

基于双屏视觉标靶的掘锚机机身位姿测量技术

黄 喆¹, 李佳雄¹, 杜文阳², 徐叶倩¹, 沈小玲¹, 赵世艺¹, 王浩森¹

(1. 天津科技大学 电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2. 力信测量(上海)有限公司, 上海 201203)

摘要: 针对掘锚机在煤矿巷道掘进过程中难以实现机身位姿的实时精确测量, 进而导致难以实现定向掘进的问题, 提出一种基于双屏视觉标靶的掘锚机导向方法。由2块竖直安装的感光成像屏组成双屏视觉标靶靶面, 巷道中的激光器发射指示激光并在前、后靶面上呈现光斑, 利用视觉测量、高精度栅格标定等技术, 建立光斑质心的图像坐标与三维空间坐标的映射关系, 以形成坐标点云数据; 再根据栅格索引、坐标变换、欧拉角解算等原理, 结合标靶底部的双轴倾角仪来获得掘锚机机身的实时位姿, 并解算出机身关键点相对于巷道设计轴线的横向/纵向偏差, 为掘进过程中的偏差纠正提供数据支撑。通过构建数学模型对系统脱靶问题进行了分析, 同时搭建实验平台验证了该导向方法的有效性。实验结果表明: 该方法能够实现机身六自由度空间位姿的精确测量; 在9 m 测试距离下偏航角重复性测量精度优于0.01°、偏航角绝对测量误差小于0.05°; 在15~40 m 测量范围内, 用全站仪与矿用激光器设置计划线时机身关键点横向/纵向偏差测量误差分别小于5、15 mm。基于该方法研发的导向系统已成功应用于煤矿井下巷道掘进中, 满足了巷道施工与掘锚机机身定位的精度要求。该导向方法的误差特性与测试距离无关, 且该方法中涉及的所有光学测量功能均在标靶内部实现, 可有效屏蔽井下复杂环境对测量功能的影响, 大幅提升了现场应用时的抗粉尘干扰能力。

关键词: 掘锚机; 位姿测量; 双屏视觉标靶; 定位; 视觉测量

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)04-1814-11

Position and orientation measurement technology for bolter miner body based on dual-screen visual target

HUANG Zhe¹, LI Jiaxiong¹, DU Wenyang², XU Yeqian¹, SHEN Xiaoling¹, ZHAO Shiyi¹, WANG Haosen¹

(1. School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China; 2. Lixin Measurement (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to achieve the real-time and accurate measurement of the bolter miner's position and orientation during the excavation process in coal mines, which leads to the difficulty in achieving directional excavation, a guidance method for bolter miner based on dual-screen visual target is proposed. Using two vertically installed light-sensitive imaging screens to form the dual-screen visual target surfaces and the indication laser emitted by the laser instrument presents light spots on the front and rear target surfaces. Combining with the visual measurement, high-precision raster calibration and other technology are applied to establish the mapping relationship of the spot centroid

收稿日期: 2022-02-26 修回日期: 2022-05-29 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0236

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(18JCYBJC88600); 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室开放课题资助项目(pilab1905)

作者简介: 黄 喆(1989—), 男, 辽宁沈阳人, 讲师, 博士。E-mail: huangzhe@tust.edu.cn

通讯作者: 杜文阳(1994—), 男, 天津人。E-mail: 770896174@qq.com

引用格式: 黄喆, 李佳雄, 杜文阳, 等. 基于双屏视觉标靶的掘锚机机身位姿测量技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1814-1824.

HUANG Zhe, LI Jiaxiong, DU Wenyang, et al. Position and orientation measurement technology for bolter miner body based on dual-screen visual target[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1814-1824.



