

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104889

基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位技术研究*

张旭辉^{1,2} 沈奇峰¹ 杨文娟^{1,2} 张超¹ 毛清华^{1,2} 王恒¹ 黄梦瑶¹

(1. 西安科技大学机械工程学院 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室 西安 710054)

摘要:针对煤矿井下低照度、非均匀粉尘环境中掘进机机身位姿测量不稳定的问题,提出了一种以3个激光光斑为点特征的掘进机机身位姿视觉测量技术。根据激光穿透性强的特性,对防爆工业相机采集的激光标靶图像进行处理,通过光斑区域的最小内接矩形和椭圆拟合相结合,获取3个激光指向仪的光斑点特征,并采用P3P单目视觉定位算法,通过空间坐标矩阵变换计算出掘进机机身的空间位姿。根据掘进机机身位姿测量实验表明,在粉尘和杂光的影响下,采用该方法获得的掘进机机身位置信息的误差均在30 mm以内,姿态误差均在0.5°以内,且保证了在杂光、粉尘和水雾等复杂背景下激光光斑点精确提取与机身位姿的稳定测量,基本满足巷道掘进施工精度要求。

关键词:单目视觉;精确定位;激光特征提取;视觉测量;P3P

中图分类号: TN98;TD421 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.6010

Research on visual positioning technology of roadheader body based on three laser point target

Zhang Xuhui^{1,2} Shen Qifeng¹ Yang Wenjuan^{1,2} Zhang Chao¹Mao Qinghua^{1,2} Wang Heng¹ Huang Mengyao¹

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: Aiming at the problem of unstable pose measurement of roadheader fuselage in a low-illumination and non-uniform dust environment in coal mines, a vision measurement technology for roadheader fuselage with three laser spots as point features is proposed. According to the characteristics of strong laser penetrability, the laser target image collected by the explosion-proof industrial camera is processed. Through the combination of the smallest inscribed rectangle and the ellipse fitting of the spot area, the spot characteristics of the three laser pointers are obtained. It adopted the P3P monocular vision positioning algorithm to calculate the spatial pose of the tunneling machine body through the transformation of the spatial coordinate matrix. According to the posture measurement experiment of the roadheader's fuselage, under the influence of dust and stray light, the error of the position information of the roadheader's fuselage obtained by this method is within 30 mm, and the attitude error is within 0.5°. Accurate extraction of laser spots and stable measurement of body pose under complex backgrounds such as stray light, dust and water fog, basically meet the accuracy requirements of roadway excavation construction.

Keywords: monocular vision; accurate position; laser feature extraction; visual measurement; P3P

0 引言

我国煤炭工业正向无人化、智能化、高产高效化的方

向发展^[1-2],而掘进机机身位姿检测技术是实现智能化与无人化的关键^[3-4]。由于井下环境复杂,存在粉尘、噪声等导致地面上的定位方式难以在井下应用^[5-6]。因此,研究掘进机机身位姿精确测量,实现复杂工况下井下掘进

收稿日期: 2021-11-08 Received Date: 2021-11-08

* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(52104166,52174150)、陕煤联合基金项目(2021JLM-03)、陕西省重点研发计划项目(2018ZDCXL-GY-06-04)资助

机的精确定位,对于提高掘进工作面智能化和掘进安全性具有重要意义^[7]。

目前常用的掘进机机身位姿单一测量技术包括惯性导航定位技术、UWB 定位方法,iGPS 定位方法、全站仪定位方法和视觉定位技术。张国喜^[8]利用惯性导航系统检测悬臂式掘进机的位姿,其受环境影响较小,并且具有较好的自主检测能力,但是由于惯性导航系统会随时间而产生误差累计,产生位姿飘移^[9],影响定位精度。朱信平等^[10]利用全站仪准确、快速地计算出测量目标的空间位置信息,但由于煤矿井下粉尘和水雾的作用,对棱镜产生了遮挡,无法对掘进进行实时定位。符世琛等^[11]提出了一种基于 UWB 的掘进机位姿检测系统,该系统由在身上的 3 个 UWB 节点模块和巷道后面的 4 台 UWB 定位基站组成,通过定位基站对节点模块进行测距,并建立相应的方程组,求解得到 UWB 节点模块的三维坐标,进一步推导出掘进机机身姿态角,此方法测量距离较长,且精度较高,但组成复杂,检测延时大,粉尘及水雾影响下检测精度难以保证。陶云飞等^[12]提出了一种基于 iGPS 的掘进机位姿检测系统,利用安装在掘进机后方煤巷中的 2 台扇形激光发射站和安装在掘进机机身固定位置上的 3 台激光接收器,通过测量激光接收器在巷道基准坐标系的三维坐标,最终解算出掘进机机身姿态角,此方法定位精度较高,但测量距离较短且井下环境对其测量精度影响较大。杨文娟等^[13-14]提出了一种基于激光束特征的悬臂式掘进机机身测量系统,该方法以两个激光束的点、线特征构建悬臂式掘进机位姿测量系统,充分利用激光指向仪方向性好、颜色单纯以及亮度高等优点^[15],此方法定位精度高,测量距离较远,且容易实现,但是该方法使用受井下粉尘、水雾等环境干扰导致激光特征提取精度下降,使得测量结果不稳定。综合以上掘进机位姿检测方法,选取一种能在杂光、粉尘和水雾等复杂环境下,准确提取特征信息,并且研究稳定有效的视觉测量技术,这些是实现智能掘进的关键。

