

基于身管的指向精度测量技术研究

孙恩光, 宋玉贵, 张子月, 刘勇, 田双文

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 武器装备的动态性能是靶场鉴定、定型试验评价系统的重要技术指标之一, 目前高速转管火炮及武器是新型的现代化武器; 一个合格的身管武器在投入使用前都需要进行动态性能的测试, 合膛身管在预定击发瞬间的实际指向与预定射向的偏离角度是测试身管武器动态性能的重要技术指标; 为了解决转管速射武器以及带有稳定功能的炮塔武器在击发瞬间, 身管的指向精度及其稳定性的测试难题, 提出一种采用激光棱镜配合光斑图像处理的方法来解决这个问题; 详细介绍了该方法的身管指向测试原理及结构组成, 通过建立身管指向的数学模型, 深入分析了该结构的测量原理, 经过搭建模拟实验装置并进行实验, 在分析实验数据之后, 计算出实验误差范围在 3% 以内, 证明了该方法的可行性。

关键词: 身管指向; 相机标定; 光斑; 中心定位; 指向精度

Research on Pointing Accuracy Measurement Technology Based on Barrel

SUN Enguang, SONG Yuguai, ZHANG Ziyue, LIU Yong, TIAN Shuangwen

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The dynamic performance of weapons is one of the important technical indicators of shooting range appraisal and type test evaluation system. At present, high-speed rotary artillery and weapons are new modern weapons; A qualified barrel weapon needs to be tested for dynamic performance before it is put into use, the deviation angle between the actual direction of the closed barrel at the scheduled firing moment and the predetermined firing direction is an important technical indicator for testing the dynamic performance of the barrel weapon. In order to solve the test problem that there are the pointing accuracy and stability in the tube fire weapon and turret weapon with a stabilization function at the firing moment, a measurement method using laser prism aiming and spot image processing is proposed to solve this problem; The test principle and structural composition of the barrel pointing of this method are introduced in detail. The mathematical model is established to analyze the measurement principle of the structure in depth. Through building a simulated experimental device and conducting the experiment, after analyzing the experimental data, the experimental error reaches within 3%, which proves the feasibility of the method.

Keywords: tube pointing; camera calibration; light spot; center positioning; pointing accuracy

0 引言

武器装备动态性能是靶场鉴定、定型试验评定系统的重要战术技术指标之一^[1]。现代武器均装备先进的火控系统, 其动态性能指标是射击试验前需要检查和考核的主要试验项目^[2]。为了对武器装备进行正确考核与评定, 研制满足现代测试需求的武器装备动态跟踪精度测量系统是十分必要的。高速转管武器比如: 加特林机枪、转管火炮。这些武器的杀伤力是特别大的, 可以给目标造成很严重的毁灭打击。一个合格的转管武器能否被投入使用, 取决于对其动态性能的测试, 转管武器的身管指向精度则是重要的技术指标。对于不同的单管、多管、转管武器, 身管的动态指向精度的测量是现代武器效能评估的重要内容, 如炮塔武器、转管武器的身管动态指向精度, 就是衡量该类武器性能的重要指标之一。所谓动态指向精度是指转管武器在正常转动且非实弹击发条件下, 击发时刻, 合膛身管

在预定击发瞬间的实际指向与预定射向的偏离角度。国内采用的身管指向测量方法有 CCD+坐标靶、零飞试验仪、CCD+电光源、激光器+PSD 和激光陀螺等多种方法^[3], 这些方法的关键在于是在测试时, 需要在火炮身管上添加测试装备从而进行测试, 在测试过程中需要花费大量人力、较为繁琐, 操作过程耗时费力、易出错^[3]。双经纬仪交汇方法^[4]是一种非接触式的测量方法, 它在不同的角度进行布局实验会获得不同的实验结果, 这种方法操作过程比较繁琐且实验误差较大, 并且不能满足快速测试的要求^[5-6], 而且具有一定的局限性, 不能适用于其他武器身管的动态指向精度测试^[9-12]。

针对上述问题, 本文基于零飞仪的测试方法提出一种新型的身管指向测试测量方法, 旨在解决转管速射武器以及带有稳定功能的炮塔武器在击发瞬间, 身管的指向精度及其稳定性的测试难题^[13-16]。该方法采用激光棱镜配合光斑图像处理的工作原理来解决身管在转动时动态指向精度

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-07-29。

作者简介: 孙恩光(1998-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事靶场光电仪器设计与测试方向的研究。

宋玉贵(1971-), 男, 河南西平人, 硕士, 副教授, 主要从事靶场光电仪器方向的研究。

引用格式: 孙恩光, 宋玉贵, 张子月, 等. 基于身管的指向精度测量技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 55-61.

