560; 100.2960; 110.2970

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-07-29

基金项目: 江苏省研究生科研创新项目(KYCX17_2060)、“十三五”江苏省重点学科项目(20168765)、江苏省研究生工作站项目、苏州科技大学校研究生创新项目(SKCX18_008)

* E-mail: 1347787405@qq.com; ** E-mail: wjyhl@126.com

1 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^[1]。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所迫切急需的^[2]。

传统的跳角测量方法有很多,比如靶板法、叠测量法、线阵 CCD 立靶法、陀螺仪法和相敏检测(PSD)方法等。传统的测量方法有许多不足之处,包括测量效率低、误差大、实用性小和测量范围窄等^[3]。针对上述缺点,为了更精准、更快速地得出火炮跳角的大小,提出一种基于改进最小二乘法的火炮跳角测量方法。在火炮炮筒中放入 CCD 相机采集炮口图像,通过改进的圆拟合算法计算出炮口图像中心位置,将炮口中心位置瞄准火炮射击目标,火炮射击后拟合炮弹运动轨迹,炮弹在火炮射击目标所在的平面形成着弹点,通过射击目标点和着弹点之间的坐标位置计算出火炮跳角的实际测量值。由此可见,火炮跳角的精准度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,也是本文研究的重点。

2 火炮跳角测量原理

基于改进最小二乘法的火炮跳角测量方法如图 1 所示。其中 O 为火炮炮口的中心位置, P_1 为火炮射击目标点的位置, W 为射击目标点所在的平面, P_3 为火炮初速度方向到达 W 平面的交点, P_2 为炮弹在 W 平面着弹点的位置, L 为火炮炮口的中心位置到虚拟平面的距离,着弹点 P_2 和射击目标点 P_1 之间的垂直距离(高低偏差)为 h ,炮弹在飞行过程中受到重力影响下降的高度为 $gt^2/2$, t 为弹丸从炮口至着弹点的飞行时间。基于改进最小二乘法的火炮跳角测量原理,是在火炮炮筒中放入 CCD 相机(CCD3),用来采集炮筒出炮口的图像,通过改进的圆拟合算法得到火炮炮口图像的中心位置 O ^[4-5]。根据双目相机(CCD1 与 CCD2)交会原理得到火炮射击目标点的位置坐标 P_1 ,当炮口中心位置 O 瞄准射击目标点 P_1 ,则发射前火炮身管轴线矢量方向为 $\overrightarrow{OP_1}$ 。火炮射击后,拟合炮弹运动轨迹,炮弹在飞行过程中受到重力的影响,经过射击目标所在平面 W 形成着弹点

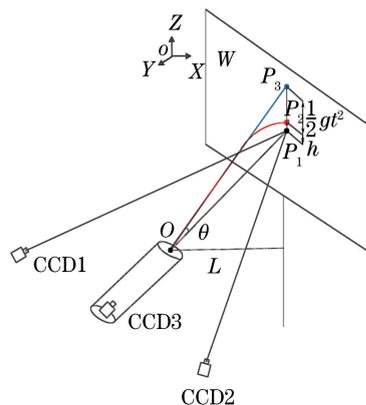


图 1 基于改进最小二乘法的火炮跳角测量示意图
Fig. 1 Schematic of gun's jump angle measurement based on improved least-squares

P_2 , 计算得出炮弹初速度矢量的方向 $\overrightarrow{OP_3}$, 然后求解炮弹初速度矢量与发射前火炮身管轴线之间的夹角 θ , 即为火炮的跳角测量值。火炮跳角计算过程如图 2 所示。

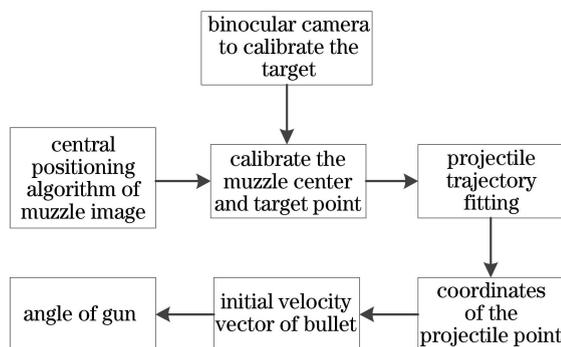


图 2 基于改进最小二乘法的火炮跳角计算流程
Fig. 2 Calculation process of gun's jump angle based on improved least-squares