因此,本文提出了一种基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位方法并构建了位姿测量系统。该系统以巷道中的三激光标靶的点特征作为特征信息,利用掘进机位姿解算模型,实现在标靶坐标系下掘进机机身位姿测量,进而计算出巷道坐标系下的掘进机机身位姿。本方法能在杂光、粉尘和水雾等复杂环境下,准确提取特征信息,并且可以稳定有效的测量掘进机的机身位姿,减弱了粉尘浓度对定位方法的影响。

1 掘进机机身位姿视觉测量系统设计

1.1 系统组成

掘进机位姿视觉测量系统组成如图 1 所示,包括掘

进机、防爆工业相机,数字全站仪以及 3 台激光指向仪。3 个激光指向仪之间固定并形成三角视觉测量标靶,固定时保证 3 个激光指向仪光线基本平行即可,标靶吊装在距掘进机后方一定距离的顶板处,全站仪的位置建在掘进机与标靶之间,用于标定 3 个激光指向仪光斑之间的位置,并获取全站仪坐标系下激光指向仪的坐标,防爆工业相机固定在掘进机机身上。 $O_H-X_H Y_H Z_H$ 为巷道坐标系,坐标原点在巷道起始的以巷道中线沿着掘进方向为 Y_H 向,面向掘进断面垂直中线向右为 X_H ,以垂直底板向上为 Z_H 。防爆工业相机坐标系为 $O_C-X_C Y_C Z_C$,以相机光心为坐标原点,沿着相机轴线方向为 Z_C ,垂直向下为 Y_C ,向右为 X_C 。机体坐标系设置在回转台中心,坐标系为 $O_b-X_b Y_b Z_b$,方向与相机方向一致。全站仪坐标为 $O_q-NEZ(xyz)$, z 向为掘进方向, x 方向与 X_H 方向一致。

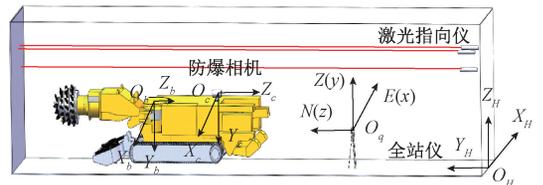


图 1 位姿测量系统组成

Fig. 1 Composition diagram of pose measurement system

1.2 系统原理

掘进机机身位姿视觉测量系统原理如图 2 所示,通过固定安装在掘进机上的防爆相机对 3 台激光指向仪的光斑进行图像采集,图像经畸变矫正和增强操作后,利用滤波、形态学变换、通道分离等处理过程,减少杂光的影响,再拟合出三激光光斑并计算出 3 个光斑的中心坐标,可采用全站仪测量激光指向仪标靶的绝对坐标,获得激光指向仪在巷道坐标系下坐标,得到定位模型坐标系与巷道坐标系的转换关系,结合上述得到的掘进机机身在定位模型坐标下的位姿,最终借助掘进机三点定位模型计算掘进机位姿参数。

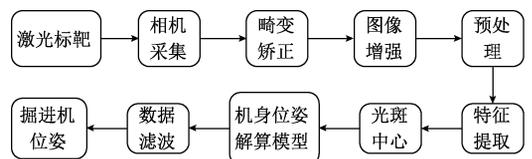


图 2 掘进机机身位姿视觉测量系统原理

Fig. 2 Principle of visual measurement system for roadheader body pose

2 激光光斑中心特征提取

2.1 光斑提取方法分析

目前比较常见的检测光斑中心的算法有灰度质心

法^[16]、拟合法^[17]、Hough 变换法^[18]以及二维高斯分布法^[19]、高斯累计分布法^[20]等,对于不同类型的光斑,这些方法各有差异。煤矿井下要求稳定、高精度的提取激光光斑,符合要求的方法需要进一步分析。灰度质心法就是应用像素的灰度值作为权重来计算光斑的质心,该方法只有灰度对称分布的光斑才能获得理性效果,掘进机机身振动,相机光轴偏移,重心法均会产生较大偏差。基于拟合检测激光光斑中心的算法的依据的是最小二乘法的原理来逼近激光光斑的轮廓,此方法并不受灰度对称的影响,外界环境对该方法影响较小,算法拟合精度相对较高,而在拟合法中,椭圆拟合算法^[21]效率相对较高,而且椭圆拟合也符合视觉定位的动态应用。Hough 变换是利用点-线对偶性,将图像空间中的曲线通过曲线公式转换到对应的参数空间,对相同参数进行累加,那么图像空间的提取曲线就转化成求取参数空间的峰值问题,圆变换的参数空间为三维的,在三维空间上进行数据累加的时间、空间消耗是非常大的。二维高斯分布法是利用图像灰度呈高斯分布的特性,用伪逆法进行最小二乘求解,得到光斑的中心坐标,该方法主要应用于求取极小光斑的中心。高斯累计分布法是利用光斑在空间中的灰度分布为高原状这一特点,可直接求取光斑中心坐标,且图像预处理过程中可省去噪声操作,是非常理想的拟合方法,但此方法解算较为复杂,一般只用于运行速度要求不高的系统中。对工业应用中的光斑图像,用上述的几种算法对分别进行处理,探究各算法对实际光斑图像提取效果,如图 3 所示,利用椭圆拟合法求取的光斑中心精度与效率明显优于其他几种方法。由以上分析本系统应用椭圆拟合法来求取光斑中心,此方法在运行效率方面具有突出优势,能够满足相机快速定位激光靶光斑中心的需求,从而保证掘进机机身位姿的实时解算要求。