的问题。根据系统工作原理，建立数学模型，搭建实验装置，通过模拟实验得出实验数据，并分析误差，验证该方法的正确性与可行性^[17-20]。

1 身管动态指向精度测试原理

本文研究的主要工作是探索一种测试测量方法来解决在车间调校转管武器时，它的身管在静止或转动状态下各个身管的指向精度。所谓动态指向精度是指转管武器在正常转动且非实弹击发条件下，击发时刻，合膛身管的实际指向与预定射向的偏离角度。拟采用激光棱镜配合光斑图像处理的原理实现一套测试身管动态指向精度的自动测试装置^[21-23]。

在测试时中，炮管偏转角度几何关系如图 1 所示：图中的点 O 是激光指示器发出激光光束的位置， AC 是激光光束所照射的靶面， OA 与 OB 分别是实际指向位置及预期指向位置。求身管动态指向精度即求解身管激光器击发时刻的偏转角度，在数学上我们可以将其转化为求解光斑图像在靶面上的平移量（即为误差偏移量）。

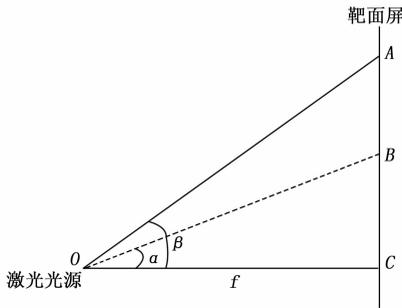


图 1 身管指向几何关系图

测试系统的几何关系可由式 (1) 和 (2) 得到：

$$\angle \alpha = \tan \frac{BC}{f} \tag{1}$$

$$\angle \beta = \tan \frac{AC}{f} \tag{2}$$

则实际偏转角度和实际偏移量分别为式 (3) 和 (4)：

$$\angle AOB = \beta - \alpha \tag{3}$$

$$AB = AC - BC \tag{4}$$

光斑在靶面屏上的位置如图 2 所示。

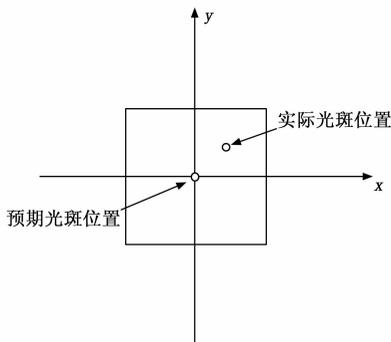


图 2 光斑位置示意图

假设预期光斑位置的坐标为 (x_0, y_0) ，实际光斑位置的坐标为 (x_1, y_1) 。则身管的指向精度可以转换为计算光斑在靶面屏上的位移量，如式 (5)：

$$s = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \tag{5}$$

身管动态指向精度测试原理如图 3 所示，整个系统的工作原理是在武器平台的每个身管内部安装固定的激光指示器，然后将测试装置放置于一定的距离。测试装置由靶面屏和相机封装而成，在靶面屏前面可以根据测试环境安装滤光片用于去除在测试时其他光线的干扰，激光指示器发出一束激光照射在靶面屏上，相机通过采集图像发送给计算机进行图像处理，最后得出光斑的中心坐标，然后分析实验数据并的实验结果，达到了测试身管动态指向精度的目的。

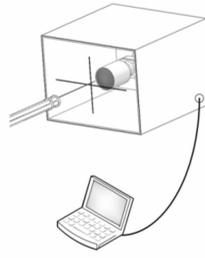


图 3 测试系统原理图

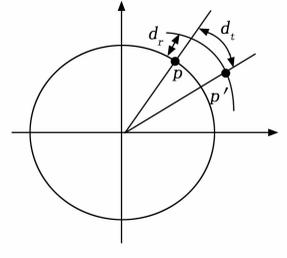


图 4 畸变

2 相机标定

在使用相机获取光斑图像时，由于使用的是光学镜头，所以在成像过程中可能会导致图像产生畸变，进而降低光斑中心检测的准确性。因此，为了后续获得更加准确的光斑中心坐标来验证测试方法的可行性与准确性，在此之前必须进行相机标定处理^[10]，去除镜头畸变造成的干扰^[24-26]。