移动阅读

between 2D-3D coordinates, which is used to form the point cloud data of the coordinates. Based on the principle of grid indexing, coordinate transformation and Euler angle solving, combining with the biaxial inclinometer at the bottom of target to obtain the bolter miner body's real-time position and orientation, the key points' horizontal/vertical deviations relative to the roadway axis are calculated, which can provide data support for deviation correction during the excavation process. The off-target problem of the system is analyzed by constructing a mathematical model. Meanwhile, the effectiveness of the guidance method is verified by building an experimental platform. The experimental results indicate that this method can achieve a precision measurement of six-degrees-of-freedom spatial pose for the machine body. When the measurement distance is 9 m, the repeatability measurement precision of the yaw angle is better than 0.01° and the error of absolute measurement is less than 0.05°. Within the measurement range of 15–40 m, which uses the total station and mining laser to set the planning line, the measurement errors of key points' horizontal/vertical deviations are less than 5 mm and 15 mm, respectively. The guiding system developed based on this method has also been successfully applied to the underground roadway excavation in coal mine, which fully meets the requirements of underground roadway excavation and the positioning of the machine body's key points. The error characteristic of the guiding method is independent of the test distance. Also, all optical measurement functions involved in the method are realized inside the target, which can effectively shield the influence of the underground complex environment for the measurement function, and greatly improve the capacity of anti-dust interference in field application.

Key words: bolter miner; position and orientation measurement; dual-screen visual target; positioning; vision measurement

建设智慧煤矿、实现煤矿开采智能化是煤炭工业发展的必然选择^[1-2]。作为煤矿开采的关键一环,综掘工作面的智能化程度与煤矿的安全、高效生产息息相关^[3]。而在掘锚机掘进过程中,我国仍普遍采用人工主导的方式来评估巷道走向是否偏离计划线,无法实现掘锚机的实时位姿测量,导致“采快掘慢”等矛盾日益突出^[4]。研究掘锚机位姿测量技术,实现掘进导向智能化、无人化,全面提升煤矿采掘的工作效率,具有重大意义。

掘锚机的位姿测量过程受多种外界因素的影响:巷道环境复杂,封闭、弱光、高粉尘、可见程度低,且无外部定位基准;掘锚机前进速度缓慢,机身振动强烈;又因包含锚杆机等设备,使得掘锚机机身结构更加复杂,遮挡现象较为严重,测量通道有限。因此,克服外界因素对掘锚机位姿测量过程的影响,实现精准定位与导向是亟需攻关的技术难题。

对现有的掘进设备位姿测量技术而言,根据其工作原理可分为:基于光电传感器的位姿检测技术、基于惯性设备的位姿检测技术与基于多传感器融合的位姿检测技术^[5-6]。学者们也对此进行了相关研究:ROMAN 等^[7]将红外传感器固定于掘进机机身,利用传感器实现掘进机的位置参数测量,但使用单一类传感器,测量精度较低。鲁程等^[8]利用多惯导冗余定位技术提升了采煤机定位精度,有效抑制了单一惯导长时间运行产生的累积误差,减小了施工误差,但高精度惯性传感器成本高昂,难以实现普及。朱信平等^[9]

提出的基于全站仪的掘进机位姿测量方法,利用全站仪对固定在掘进机机身上的目标棱镜进行测量,再通过上位机解算出机身位姿信息,但考虑到全站仪在测量过程中的移站问题,操作过程繁琐,难以满足行业需求。基于 iGPS 的位姿测量方法^[10]因其系统结构较为复杂,需人工频繁标定,且测量范围较短,不具有很强的工程实用性。

而在近年来,视觉测量作为光电传感器位姿检测技术的一种,依靠非接触式的测量方法,以及结构简单、实时性强、精度高等优势,正逐步成为国内外学者们的研究热点:在 1992 年 HURTEAU R 等^[11]就提出了利用工业相机与人工视觉组成光学探测器来测量矿用车辆相对于计划线的位置偏差。DEBEUNNE C 等^[12]针对现有的视觉 SLAM、基于 LiDAR 的 SLAM 以及视觉-LiDAR 融合技术进行了全面阐述;ZHANG 等^[13]提出了一种基于视觉 SLAM 的掘进机机身姿态估计方法,利用 RGB-D 相机采集机身周围环境数据,基于 RANSAC+ICP 模型来对掘进机位姿测量模型进行优化,以实现姿态测量功能。张凯^[14]采用单目视觉测量技术,通过识别相邻图像帧中的顶板特征,结合图像匹配与 PNP 算法求解出掘进机位姿参数;张旭辉团队^[15-16]利用单目视觉测量原理和激光点-线特征构建了掘进机位姿解算模型,通过工业相机采集激光光斑与激光束图像进而解算掘进机位姿,提高了位姿解算精度,并通过选用合适的数学模型有效解决了机身轨迹跟踪控制问题;杜雨馨等^[17]利用机器视觉对悬臂