2.2 激光光斑中心定位

由于井下作业环境存在杂光、粉尘、振动和水雾等因素,并且这些因素随着生产环境的变化会产生较大差异,其次,现有的根据井下环境的点、线特征,对掘进机机身进行定位的方法,均不能依据杂光、粉尘和振动等因素有效的提取光斑中心点,为适应煤矿井下的复杂环境,对光斑进行精确定位,提出了一种基于井下环境的光斑提取方法。激光光斑中心定位流程如图 4 所示,梯度转换是用来就算光斑像素点与其相邻像素的灰度值变化情况,可以对图像产生增强效果。求取最大灰度后,再根据图像最大灰度,选择合适比例,分类别调节的二值化最小阈值,确保激光光斑能够被保留。闭运算操作是将光斑的区域边界向光斑中心填充,使光斑边界连接且边界区域足够大。由于相机振动和激光指向仪安装误差等因素,使光斑发散且呈现圆或椭圆状,根据光斑最小外接矩形的高宽比,可去除手电筒等产生的条状光斑。再通过求

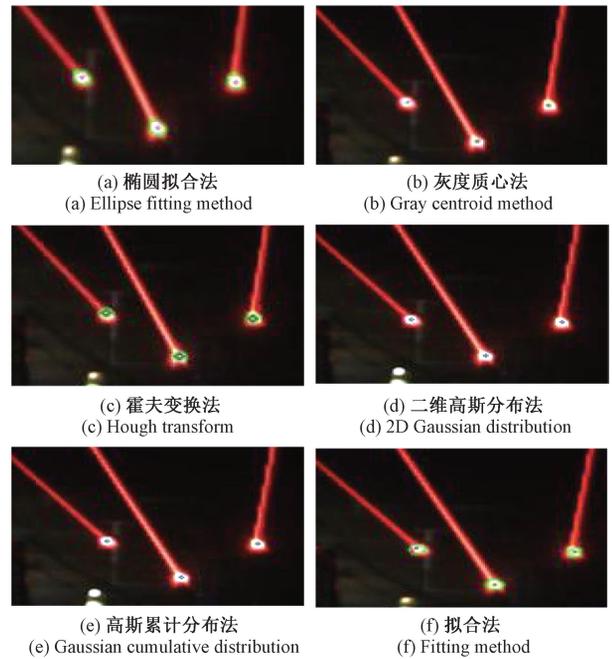


图 3 各算法对实际光斑图像提取

Fig. 3 Extraction of actual spot image by each algorithm

取各光斑之间的距离,基本可以去除与激光光斑特征不一致的杂光,结合椭圆拟合的方法就确定了激光光斑中心的坐标,图像处理过程结果如图 5 所示。激光光斑中心位置确定步骤为:

1) 遍历相机采集的图像,对其依次进行畸变矫正、高斯滤波和梯度转换等操作,再对梯度转换后的图像进行通道分离,将蓝色通道转为灰度图,并求取最大灰度,按比例输入最小分割阈值,自适应井下环境阈值分割方法;

2) 经二值化后的区域边界可能含有未封闭的区域,需进行闭运算,然后再求取各区域的边界,若区域边界的个数大于 3,则再判断是否满足边界点的个数大于 a ,小于 b ,满足则求取区域的最小矩形,再根据最小矩形的高宽比,删除一些杂光。

3) 利用椭圆拟合对剩余区域进行拟合,并获取光斑中心坐标,再求取各光斑之间的距离,其满足给定的范围值(e, f),满足则保存光斑坐标,最终保留的光斑是 3 个,则带入到三激光点的掘进机机身定位模型中,并计算出掘进机机身位姿。

3 三激光点的掘进机机身定位模型

如图 6 所示,三激光点的视觉定位方法坐标转换示意图,给定激光光斑特征 $f_i = 1, 2, 3$ 在参考坐标系中的位置 ${}^c p_i$,以及特征点在相机坐标系中的方向向量 ${}^c k_i$,目标是估计相机的旋转矩阵和位置 ${}^c p_c$ 。其中 $\{C\}$ 表示相