镜头畸变主要可以分为切向畸变以及径向畸变^[11]，如图 4 所示，图中 d_r 为切向畸变， d_t 为径向畸变， p, p' 分别为理想成像点和实际成像点。

2.1 切向畸变

切向畸变主要是因为透镜与感光元件处于非平行位置，导致实际像素点相对理想像素点发生切向偏移，从而发生的角度变换。一般通过式 (6) 进行切向畸变校正：

$$\begin{cases} u' = 2p_1uw + p_2(r^2 + 2u^2) \\ v' = 2p_2vw + p_1(r^2 + 2v^2) \end{cases} \tag{6}$$

式中， (u, v) 为图像畸变后的像素坐标， (u', v') 为校正后像素坐标， p_1, p_2 为切向畸变的系数， r 表示该点与像素中心的欧式距离。

2.2 径向畸变

径向畸变一般由镜面形状引起，若实际像素点更加偏向镜头中心，则可称为枕型畸变，若实际像素点更加偏离镜头中心，则称为桶型畸变^[12]。径向畸变可以通过式 (7) 进行校正：

$$\begin{cases} u' = u(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\ v' = v(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \end{cases} \tag{7}$$

式中, k_1 、 k_2 、 k_3 代表径向畸变系数。

2.3 相机标定实验

本实验是基于 Matlab 工具箱实现相机标定实验^[13]。所使用的参照物为 9×7 的棋盘格图像, 图像中任意一棋盘的大小为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。多次变换棋盘格在世界坐标系中的位置^[21], 采集 25 张棋盘格图像, 图像所处位置如图 5 所示。使用传统标定法进行相机标定^[27], 获取棋盘格图像中的角点, 如图 6 所示。相机标定误差允许范围在 $0.1 \sim 0.5$ 左右, 实验结果所得的平均重投影误差为 0.32 , 如图 7 所示。

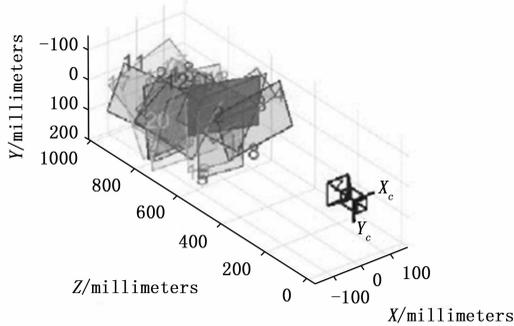


图 5 棋盘格图像位置

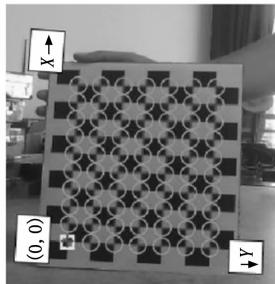


图 6 角点提取

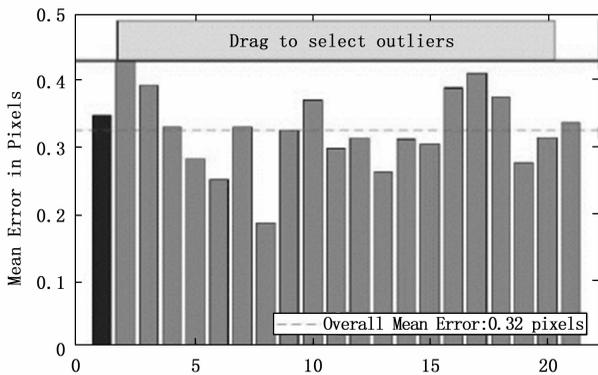


图 7 重投影误差示意图

相机标定中的参数结果如表 1 所示。

$[u_0, v_0]$ 是相机的光学中心, $f_x = f * s_x$, $f_y = f * s_y$, f 是相机的焦距, 以 mm 为单位, $[s_x, s_y]$ 代表在 (x, y) 方向上每毫米的像素量。 s 是倾斜参数, 当 x 轴和 y 轴完全

垂直时, $s=0$ 。 k_1, k_2, k_3 是镜头的径向畸变系数。 p_1, p_2 是镜头的切向畸变系数。

表 1 相机标定参数结果

f_x	1 249.9
f_y	939.5
u_0	629.1
v_0	355.8
k_1	0.037 8
k_2	0.173 1
k_3	-4.226 1
p_1	-0.005 1
p_2	-0.001 5