式掘进机机身位姿进行检测,以十字激光器为基准,建立位姿解算模型,再经图像处理后解算出掘进机位姿参数。YANG 等^[18]针对惯性导航系统的局限性,采用了单目视觉测量技术与捷联惯导相结合的方式,通过工业相机拍摄光斑图像来获取掘进机的位置信息,同时结合 INS 来对掘进机的实时方位角进行测量,实现了掘进机机身五自由度空间位姿的测量。然而,受煤矿井下各种复杂因素的影响,上述方法的测量性能与可靠性还待进一步研究。

基于以上研究背景,为克服掘锚机机身定位难题,进一步提高位姿测量精度,提出一种基于双屏视觉标靶的掘锚机导向方法,通过双轴倾角仪辅助视觉成像,再融合高精度栅格标定等技术,实现了掘锚机机身位姿的高精度测量,并解算出机身关键点相对于巷道计划线的横向/纵向偏差,进而实现掘锚机导向。

该导向方法涉及的所有的光学测量功能均在双

屏视觉标靶内部实现,降低了恶劣的巷道环境对视觉测量的影响,大幅度提升了现场应用时的抗粉尘干扰能力。与 iGPS 等测量方式相比,该导向方法结构简单、所需测量通道较小,仅需一束指示激光即可完成掘进导向,且不必考虑频繁搬站的问题。相比于当前应用较为普遍的惯性导航技术,该方法具有精度高、成本低、能够实现长时间连续测量的优点;同时,掘进现场断电现象较为频繁,惯性导航系统在通电使用前均需 20~30 min 的初始对准时间,而该导向方法则无需考虑该问题,能有效提升巷道掘进工作效率。