在火炮跳角测量数据处理中,最主要的两个参数是火炮发射前身管轴线的方向 $\overrightarrow{OP_1}$ 和火炮发射后初速度矢量的方向 $\overrightarrow{OP_3}$ 。其中 $\overrightarrow{OP_1}$ 主要取决于炮口中心位置和射击目标的校准。炮口中心位置由火炮炮筒中的 CCD3 相机拍摄炮口图像,然后经过圆拟合中心定位算法得出。故炮口中心位置的准确性主要取决于炮口图像中心定位算法的精确性,因而研究的关键技术之一就是高精度的炮口图像中心定位算法。

3 炮口图像中心定位算法

3.1 最小二乘圆拟合算法

常规的炮口图像中心定位算法是基于最小二乘圆拟合原理(最小残差平方和)来逼近炮筒出炮口的轮廓^[6-7],然后求解炮口图像的中心位置。圆的参数

方程为

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

取残差为

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

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

残差的平方和为

$$Q = \sum_{i \in E} \epsilon_i^2 =$$

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

根据最小二乘原理,可知

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

即

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2] (-2)(x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2] (-2)(y_i - b) = 0. \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2] (-2)r = 0 \end{cases} \quad (5)$$

化简得

$$\begin{cases} a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b - r^2 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = 0 \\ \bar{x}a^2 - 2\bar{x}^2a + \bar{x}b^2 - 2\bar{x}y\bar{b} - \bar{x}r^2 + \bar{x}^3 + \bar{x}y^2 = 0, \\ \bar{y}a^2 - 2\bar{x}y\bar{a} + \bar{y}b^2 - 2\bar{y}^2b - \bar{y}r^2 + \bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}^3 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中各种参数可以表示为

$$\overline{x^m y^n} = \frac{\sum_{i \in E} x_i^m y_i^n}{\sum_{i \in E} 1}, \quad (7)$$

式中: m, n 为(6)式中 x, y 的指数。由(1)~(7)式可以推算出参数 a, b, r 的表达式,即圆参数为

$$\begin{cases} a = \frac{(\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}y^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{y}^3)(\bar{x}y - \bar{x}y)}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}y - \bar{x}y)^2} \\ b = \frac{(\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2\bar{y})(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{y}^2\bar{x} - \bar{x}^3)(\bar{x}y - \bar{x}y)}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}y - \bar{x}y)^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{cases} \quad (8)$$

根据计算过程,可以看出基于最小二乘原理的圆拟合算法形式复杂,但是基于此算法的炮口中心定位算法仅需对边界点循环 1 次就可计算出各参数,半径 r 也只需计算 1 次就可获得。最小二乘圆拟合算法的结果取决于图像目标特征边界分布点的提取,即边界分布点可直接影响该算法的精度^[8],一般通过迭代过程减少拟合点的误差。

3.2 半径差累积最小的圆拟合算法

为缩小最小二乘圆拟合算法目标函数的复杂度,减少偏导数的计算,提出一种基于半径差累积最小的圆拟合算法。该算法利用圆的特殊属性,即任意两个半径的误差值为零。计算过程中涉及 3 个参数,圆的中心 (a, b) 和半径 r 。因此只需将参数设置

为圆的中心 (a, b) ,在拟合过程中,如果任意 2 个炮口图像边界分布点与中心点之间距离差的总和最小,可以将参数值 (a, b) 看作拟合圆的圆心。

根据该方法,可以得到目标函数为

$$I = \min \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i}^n r_i^2 - r_j^2, \quad (9)$$

式中: r_i, r_j 为拟合半径。将圆上的点设为 (x_i, y_i) $\{i=1, 2, 3, \dots, n\}$, (9)式展开为

$$I = \min \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i}^n [(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 - (a - x_j)^2 - (b - y_j)^2]^2. \quad (10)$$