将上述计算出的切向畸变和径向畸变系数代入校正方程。对光斑中心检测采集的激光光斑图像进行校正, 避免因镜头畸变导致的光斑位置变化, 从而提高激光光斑中心检测精度。

3 激光光斑图像处理

3.1 图像预处理

在激光光斑图像中, 不同的颜色代表着不同的光斑能量强度, 代表着各个像素点的特征信息, 将彩色光斑图像转化为灰度光斑图像, 可以在保留光斑整体信息和各点特征的基础上大幅降低算法运算量。

图像灰度化一般通过如下 3 种方法实现:

1) 平均值法: 将原始图像中像素点的 R 、 G 、 B 三个分量的数值进行算术平均, 平均结果即为该像素点的灰度值。如式 (8) 所示:

$$Gray = (R + G + B) / 3 \quad (8)$$

2) 最大值法: 将像素点的 R 、 G 、 B 三个分量的数值进行比较, 取最大值作为该点的灰度值。如式 (9) 所示:

$$Gray = \max(R, G, B) \quad (9)$$

3) 加权平均法: 因为人眼对于红绿蓝 3 种颜色的敏感程度是有区别的, 所以可以对图像中的 R 、 G 、 B 分量分别赋予一定的权重, 通常情况下, 为求灰度效果最好, 红绿蓝 3 种颜色的权重一般设定为 0.299 、 0.587 、 0.114 。如式 (10) 所示:

$$Gray = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (10)$$

激光光斑图像灰度化^[25]的结果如图 8 所示, 图 (a)、(b)、(c)、分别为 3 种图像灰度化方法处理后的灰度图像。对比图像结果可以发现, 平均值法和最大值法虽然完成了图像的灰度化处理, 降低了整体的运算量, 但是在这过程中丢失了光斑图像的部分信息, 将对后续图像处理中产生一定的影响, 因此选取加权平均法进行图像灰度化处理, 该方法在处理后的仍能反映光斑的亮度和色度特征。

观察图 8 (c), 可以发现激光光斑在整幅图像中只占据较小的区域。因此, 在光斑外围的大部分背景图像属于无效信息, 只会对光斑中心检测的精度和速度产生干扰。使用图像裁剪的方法对原始图像进行处理, 即设定一个大小

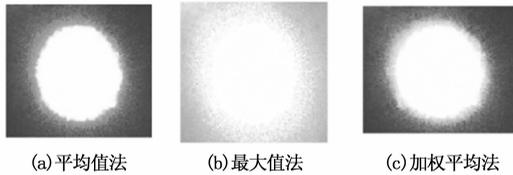


图 8 光斑图像灰度化结果

略大于激光光斑的区域，然后从原始图像中将该区域裁剪出来。图像裁剪的优势在于后续的图像处理工作不用再对整幅图像进行，仅需对目标光斑进行重点检测，去除大量无用信息的同时提升了运算速度。

计算光斑图像的灰度直方图^[4]，如图 9 所示。结合图 8 (c) 可以发现，图像中的光斑像素灰度值较大且大量集中，针对这一特点，使用迭代法进行图像二值化的阈值计算。首先记录图像中的灰度最大值及最小值，获得初始阈值：

$$T_0 = \frac{(u_1 + u_2)}{2} \quad (11)$$

根据初始阈值将图像分为两个部分，分别求出两部分的灰度均值 u_3 、 u_4 ，并得到新的阈值：

$$T_1 = \frac{(u_3 + u_4)}{2} \quad (12)$$

重复上述计算过程，直至阈值不再变化。

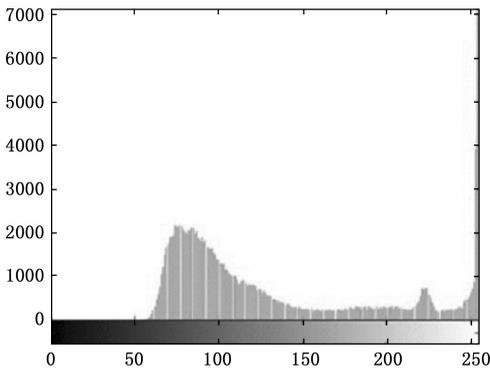


图 9 灰度直方图

求得的阈值为 155，根据所求阈值，得到二值化后的光斑图像，如图 10 所示。



图 10 二值化后的光斑图像

3.2 图像滤波

图像中对于最终检测目标无效的干扰信息都可以被称为图像噪声，它会模糊图像中的有效信息，难以识别，对后续的图像处理环节造成一定的影响，降低中心检测的准

确性。因此需要对原始图像进行滤波平滑处理，提高图像质量。图像噪声产生的主要原因有：

- 1) 相机的传输噪声、成像噪声等；
- 2) 激光照射过程中，光生电荷的移动也会产生噪声；
- 3) 外界环境中的灯光、太阳光的影响，空气中漂浮的粉尘颗粒等。