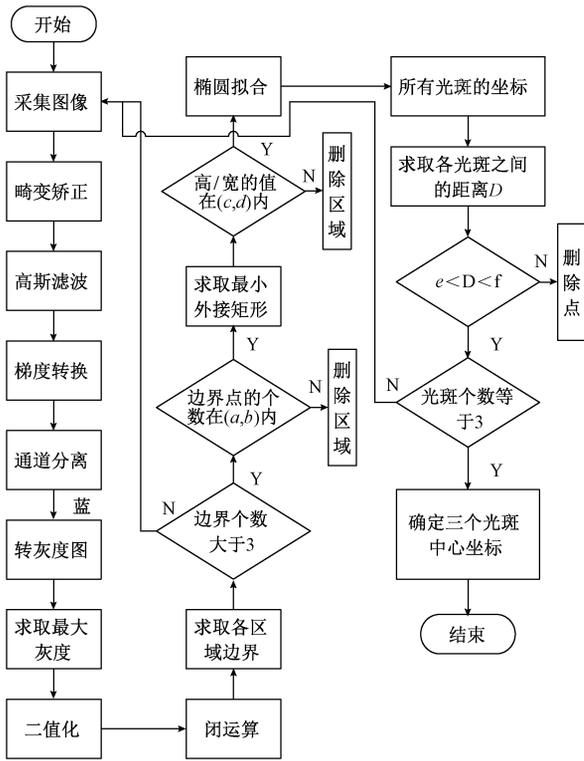


图 4 激光光斑中心定位流程

Fig. 4 Flowchart of laser spot center location

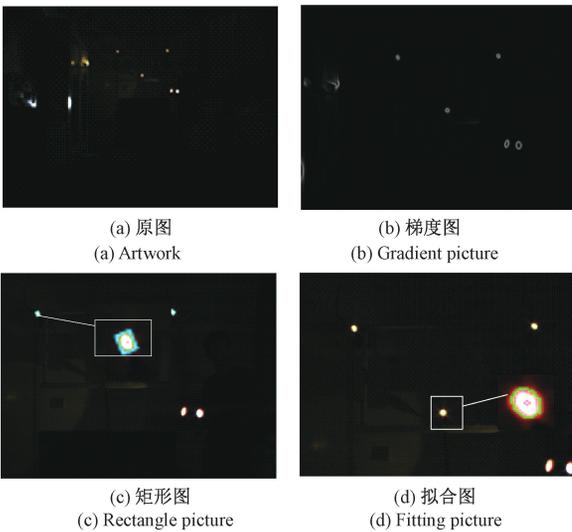


图 5 图像处理过程结果

Fig. 5 Results of image processing

机坐标系,其位置为 ${}^c p_c$ 方向为 ${}^c C$, $\{G\}$ 表示参考坐标系。

根据几何关系得出: ${}^c p_i = {}^c p_c + d_i {}^c C k_i$

将三激光指向仪组成的视觉测量标靶,固定在掘进机后方一定距离的顶板处。利用防爆工业相机采集其图像信息,经图像处理获取三激光点的图像坐标,利用全站

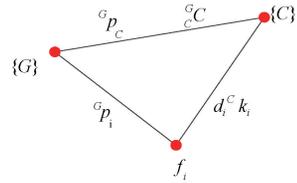


图 6 坐标转换示意图

Fig. 6 Diagram of coordinate transformation

仪测量三激光点之间的关系,并借助掘进机三点定位模型计算出掘进机位姿参数。

掘进机三点定位模型投影示意图,如图 7 所示,对于 3 个已知空间点 P_1 、 P_2 和 P_3 ,其构成三角形 3 个边长度分别为 a 、 b 和 c 。在摄像机成像平面成像点分别为 p_{c1} 、 p_{c2} 和 p_{c3} 空间点 P_i 与摄像机光轴中心点 O 之间构成单位向量 k_i ,如式(1)所示。

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + 1}} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

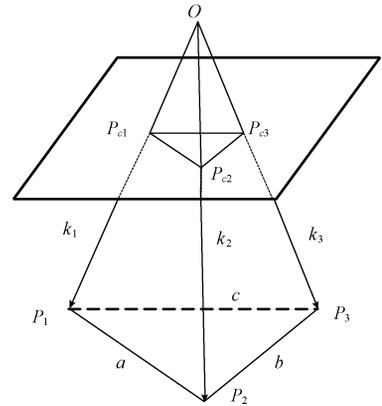


图 7 掘进机机身定位模型投影示意图

Fig. 7 Projection diagram of roadheader positioning model

将 k_2 和 k_3 间的夹角记为 α ; k_1 和 k_3 间的夹角记为 β , k_1 和 k_2 间的夹角记为 γ ,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \cos\alpha = k_2^T k_3 \\ \cos\beta = k_1 k_3 \\ \cos\gamma = k_2^T k_1 \end{cases} \quad (2)$$

将 P_1 、 P_2 和 P_3 和 O 之间的距离记为 d_1 、 d_2 和 d_3 。根据三角几何原理,可得式(3)。

$$\begin{cases} d_2^2 + d_3^2 - 2d_2d_3\cos\alpha = b^2 \\ d_1^2 + d_3^2 - 2d_1d_3\cos\beta = c^2 \\ d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2\cos\gamma = a^2 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可假设式(4)如下:

$$\begin{cases} d_2 = md_1 \\ d_3 = nd_1 \end{cases} \quad (4)$$

可得式(5)和(6):

$$m = \frac{b^2 - a^2 - c^2}{c^2} - 2\cos\beta \frac{b^2 - a^2}{c^2}n + \frac{b^2 - a^2 + c^2}{c^2} \quad (5)$$

$$a_4n^4 + a_3n^3 + a_2n^2 + a_1n + a_0 = 0 \quad (6)$$

式中:

$$a_0 = \left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{c^2}\right)^2 - \frac{4b^2}{c^2}\cos^2\gamma$$

$$a_1 = 4\left[-\left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{c^2}\right)\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)\cos\beta + \right.$$

$$\left.\frac{2b^2}{c^2}\cos^2\gamma\cos\beta + \frac{b^2 + a^2 - c^2}{c^2}\cos\alpha\cos\gamma\right]$$

$$a_2 = 2\left[\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right) - 1 - 4\left(\frac{b^2 + a^2}{c^2}\right)\cos\alpha\cos\gamma\cos\beta + \right.$$

$$\left.2\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)\cos^2\alpha + 2\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)\cos^2\beta + 2\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)\cos^2\gamma\right]$$

$$a_3 = 4\left[-\left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{c^2}\right)\left(\frac{b^2 - a^2}{c^2}\right)\cos\beta + \right.$$

$$\left.\frac{2a^2}{c^2}\cos^2\alpha\cos\beta + \frac{b^2 + a^2 - c^2}{c^2}\cos\alpha\cos\gamma\right]$$

$$a_4 = \left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{c^2}\right)^2 - \frac{4b^2}{c^2}\cos^2\alpha$$