1 算 法

1.1 双屏视觉标靶测量原理

为实现掘锚机定向导航,保证巷道掘进精度,首先需对系统坐标系进行定义。图 1 为基于双屏视觉标靶的掘锚机导向系统结构。

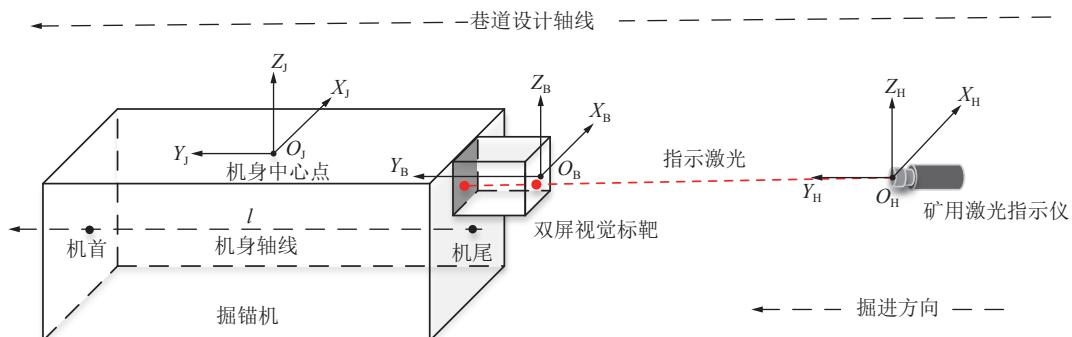


图 1 坐标系构建示意

Fig.1 Schematic of coordinates system construction

用一刚性长方体模拟掘锚机机身^[19],以其机身中心为原点,建立机身坐标系 $O_J-X_JY_JZ_J$: O_JY_J 轴平行于掘锚机机身轴线,掘进方向为正向; O_JX_J 轴垂直于 O_JY_J 轴,方向水平向右; O_JZ_J 轴垂直于机身轴线,方向竖直向上。以双屏视觉标靶前屏中心为原点建立标靶坐标系 $O_B-X_BY_BZ_B$ 。机身坐标系与标靶坐标系为同一刚体坐标系,且服从右手定则。在地测站确定巷道掘进方向后,先利用全站仪打出指示激光,使其与巷道计划线平行;此时可获得指示激光在全站仪坐标系 $O-XYZ$ (左手系)下的水平角与垂直角。再通过吊棉线的方式(在全站仪发射的激光光线上吊棉线,并撤去全站仪,使矿用激光指示仪发射的指示激光穿过所有棉线),将全站仪更换为矿用激光指示仪,并在矿用激光指示仪位置建立工程坐标系 $O_H-X_HY_HZ_H$ (右手系, X_H 、 Y_H 、 Z_H 轴分别对应全站仪坐标系的 Y 、 X 、 Z 轴),则指示激光在工程坐标系下的水平角 θ_h 与垂直角 θ_v 为已知量。

为使掘锚机按照巷道计划线的方向掘进,通常情况下需对工程坐标系中掘锚机机身的六自由度空间位姿进行测量,进而求得机身关键点(机首、机身中心、机尾三点)相对于巷道设计轴线的实时横向/纵向偏差。而根据双屏视觉标靶的结构特性,当指示激光射向标靶并在前、后靶面上形成光斑后,以前屏实时光斑质心为原点建立测量坐标系 $O_H-X_HY_HZ_H$ (该坐标系方向与工程坐标系方向相同),即可在该坐标系下解算出掘锚机机身关键点相对于巷道设计轴线的横向/纵向偏差,而无需进行标靶坐标系、工程坐标系间平移变换。

机身关键点在机身坐标系下的空间坐标可通过始发零位测量标定获得,且机身中心点为该坐标系原点 O_J 。因此,仅需求得点 O_J 在测量坐标系下的空间坐标 O_H^J ,即可实现所有机身关键点横向/纵向偏差测量。

通过坐标变换链的方式,对机身坐标系、标靶坐标系和测量坐标系进行一系列坐标变换^[20],则空间坐

标 O_J^H 的数学表达式可写为

$$O_J^H = R_B^H \left[(R_J^B O_J^J + T_J^B) + T^B \right] \quad (1)$$

由式(1)可知:需先求得中间变量 R_J^B 、 T_J^B 、 T^B 、 R_B^H ,才能解算出三维空间坐标 O_J^H 。掘锚机机身与双屏视觉标靶处于同一刚体结构中,通过在始发零位进行测量标定,即可获得机身关键点与双屏视觉标靶的空间结构关系,进而解算出机身坐标系与标靶坐标系间的旋转矩阵 R_J^B 与平移矩阵 T_J^B ^[21-22]。平移矩阵 T^B 的元素由标靶坐标系下前屏光斑质心的空间坐标 T_f^B 构成; R_B^H 为标靶坐标系与测量坐标系间的旋转矩阵,上述2个变量可通过标靶姿态解算的方式获得。

1.2 姿态测量

根据双屏视觉标靶的结构特性,利用视觉测量、高精度栅格标定等技术建立点的2D-3D映射关系,再通过栅格索引的方式获取靶面光斑的实时空间坐标,最后根据坐标变换、欧拉角解算等原理,结合双轴倾角仪即可解算出机身中心点在测量坐标系下的空间坐标 O_J^H ,实现掘锚机机身位姿和机身关键点的横向/纵向偏差测量。

1.2.1 双屏视觉标靶结构

图2即为双屏视觉标靶,透明感光成像屏(前屏)和黑色磨砂感光成像屏(后屏)被竖直安装在双屏视觉标靶支架上,组成标靶靶面,2个工业相机分别用于拍摄前、后屏光斑图像,且相机与靶面夹角约为27°。双轴倾角仪固定在双屏视觉标靶底端,用于测量标靶的俯仰角与滚转角。标靶尺寸为400 mm×400 mm×850 mm。