在激光光斑图像中，高斯噪声和椒盐噪声是比较常见的噪声类型。高斯噪声一般出现在图像采集阶段，由外部环境的光线、温度而引起；椒盐噪声的出现则通常是因为图像受到剧烈的干扰。

了解到了目前常用的滤波方法有高斯滤波、均值滤波、中值滤波和双边滤波。

高斯滤波是一种线性平滑滤波，适用于消除高斯噪声，广泛应用于图像处理的减噪过程。通俗的讲，高斯滤波就是对整幅图像进行加权平均的过程，每一个像素点的值，都由其本身和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到。高斯滤波的具体操作是：用一个模板（或称卷积、掩模）扫描图像中的每一个像素，用模板确定的邻域内像素的加权平均灰度值去替代模板中心像素点的值。

均值滤波是一种最为简单的平滑线性滤波算法。它将均值滤波模板与含有噪声的原始图像进行卷积运算，计算出像素点的邻域内的灰度值均值，然后用计算出的灰度值均值代替该像素点的灰度值。

中值滤波是根据排列统计理论，对图像进行非线性滤波的平滑技术。它的基本思想是对某一像素点的邻域灰度值进行排序，选用中值替代该点的灰度值。由于该方法并不依赖图像中与典型值相差较大的噪声点，计算后灰度值更接近于真实灰度值，所以对于图像中尖锐的噪声能够起到较好的抑制作用。

双边滤波是由美国斯坦福大学的 C. Tomasi 和 R. Manduchi 首次提出的，它是一种非线性的滤波算法，是结合图像空间邻近度和灰度相似度的一种折中处理。双边滤波的基本原理是获得一个与空间欧式距离相关的高斯函数和一个与像素灰度差值有关的高斯函数的乘积，所得乘积即为所需的双边滤波模板。

为了得出哪一种方法比较好，进行了它们之间滤波效果的对比。在原图像添加了 0.05% 的椒盐噪声，然后用不同的方法对其进行去噪处理。效果如图 11 所示。

在主观评价方面，通过人眼视觉效果比对，发现中值滤波的效果是较好的。在客观评价方面，计算不同滤波方法得出的信噪比数据进行对比。如表 2 所示。

表 2 信噪比结果

	SNR
高斯滤波	24.238 8
均值滤波	25.944 5
中值滤波	29.126 2
双边滤波	14.375 9

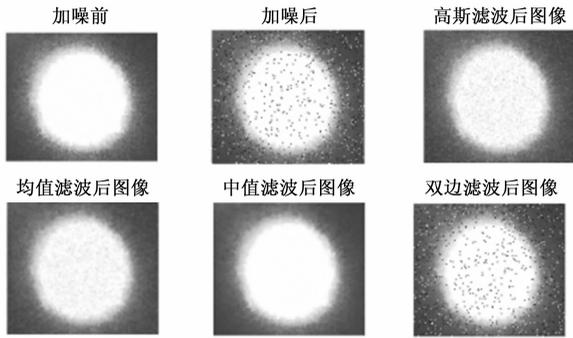


图 11 图像不同滤波效果对比

通过表 2 可以发现, 中值滤波的信噪比最高。因此综合考虑, 选择去噪效果相对较好得中值滤波进行去噪处理。

3.3 图像边缘检测

边缘检测是图像处理与计算机视觉中的重要技术之一。其目的是检测识别出图像中亮度变化剧烈的像素点构成的集合。图像边缘的正确检测对于分析图像中的内容、实现图像中物体的分割、定位等具有重要的作用。边缘检测大大减少了源图像的数据量, 剔除了与目标不相干的信息, 保留了图像重要的结构属性。