目标函数为多参函数,因此存在最小值的必要条件是偏导数为零,即

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial a} = 2 \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i}^n [\bar{x}_i^2 - \bar{x}_j^2 + \bar{y}_i^2 - \bar{y}_j^2 + 2a(\bar{x}_j - \bar{x}_i) + 2b(\bar{y}_j - \bar{y}_i)] (\bar{x}_j - \bar{x}_i) = 0 \\ \frac{\partial I}{\partial b} = 2 \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i}^n [\bar{x}_i^2 - \bar{x}_j^2 + \bar{y}_i^2 - \bar{y}_j^2 + 2a(\bar{x}_j - \bar{x}_i) + 2b(\bar{y}_j - \bar{y}_i)] (\bar{y}_j - \bar{y}_i) = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

式中各参数可以表示为

$$\overline{x^p y^q} = \sum_{i=1}^n x_i^p y_i^q / n, \quad (12)$$

式中: p, q 为(11)式中 x, y 的指数。求解得到中心点 (a, b) , 并计算 (a, b) 和圆上点之间的距离 r_i , 得到距离的平均值, 从而求得半径为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a - \bar{x}_i)^2 + (b - \bar{y}_i)^2}{n}, R > 0. \quad (13)$$

采用 DALSA 公司 1M60 相机采集炮口图像, 将 CCD 相机装置放入火炮炮筒中, 使该 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 pixel × 1024 pixel。在实验中, 用最小二乘圆拟合算法和半径差累积最小圆拟合算法分别对炮口图像中心进行定位, 图像处理结果如图 3 所示。

经比较图 3(b) 与图 3(c), 可以看出最小二乘圆拟合算法的拟合圆图案明显大于半径差累积最小算法的拟合圆图案, 最小二乘圆拟合算法的中心偏差大于半径差累积最小算法的中心偏差。采集 8 组炮口图像, 通过 2 种算法对图像进行中心定位算法处理, 实际处理结果如表 1 所示。理想的炮口图像中心像素坐标设定值为 (511.00, 511.00), 最小二乘圆拟合算法的中心坐标为 (511.47, 511.40), 半径差累积最小算法的中心坐标为 (511.10, 511.15)。

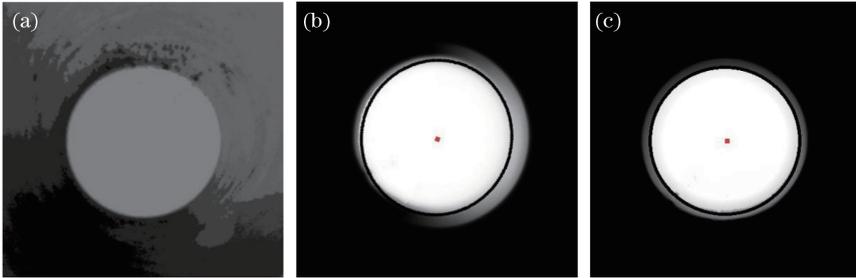


图 3 炮口图像中心拟合算法对比图。(a)原始图;(b)最小二乘圆拟合算法结果;(c)半径差累积最小算法结果
Fig. 3 Comparison of circle center fitting algorithms for muzzle images. (a) Original image; (b) result of least squares circle fitting algorithm; (c) result of radius difference accumulation minimization algorithm

表 1 2 种炮口图像中心算法计算结果对比分析

Table 1 Comparison of calculation results of the two center positioning algorithms for muzzle images

Measurement No.		1	2	3	4	5	6	7	8
Algorithm proposed	x /pixel	511.15	511.05	511.05	511.15	510.90	511.10	511.15	510.90
	y /pixel	511.20	511.15	511.20	510.95	511.20	511.05	510.85	511.20
	Δx /pixel	0.15	0.05	0.05	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10
	Δy /pixel	0.20	0.15	0.20	0.05	0.20	0.05	0.15	0.20
Least squares algorithm	x /pixel	511.55	512.00	511.65	511.40	511.20	511.40	511.60	511.30
	y /pixel	511.80	511.45	511.20	511.85	511.30	511.65	511.30	511.65
	Δx /pixel	0.55	1.00	0.35	0.40	0.20	0.40	0.60	0.30
	Δy /pixel	0.80	0.45	0.20	0.15	0.30	0.65	0.30	0.35