由以上可求出 m, n, d_1, d_2 和 d_3 的值。则各空间点在摄像机中的位置坐标为 $p_{ci} = d_i k_i, i = 1, 2, 3$ 。2D 点的图像坐标已知, 3 个余弦角已知。3D 点的坐标已知, 只有 x 和 y 未知。由式(6)可知, $a_0 \sim a_4$ 都是已知的, 因此可以求得 m, n 的值。4 次方程组理论上 4 组解, 但其实只有一组是合适的。设 4 个位姿解为 $(x_g, y_g), g = 1, 2, 3, 4$, 求取最小二范数, 如式(7)所示, 最小值为相机相对于标靶坐标系的位姿。 x_g, y_g 分别代表位置解和姿态解。

$$\min_{4 \geq g \geq 1} \|x\|_2 = \left(|x_g|^2 + |y_g|^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

通过三激光点的掘进机机身定位, 再根据激光指向仪坐标系与巷道坐标系之间的已知关系, 从而得到机体坐标系巷道坐标系之间的关系, 便可求得掘进机在巷道坐标系下的偏航角、横滚角、俯仰角和位置信息。

4 实验及数据分析

掘进机机身位姿测量实验平台如图 8 所示, 由掘进机、防爆计算机、MV-EMV510M 防爆工业相机、矿灯、烟雾模拟器, 全站仪以及 3 个型号为 YHJ-800 的激光指向仪组成。利用控制变量实验法分别在有、无杂光和烟雾的情况下对三激光点的掘进机机身定位方法进行验证并分析烟雾和杂光对本方法的影响。

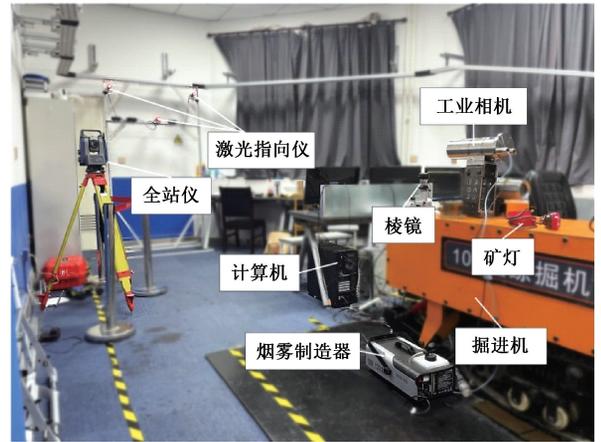


图 8 掘进机机身位姿测量实验平台

Fig. 8 Experimental platform for pose measurement of roadheader body

在三激光点标靶的掘进机机身视觉定位测量实验中, 利用矿灯以及烟雾制造机进行灯光以及粉尘干扰模拟, 工业相机将采集得到的图像信息通过以太网传输到计算机中, 在计算机中完成对图像的处理、激光光斑中心的特征提取, 并计算得到相机在激光指向坐标系中的位姿, 根据激光指向仪坐标系与巷道坐标系之间的已知关系, 从而得到机体坐标系巷道坐标系之间的关系, 实现掘进机机身位姿的实时定位。其中, 3 个平行放置的激光之间距离分别为 1 002、700、700 mm, 设定相机每次移动距离为 10 m, 测量距离分别为 10、20、30、40、50、60 m。利用计算机编写相机软出发程序, 实时静态触发固定在掘进机上的防爆工业相机采集激光指向仪点特征信息, 设置采集时间间隔为 100 ms。每组实验均利用全站仪二次检测掘进机位姿, 通过全站仪测量方式与实验结果进行对照, 其中, 全站仪测量值作为真值, 掘进机机身位姿测量实验所测值为测量值, 实验主要分为有烟有杂光、有烟无杂光, 无烟有杂光, 无烟无杂光等 4 个部分, 分别模拟井下环境进行掘进机位姿测量实验。有烟情况下掘进机机身位姿测量部分实验结果如表 1 所示, 无烟情况下掘进机机身位姿测量部分实验结果如表 2 所示。

根据实验结果可知, 该方法可以在含有杂光以及粉尘的环境下准确计算出悬臂式掘进机的位置信息, 实验数据以全站仪数据为基准进行定位精度对比, 从表 1 和 2 的试验过程数据以及 4 种情况下掘进机机身位姿定位误差, 如图 9 所示, 可以看出, 从 10 m 到 60 m, 三激光点的掘进机机身定位 x 方向误差、 y 方向误差, z 方向误差均保持在 30 mm 以内, 俯仰角、偏航角和横滚角误差均保持在 0.5° 以内。且在有烟雾有杂光、有烟雾无杂光、无烟雾有杂光和无烟雾无杂光 4 种情况下, 烟雾与杂光对三激光点的掘进机机身定位方法影响位置误差均保持在 4 mm 以内, 姿态误差均保持在 0.1° 以内, 由此可知, 杂光