分别使用不同的经典边缘检测算子进行光斑边缘检测, 图 12 为光斑图像边缘检测结果。

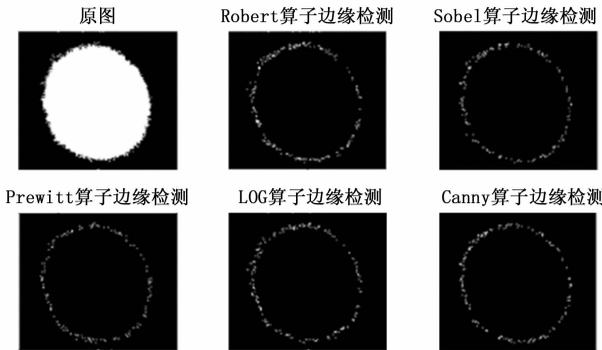


图 12 激光光斑边缘检测

对比实验结果图可以发现, 当激光光斑图像处于较理想状态时, 几种经典边缘检测算子都可以较好的检测出光斑边缘, 但是 Roberts 算子, Sobel 算子和 Prewitt 算子的结果图中出现了少量的光斑散点; Log 算子和 Canny 算子的抗噪能力明显优于上述 3 种算子。除去人眼视觉的主观感受, 进一步比较边缘检测效果, 采取一种边缘检测算子的评估方法, 即计算边缘像素点的个数 (A)、4 连通成分数 (B)、8 连通成分数 (C) 及它们之间的比值, 并对这些参数进行比较和评估, 如表 3 所示。

表 3 中, C/A 的值代表着图像边缘的连续性, C/B 的值代表图像边缘单像素占比, 这两组比值越小, 代表边缘检测算子在边缘连续性、单一性上效果越好。由表 3 及图 12 可知, Log 算子、Canny 算子在理想光斑的检测结果中

边缘连续且单一, 能够准确定位光斑边缘像素点。

表 3 光斑边缘检测评估表

	A	B	C	$(C/A)/\%$	$(C/B)/\%$
Roberts 算子	336	5	5	1.48	100
Sobel 算子	238	103	7	2.94	6.79
Prewitt 算子	234	100	6	2.56	6
Log 算子	233	101	2	0.85	1.98
Canny 算子	298	33	2	0.67	6.06

4 光斑中心定位算法

在工程应用中, 若激光器与相机无法保持在同一轴线上, 相机所拍摄的激光光斑会出现一定的形变, 形成椭圆光斑而非理想的正圆光斑, 因此基于最小二乘法的椭圆拟合算法^[15-19]也是激光光斑中心检测^[23-24]的一种常用方法, 椭圆的一般表达式为:

$$f(x, y) = x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E, A^2 - 4B < 0 \quad (13)$$

将其转化为参数方程, 利用椭圆的中心点、长轴、短轴及偏转角等参数直观表示椭圆。其几何意义如图 13 所示。

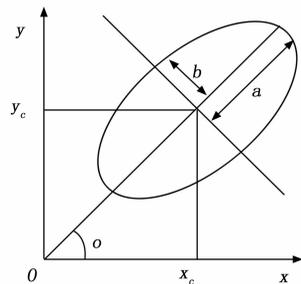


图 13 平面椭圆

两种椭圆方程可以通过以下公式进行转换:

$$x_c = \frac{2BC - AD}{A^2 - 4B} \quad (14)$$

$$y_c = \frac{2D - AD}{A^2 - 4B} \quad (15)$$

$$a = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B + 1 - \sqrt{A^2 + (1 - B)^2})}} \quad (16)$$

$$b = \sqrt{\frac{2(ACD - BC^2 - D^2 + 4BE - A^2E)}{(A^2 - 4B)(B + 1 + \sqrt{A^2 + (1 - B)^2})}} \quad (17)$$

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{a^2 - b^2 B}{a^2 B - b^2}} \quad (18)$$

式中, (x_c, y_c) 代表椭圆的中心坐标, a 为椭圆的长半轴, b 为短半轴, θ 为长轴偏转角。

基于最小二乘的椭圆拟合法^[26]的基本思想为: 根据已知的边缘像素点信息, 使每个点到待拟合椭圆的距离平方和最小, 不断逼近椭圆曲线, 从而获取一组理想的椭圆参数。在式 (13) 中, 椭圆的一般方程包含 A、B、C、D、E 五个未知数, 因此至少需要 5 个边缘像素点才能对其进行

求解。根据最小二乘原理，当边缘像素点个数 $N \geq 5$ 时，可得目标函数：

$$F(A, B, C, D, E) = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + Ax_i y_i + By_i^2 + Cx_i + Dy_i + E)^2 \quad (19)$$

通过求取目标函数的最小值来确定参数 A 、 B 、 C 、 D 、 E ，根据极值定理，当目标函数中的参数偏导数为 0 时，目标函数的值最小，即：

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{\partial F}{\partial C} = \frac{\partial F}{\partial D} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0 \quad (20)$$

通过 $\frac{\partial F}{\partial A}$ 进行举例：

$$\frac{\partial F}{\partial A} = \frac{\partial (\sum_{i=1}^N (x_i^2 + Ax_i y_i + By_i^2 + Cx_i + Dy_i + E)^2)}{\partial A} = 0 \quad (21)$$