图 4 所示为 2 种算法的坐标误差对比。从图 4 的测试结果可以看出, 最小二乘圆拟合算法通过单个边界点拟合, 拟合计算出的炮口中心坐标的波动较大, 表明单个边界点对最终测量结果的影响显而

易见是随机性的; 半径差累积最小算法通过全部边界点累积计算拟合, 因而对拟合圆中心位置的随机波动的影响最小, 该算法得到的炮口中心与理想中心之间的误差远小于 0.15 pixel, 明显低于最小二乘

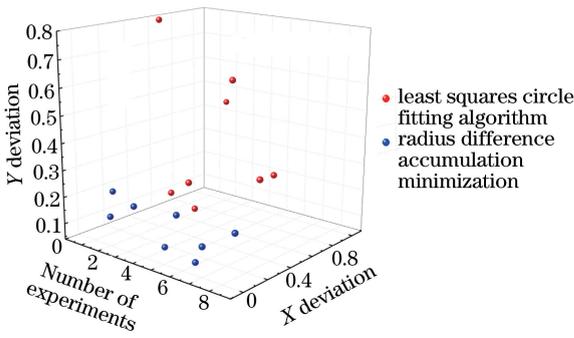


图4 坐标误差对比

Fig. 4 Comparison of coordinates error

圆拟合算法,具有较高的精度。

4 火炮跳角的计算与分析

如图1所示,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,建立以火炮射击目标所在平面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轴方向为Z轴的三维坐标系^[9-10]。双目相机(摄像机 CCD1 和摄像机 CCD2)用来标定火炮射击目标的位置 P_1 ,摄像机 CCD3 用于对准炮口中心位置 O 和火炮射击目标 P_1 。由中心定位算法得炮口图像中心位置 O 坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,由相机标定可得火炮射击目标 P_1 坐标为 (x_1, y_1, z_1) 。炮口中心位置 O 和火炮射击目标 P_1 对准后,火炮发射炮弹,拟合弹丸运行轨迹,弹丸在飞行过程中受到重力的影响在W平面形成着弹点 P_2, P_3 是火炮初速度方向到达W平

面所在交点,计算得着弹点 P_2 坐标为 $(x_2, y_2, z_1 + h)$,则 P_3 坐标为 $(x_2, y_2, z_1 + h + gt^2/2)$,其中 t 为弹丸从炮口至着弹点的飞行时间, $gt^2/2$ 为受重力影响下降的距离。

火炮初速度矢量的方向 $\overrightarrow{OP_3} = (x_2 - x_0, y_2 - y_0, z_1 + h + gt^2/2 - z_0)$,火炮发射前炮口身管轴线矢量方向为 $\overrightarrow{OP_1} = (x_1 - x_0, y_1 - y_0, z_1 - z_0)$ 。则由跳角定义得 $\cos \theta = \frac{\overrightarrow{OP_1} \cdot \overrightarrow{OP_3}}{|\overrightarrow{OP_1}| |\overrightarrow{OP_3}|}$,故 $\theta =$

$$\left| \arccos \frac{\overrightarrow{OP_1} \cdot \overrightarrow{OP_3}}{|\overrightarrow{OP_1}| |\overrightarrow{OP_3}|} \right|。$$

测试大口径炮弹跳角,对比炮口中心位置标准坐标与2种不同算法得到的炮口中心位置坐标计算得到的跳角测量值(忽略同一图像炮弹初速度矢量的误差,即同一图像使用相同炮弹初速度矢量参与运算,而非同一图像的炮弹初速度矢量不同),根据表1中8组图像数据计算得到的结果如表2所示。由表2可以看出,对于同一射击目标位置,2种不同的炮口图像中心定位算法测得的跳角结果不同,炮口中心位置的精确度对跳角的最终测量结果有很大的影响。如图5所示,最小二乘圆拟合算法所得跳角大小误差高于本文提出的算法,半径差累积最小算法所得跳角大小与理想跳角大小相比误差在0.5'之内。可见,炮口中心定位算法结果越稳定、越精准,则跳角测量结果的误差越小,测量结果的波动性(方差)越小,测量结果的可信度越高。