表1 有烟情况下位姿测量部分实验结果

Table 1 Experimental results of lower position measurement with smoke

有无杂光	测试距离/m	x 测量值/mm	y 测量值/mm	z 测量值/mm	偏航角/(°)	横滚角/(°)	俯仰角/(°)	x 真实值/mm	y 真实值/mm	z 真实值/mm	偏航角真实值/(°)	横滚角真实值/(°)	俯仰角真实值/(°)
有	10	78.74	210.21	9 980.97	-8.21	-0.12	0.31	90	220	10 000	-8.01	-0.29	0.46
	20	189.57	210.4	19 977.73	7.23	-0.13	0.27	200	221	20 000	6.93	-0.31	0.49
	30	299.73	207.81	29 981.29	5.21	-0.27	0.28	318	223	30 000	5.56	-0.11	0.53
	40	337.12	207.58	40 016.41	-5.56	-0.16	0.22	353	221	40 000	-5.12	-0.35	0.61
	50	356.18	269.49	49 964.4	5.39	-0.38	-0.34	382	289	50 000	5.03	-0.52	0.12
	60	369.97	274.74	60 019.42	-5.56	-0.32	-0.31	397	291	60 000	-5.09	-0.54	0.16
无	10	79.66	211.73	9 981.12	-8.17	-0.11	0.28	90	220	10 000	-8.01	-0.29	0.46
	20	192.17	212.24	19 978.11	7.18	-0.13	0.26	200	221	20 000	6.93	-0.31	0.49
	30	301.39	210.89	29 979.41	5.3	-0.3	0.32	318	223	30 000	5.56	-0.11	0.53
	40	340.77	211.66	40 012.56	-5.52	-0.19	0.23	353	221	40 000	-5.12	-0.35	0.61
	50	361.38	271.48	49 970	5.36	-0.38	-0.30	382	289	50 000	5.03	-0.52	0.12
	60	371.56	276.64	60 016.57	-5.51	-0.31	-0.27	397	291	60 000	-5.09	-0.54	0.16

表2 无烟情况下位姿测量部分实验结果

Table 2 Experimental results of lower position measurement without smoke

有无杂光	测试距离/m	x 测量值/mm	y 测量值/mm	z 测量值/mm	偏航角/(°)	横滚角/(°)	俯仰角/(°)	x 真实值/mm	y 真实值/mm	z 真实值/mm	偏航角真实值/(°)	横滚角真实值/(°)	俯仰角真实值/(°)
有	10	77.13	207.82	9 980.68	-8.2	-0.14	0.3	90	220	10 000	-8.01	-0.29	0.46
	20	187.95	207.93	19 977.52	7.2	-0.13	0.26	200	221	20 000	6.93	-0.31	0.49
	30	299.1	205.26	29 978.16	5.23	-0.26	0.3	318	223	30 000	5.56	-0.11	0.53
	40	335.48	204.95	40 016.36	-5.52	-0.18	0.26	353	221	40 000	-5.12	-0.35	0.61
	50	359.53	269.78	49 975.43	5.4	-0.38	-0.34	382	289	50 000	5.03	-0.52	0.12
	60	368.31	271.95	60 019.53	-5.54	-0.31	-0.27	397	291	60 000	-5.09	-0.54	0.16
无	10	77.99	208.86	9 981.31	-8.2	-0.14	0.31	90	220	10 000	-8.01	-0.29	0.46
	20	190.49	209.29	19 978.38	7.14	-0.14	0.29	200	221	20 000	6.93	-0.31	0.49
	30	299.7	207.86	29 979.76	5.22	-0.26	0.3	318	223	30 000	5.56	-0.11	0.53
	40	339.07	208.55	40 012.99	-5.53	-0.19	0.23	353	221	40 000	-5.12	-0.35	0.61
	50	359.67	260.29	49 970.51	5.36	-0.38	-0.34	382	289	50 000	5.03	-0.52	0.12
	60	369.84	273.37	60 017.16	-5.5	-0.32	-0.31	397	291	60 000	-5.09	-0.54	0.16

与粉尘对基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位系统的影响较小。对比基于三激光点标靶的掘进机机身视觉定位方法,其他的视觉定位方法,很难在煤矿井下提取稳定的特征,由于粉尘、杂光等导致定位精度低,难以满足生产要求。本方法在10~60 m的测量范围内,根据煤矿井下的安全生产施工要求,本方法的精度满足《煤炭井巷工程质量验收规范》的要求。而且在煤矿井下多杂光,高粉尘、低照度的环境中,利用简单且容易操作的三激光标靶实现掘进机身的精确定位,可以保证在远距离的测量中满足工业生产要求。

5 结论

为实现煤矿井下智能化、无人化开采,掘进机机身的定位问题尤为重要。针对煤矿井下低照度、非均匀粉尘环境中掘进机机身位姿测量不稳定的问题,提出了一种

以3个激光光斑为点特征的掘进机机身位姿视觉测量技术。根据激光穿透性强的特性,对防爆工业相机采集的激光标靶图像进行处理,通过光斑区域的最小内接矩形和椭圆拟合相结合,获取3个激光指向仪的光斑点特征,并采用P3P单目视觉定位算法,通过空间坐标矩阵变换计算出掘进机机身的空间位姿。本方法可以适应于有、无杂光和粉尘的环境以及远距离应用,提高了特征检测精度并实现了井下设备精确定位,检测精度基本满足了工业生产要求,主要结论如下:

1) 采用P3P单目视觉测量原理,以激光点为特征,结合建立的掘进机位姿测量模型,可以实现煤矿井下巷道施工中设备精确定位要求。

2) 针对井下施工环境设计激光特征提取处理流程,提出最小外接矩形提取光斑区域,在通过圆拟合进行光斑提取算法。可以保证在杂光、粉尘和水雾等复杂背景下激光点精确提取。