将其转化为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} \sum x^2 y^2 & \sum xy^3 & \sum x^2 y & \sum xy^2 & \sum xy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum -x^2 y \end{bmatrix} \quad (22)$$

代入另外 4 组偏导数：

$$\begin{bmatrix} \sum x^2 y^2 & \sum xy^3 & \sum x^2 y & \sum xy^2 & \sum xy \\ \sum xy^3 & \sum y^4 & \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum y^3 \\ \sum x^2 y & \sum xy^2 & \sum x^3 & \sum y^3 & \sum xy \\ \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum xy & \sum y^2 & \sum x & \sum y & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x^2 y \\ \sum x^2 y^2 \\ \sum x^3 \\ \sum x^2 y \\ \sum x^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

对上式线性方差求解，确定椭圆参数值，进而可以获得椭圆的中心坐标、长轴短轴等数据，椭圆中心即为所求激光光斑中心。

基于最小二乘的椭圆拟合算法在求解光斑中心坐标的过程中，只需要对光斑边缘点遍历一次，时间复杂度较低，计算速度快，且计算出的结果精度较高。

光斑经过椭圆拟合算法求得其中心坐标，如图 14 所示。

5 实验数据误差分析

为了验证身管动态指向精度测试方法的可行性和正确性，搭建了模拟实验装置，具体实验步骤：

- 1) 固定相机和靶面屏的位置；

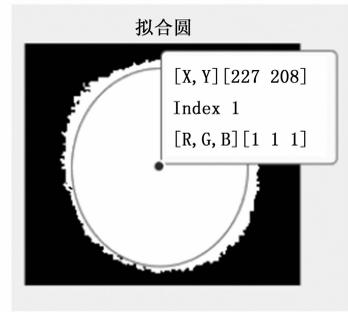


图 14 光斑拟合圆中心定位

- 2) 将武器平台固定于靶面屏的前方 100~200 m 内，在每个身管内部安装固定 650 nm 的激光指示器；

- 3) 依次转动不同的身管，记录在击发时刻激光指示器在靶面屏照射的光斑图像；

- 4) 对所采集到的光斑图像进行中心定位，并分析不同光斑中心坐标的位置，计算实验误差；

- 5) 重复多组实验，获取多组图片，记录在不同距离、不同角度情况下的光斑中心坐标。

表 4 不同距离的光斑中心检测结果

身管编号	100 m	150 m	200 m
1	(225,208)	(223,207)	(226,209)
2	(224,214)	(223,215)	(226,211)
3	(229,201)	(218,200)	(221,201)
4	(219,198)	(226,199)	(227,199)
5	(221,195)	(225,196)	(223,198)

由于实验前无法得到激光光斑中心的实际坐标，所以实验前用激光指示器指示一个点作为基准值，计算出它的中心坐标，后续身管指向精度实验以这个基准值为准进行瞄准。实验基准点的坐标为 (220, 210)。据此求相对误差 δ ：

$$\delta = \frac{v_i}{x} \times 100\% \quad (24)$$

计算结果如表 5 所示。

表 5 光斑中心检测数据

身管编号	相对误差/%
1	2.121 2
2	1.969 7
3	1.212 1
4	1.818 1
5	1.363 6

为了进一步验证该方法的可行性，在靶面屏前方的不同角度再次进行试验并分析实验数据，计算相对误差。

分别在偏离靶面屏 30°、45°、60° 的角度处安装固定武器平台，进行模拟实验。实验基准点的坐标为 (330, 370) 如表 6 所示。

表 6 不同角度的光斑中心检测结果

身管编号	30°	45°	60°
1	(333,365)	(337,364)	(331,369)
2	(336,374)	(326,365)	(343,376)
3	(328,372)	(338,367)	(338,370)
4	(329,368)	(339,371)	(335,366)
5	(340,363)	(342,369)	(334,371)

计算结果如表 7 所示。

表 7 光斑中心检测数据

身管编号	相对误差/%
1	1.111 1
2	1.515 2
3	1.414 1
4	1.313 1
5	2.626 2

对实验结果的数据进行分析可知,使用激光棱瞄加光斑图像处理的方法对身管的动态指向精度进行测量误差范围小于 3%。实验证明本文所提出的方法成功解决了测量身管动态指向精度的难题,经实验证明该方法可以应用于身管指向精度的测量中。