表2 跳角计算结果对比分析

Table 2 Comparison of jump angle calculation results

Measurement No.			1	2	3	4	5	6	7	8
Ideal values	Jump angle / (')	θ	5.32	5.54	5.25	5.26	5.92	5.17	5.91	5.62
Algorithm proposed	Center deviation / pixel	Δx	0.15	0.05	0.05	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10
	Jump angle / (')	Δy	0.20	0.15	0.20	0.05	0.20	0.05	0.15	0.20
Least squares algorithm	Jump angle / (')	θ	5.46	5.25	5.35	5.40	5.43	5.10	5.78	5.71
	Center deviation / pixel	Δx	0.55	1.00	0.35	0.40	0.20	0.40	0.60	0.30
	Jump angle / (')	Δy	0.80	0.45	0.20	0.15	0.30	0.65	0.30	0.35
	Jump angle / (')	θ	6.23	6.26	5.68	4.83	6.63	6.03	5.14	5.12

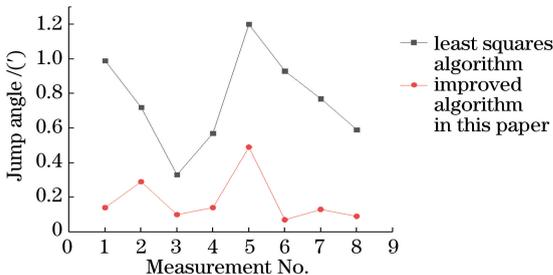


图5 跳角误差对比图

Fig. 5 Comparison of jump angle errors

5 结 论

基于改进圆拟合算法的火炮跳角测量方法与以往的人工测量方法相比,测量效率高,误差小,范围广,准确度高,是一种新型可操作的火炮跳角测量方法。本文重点研究图像中心定位算法,采用对最小二乘圆拟合算法改进的半径差累积最小的圆拟合算法,不仅使得拟合圆过程的计算复杂度降低,还提高了图像中心定位算法的精度。从测量结果来看,与

标准位置相比,半径差累积最小的圆拟合算法最终测量跳角误差范围在 $0.5'$ 之内;与最小二乘算法所得跳角相比,测量结果更稳定、更精准,测量误差更小。

参 考 文 献

- [1] Tu J C, Xue B W, Zan B X. Study on effect of aftereffect of artillery on projectile with jump angle [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(2): 76-79.
涂炯灿, 薛百文, 咎博勋. 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] Mi L C, Liu M, Gao S Z. Mathematic description and test analysis on launched projectile muzzle velocity jumping angle during howitzer firing[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013, 34(1): 1-3.
米粮川, 刘敏, 高树滋. 火炮发射时弹丸初速跳角数学描述及试验分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(1): 1-3.
- [3] Wang B Y, Gao X K, Li B H, et al. Review of measurement methods for jump angle of gun [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013, 27(4): 294-299.
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.
- [4] Lu R R, Sun H B, Fu S F, et al. Point cloud registration based satellite motion parameter identification method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141503.
鲁荣荣, 孙海波, 付双飞, 等. 一种基于点云配准的卫星运动参数辨识方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141503.
- [5] Zhou P, Wang X Q, Huang Q Y, et al. Laser spot center detection based on improved circled fitting algorithm [C] // 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), May 25-27, 2018, Xi'an, China. New York: IEEE, 2018: 316-319.
- [6] Wu Z K, Li G Q, Wang W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(3): 346-350.
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.
- [7] Wang Z Z, Xu R H, Hu B L. Algorithm of semicircular laser spot detection based on circle fitting [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8878: 88782Z.
- [8] Liu D, Wang Y T, 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.
- [9] Cheng L, Wu G P, Yao W. Camera calibration in visual navigation of inspection robot on site [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(10): 1082-1091.
程立, 吴功平, 姚为. 巡线机器人视觉导航中的摄像机现场标定 [J]. 光电子 • 激光, 2018, 29(10): 1082-1091.
- [10] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, et al. Binocular camera calibration based on collinear vector and plane homography [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1115006.
邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1115006.