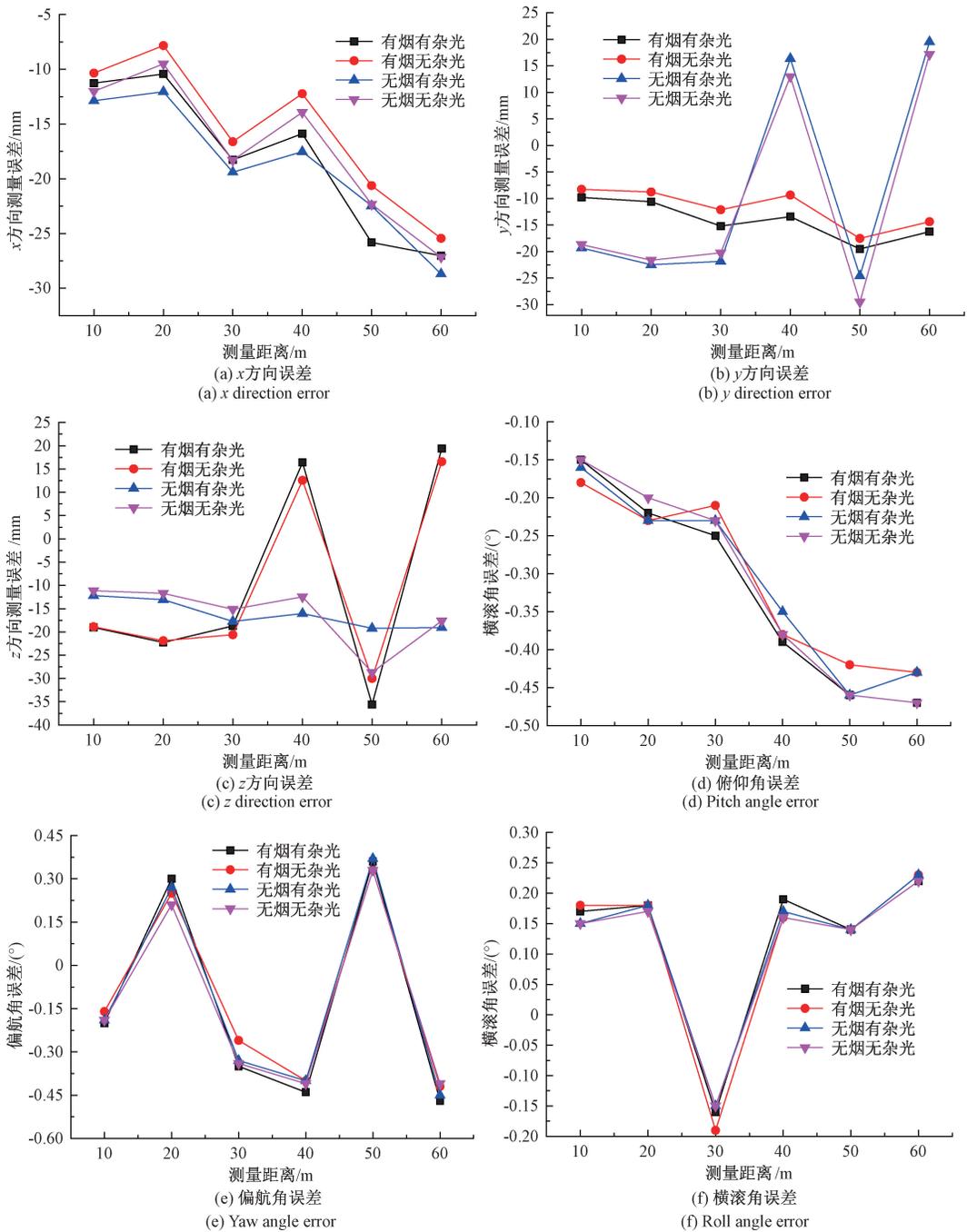


图 9 4 种情况下掘进机机身位姿误差
Fig. 9 The pose error of roadheader in four cases

3) 掘进机机身位姿测量实验表明, 杂光与粉尘对基于激光三点的掘进机机身位姿视觉测量系统的影响较小, 且采用该方法获得的掘进机机身位置信息的误差在 30 mm 以内, 姿态误差保持在 0.5° 以内, 基本满足巷道掘进施工精度要求。

4) 烟雾与杂光对三激光点的掘进机机身定位方法影响位置误差均保持在 4 mm 以内, 姿态误差均保持在

0.1° 以内, 杂光与粉尘对三激光点标靶的掘进机机身视觉定位系统的影响较小。

参考文献

[1] 石泉, 孙常军, 郑洪涛, 等. 掘进机机器人化的关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S2): 199-204.
DAN Q, SUN CH J, ZHENG H T, et al. Research on the key technology of robotization of roadheader[J]. Coal