6 结束语

本文提出了一种基于身管动态指向精度的测量技术,该方法通过激光棱瞄配合光斑图像处理的原理达到测试身管指向的目的。根据系统的工作原理建立了数学模型,搭建了模拟实验装置。通过模拟在车间对转管武器的身管动态指向精度进行校正的场景,做实验验证了该方法的可行性。

为了保证实验的准确性,模拟了不同场景、不同情况下的实验,分别在不同的距离、不同的角度验证武器平台的指向精度。实验结果表明,该方法测得的实验结果误差在 3% 以内,因此通过实验验证了该方法的正确性与可行性,该方法的提出成功解决了身管动态指向精度的难题。

参考文献:

- [1] 王 军. 全数字零飞仪 [D]. 长春: 长春理工大学, 2004.
- [2] 王春艳, 秦宏宇, 王志坚. 火炮动态跟踪精度测量系统—全数字零飞仪 [J]. 长春理工大学学报, 2004 (4): 44-48.
- [3] 谢杰涛, 马 威, 吴 娟, 等. 火炮身管指向测试方法研究 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 43 (12): 170-181.
- [4] 程译俊, 滕红智, 韩兰懿, 等. 自行火炮身管指向测量关键技术综述 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43 (6): 29-36.
- [5] 程译俊, 滕红智, 王怀光, 等. 全站仪测量自行火炮身管指向的方法改进 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (4): 146-154.
- [6] 齐寰宇. 基于机器视觉的大口径火炮身管指向测量技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [7] 李 伟, 姜俊峰, 任海波, 等. 行进间火炮指向稳定跟踪系统

- 建模与控制 [J]. 兵工学报, 2018, 39 (8): 1479-1490.
- [8] 陈 扬. 自行火炮身管指向测量技术 [J]. 四川兵工学报, 2015, 36 (10): 32-39.
- [9] 李 伟, 杨 刚, 陈腾飞, 等. 某全闭环操瞄系统的火炮身管指向控制研究 [J]. 兵工学报, 2015, 36 (9): 1811-1818.
- [10] 李明彩, 郭 轩, 于 毅. 基于 Matlab 平台的相机标定研究 [J]. 数字技术与应用, 2018, 36 (2): 85-87.
- [11] 田 昊, 刘春萌. 基于双目立体视觉的标定技术及应用 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2020, 38 (2): 227-235.
- [12] 陈 勇. 基于 Matlab 相机标定系统研究与实现 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [13] 陈陆义. 基于 Matlab 对相机标定的研究 [J]. 科技创新与应用, 2016 (3): 44-45.
- [14] 蔡旭明, 李 笑, 刘玉县, 等. 基于灰度直方图的激光光斑中心定位算法 [J]. 激光技术, 2022 (7): 1-10.
- [15] 蒋佳雯, 康杰虎, 吴 斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (14): 362-367.
- [16] 王 刚, 朱明清, 石 磊. 基于 FPGA 激光光斑中心定位的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2022, 41 (3): 113-117.
- [17] 尤其泽. 激光光斑中心定位的分析与研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [18] 王欣宇, 李引生, 杨远程, 等. 自动全站仪的光斑图像中心定位精度分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42 (1): 211-215.
- [19] 李道萍, 杨 波. 高精度光斑中心定位算法 [J]. 光学仪器, 2018, 40 (4): 20-25.
- [20] 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): 60-67.
- [21] 寻言言, 薛河儒, 姜新华. 基于 MATLAB 的相机标定方法 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (2): 164-168.
- [22] ZHU J, XU Z, FU D, et al. Laser spot center detection and comparison test [J]. Photonic Sensors, 2019, 9 (1): 49-52.
- [23] GAO R, LIU H, ZHAO Y, et al. A high precision laser spot center positioning method for weak light conditions [J]. Applied Optics, 2020, 59 (6): 1763-1768.
- [24] ZHANG P, LIU J, YANG H, et al. Position measurement of laser center by using 2-D PSD and fixed-axis rotating device [J]. IEEE Access, 2019, 7 (99): 140319-140327.
- [25] HAO Y, XXA B, MLA B, et al. Design of quadrant photoelectric detection system and method of displacement calculation [J]. Optik, 2019 (199): 163335-163354.
- [26] YUAN G, ZHENG L, DING Y, et al. A precise calibration method for line scan cameras [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021 (99): 1.
- [27] ZHANG Z, ZHAO R, LIU E, et al. A convenient calibration method for LRF-camera combination systems based on a check-board [J]. Sensors, 2019, 19 (6): 1315-1316.