- Science and Technology, 2020, 48(S2): 199-204.
- [2] 杨春雨, 顾振, 张鑫, 等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 164-174.
- YANG CH Y, GU ZH, ZHANG X, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 164-174.
- [3] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏, 等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2123-2135.
- HU X T, ZHU T, SU J M, et al. Key technology of intelligent drivage perception in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2123-2135.
- [4] 马宏伟, 王世斌, 毛清华, 等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310-320.
- MA H W, WANG SH B, MAO Q H, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310-320.
- [5] 张旭辉, 赵建勋, 杨文娟, 等. 悬臂式掘进机视觉导航与定向掘进控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 1-11.
- ZHANG X H, ZHAO J X, YANG W J, et al. Vision-based navigation and directional heading control technologies of boom-type roadheader [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 1-11.
- [6] 张旭辉, 刘永伟, 毛清华, 等. 煤矿悬臂式掘进机智能控制技术研究及进展[J]. 重型机械, 2018(2): 22-27.
- ZHANG X H, LIU Y W, MAO Q H, et al. Research and progress on intelligent control technology of boom-type roadheader in coal mine [J]. Heavy Machinery, 2018(2): 22-27.
- [7] 杨健健, 张强, 吴森, 等. 巷道智能化掘进的自主感知及调控技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2045-2055.
- YANG J J, ZHANG Q, WU M, et al. Research progress of autonomous perception and control technology for intelligent heading [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2045-2055.
- [8] 张国喜. 悬臂式掘进机惯性测量系统的改进与试验[J]. 江西煤炭科技, 2021(2): 238-240.
- ZHANG G X. Transformation and experiment on inertial measurement system in cantilever roadheader [J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2021(2): 238-240.
- [9] 邓雅麒, 王进成, 郝兆钧, 等. 光纤陀螺启动漂移补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 61-63, 67.
- DENG Y Q, WANG J CH, HAO ZH J, et al. Compensation method for FOG startup drift [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(12): 61-63, 67.
- [10] 朱信平, 李睿, 高娟, 等. 基于全站仪的掘进机机身姿态参数测量方法[J]. 煤炭工程, 2011(6): 113-115.
- ZHU X P, LI R, GAO J, et al. Position parameter measuring method of mine roadheader body base on total station [J]. Coal Engineering, 2011(6): 113-115.
- [11] 符世琛, 李一鸣, 宗凯, 等. 面向掘进机的超宽带位姿检测系统精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1978-1987.
- FU SH CH, LI Y M, ZONG K, et al. Accuracy analysis of UWB pose detection system for roadheader [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1978-1987.
- [12] 陶云飞, 李瑞, 李嘉赓, 等. IGPS 的单站多点分时测量系统对掘进机偏向位移精度研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 246-247.
- TAO Y F, LI R, LI J G, et al. Research on positioning accuracy of roadheader based on single station, multipoint and Time-shared of IGPS measurement system [J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 246-247.
- [13] 杨文娟, 张旭辉, 马宏伟, 等. 悬臂式掘进机机身及截割头位姿视觉测量系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 50-57.
- YANG W J, ZHANG X H, MA H W, et al. Research on position and posture measurement system of body and cutting head for boom-type roadheader based on machine vision [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 50-57.
- [14] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 悬臂式掘进机器人巷道成形智能截割控制系统研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 40-46.
- YANG W J, ZHANG X H, ZHANG CH, et al. Research on intelligent cutting control system or roadway forming of boom-type tunneling robot [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 40-46.
- [15] 杨雄丹, 李国元, 王佩贤, 等. 星载激光光斑影像激光指向变化探测法[J]. 测绘学报, 2020, 49(12): 1591-1599.
- YANG X D, LI G Y, WANG P X, et al. Compensation method for FOG startup drift [J]. ACTA Geodaetica ET Cartographica Sinica, 2020, 49(12): 1591-1599.
- [16] 严婷婷, 李锋, 王琦. 高斯加权的二维灰度重心法提取光条中心[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(12):

3570-3574.

YAN T T, LI F, WANG Q. Gaussian weighted two-dimensional gray center of gravity method for extracting strip center [J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(12): 3570-3574.

- [17] 杜进,张永奇. 小孔拟合法测量高斯光束的束腰半径[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(7): 192-194, 19.
DU J, ZHANG Y Q. Small-aperture fitting to measure the beam waist radius of Gaussian beams[J]. Automation & Instrumentation, 2021(7): 192-194, 19.
- [18] 刘爱胤,熊根良,姚健康,等. 基于霍夫圆检测的标志物多图像特征定位方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(3): 341-345.
LIU AI Y, XIONG G L, YAO J K, et al. Marker localization method on multiple Image features based on hough circle detection[J]. Computer Simulation, 2021, 38(3): 341-345.
- [19] 冯新星,张丽艳,叶南,等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 78-85.
FENG X X, ZHANG L Y, YE N, et al. Fast algorithms on center location of TWO dimensional gaussian distribution spot [J]. ACTA Optica Sinica, 2012, 32(5): 78-85.
- [20] 游波,蔡志明. 典型非高斯分布假设下累积和检测方法性能研究[J]. 声学技术, 2019, 38(6): 686-690.
YOU B, CAI ZH M. Research on the performance of page test method under the hypothesis of typical non-Gaussian distribution [J]. Technical Acoustics, 2019, 38(6): 686-690.
- [21] 王宁,宋慧慧,张开华. 基于距离加权重叠度估计与椭圆拟合优化的精确目标跟踪算法[J]. 计算机应用, 2021, 41(4): 1100-1105.
WANG N, SONG H H, ZHANG K H. Accurate object tracking algorithm based on distance weighting overlap prediction and ellipse fitting optimization[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(4): 1100-1105.

作者简介



张旭辉, 2009 年于西安交通大学大学获得博士学位, 现为西安科技大学教授, 主要研究方向为煤矿机电设备智能检测与控制。

E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

Zhang Xuhui received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2009. He is currently a professor at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include the intelligent detection and control of coal mine electromechanical equipment.



沈奇峰, 现为西安科技大学硕士研究生, 主要研究方向为视觉测量技术。

E-mail: 18409271819@163.com

Shen Qifeng is currently a M. Sc. candidate at Xi'an University of Science and Technology. His main research interest includes visual measurement technology.



杨文娟, 2020 年于西安科技大学获得博士学位, 现为西安科技大学副教授, 主要研究方向为煤矿井下图像智能感知与识别技术。

E-mail: 18059099145@qq.com

Yang Wenjuan, received her Ph. D. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2020. She is currently an associate professor of Xi'an University of Science and Technology. Her main research interests include intelligent perception and recognition technology of coal mine images.



张超, 现为西安科技大学在读博士, 主要研究方向为煤矿采掘装备智能检测与控制。

E-mail: 1354277569@qq.com

Zhang Chao is currently a Ph. D. candidate in Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include intelligent detection and control of coal mining equipment.