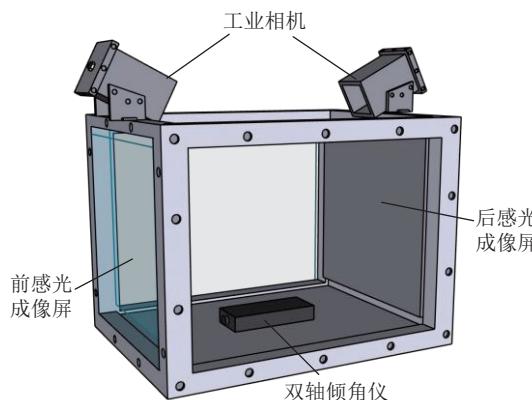


图2 双屏视觉标靶结构示意

Fig.2 Schematic of dual-screen visual target

1.2.2 标靶姿态解算

根据1.2.1节所述,需利用标靶姿态解算法对旋转矩阵 R_B^H 和平移矩阵 T^B 进行求解,进而获得掘锚机机身的实时位姿。标靶姿态解算流程如下:

全站仪每隔一定的时间在双屏视觉标靶感光屏上标定一个点,并测量其空间坐标;同时以该点为基准建立栅格,对栅格角点的空间坐标进行测量。重复上述步骤,直至将标靶靶面划分为50×50的栅格阵列,最终完成栅格标定^[23]。利用坐标变换的方式,将全站仪测得的栅格角点的空间坐标转换到标靶坐标系下。标定过程中工业相机用于抓取感光屏上出现的光斑,经过图像处理、区域分割、质心提取等,获得光斑质心的图像坐标 (U, V) ^[24-26]。将上述方法测得的每个栅格角点的图像坐标与三维空间坐标联立,建立2D-3D映射关系,形成坐标点云数据。考虑到前感光屏为透明材质,在对其进行标定时可用一张黑色磨砂膜将其覆盖。由全站仪技术参数可知,栅格角点的空间坐标测量精度为 $2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$, D 为实测距离。图3即为栅格标定原理。

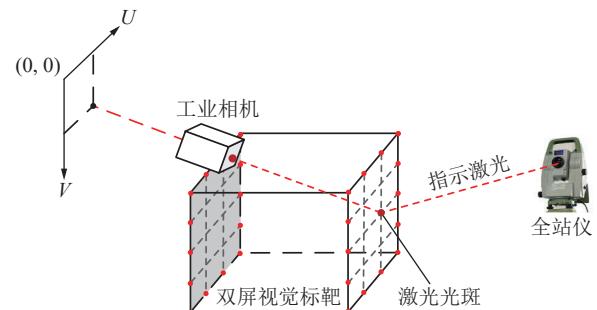


图3 栅格标定原理

Fig.3 Grid calibration principle

图4为栅格索引原理。基于上述标定结果,当指示激光射向标靶靶面后,根据所获得的光斑质心的图像坐标 (U_0, V_0) 即可确定出光斑质心所在栅格阵列中4个角点的位置,再根据点的2D-3D映射关系索引出4个栅格角点的空间坐标,最终获得光斑质心在标靶坐标系下的实时空间坐标^[27]。图中row、col分别代表栅格角点所在的行数、列数,用于索引相应的3D空间坐标。

通过上述方法解算出的前、后感光屏上光斑质心在标靶坐标系下的实时空间坐标 T_f^B 、 T_b^B 为

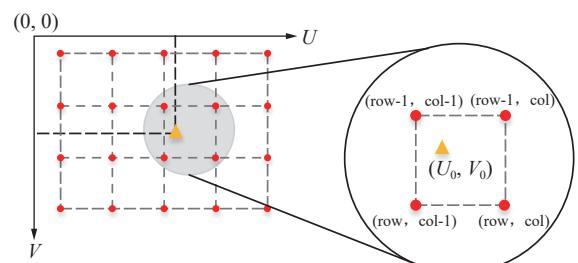


图4 栅格索引原理示意

Fig.4 Schematic diagram of grid indexing principle

$$\begin{cases} T_f^B = (X_{B1}, Y_{B1}, Z_{B1}) \\ T_b^B = (X_{B2}, Y_{B2}, Z_{B2}) \end{cases} \quad (2)$$

则平移矩阵 \mathbf{T}^B 可表示为

$$\mathbf{T}^B = [X_{B1} \ Y_{B1} \ Z_{B1}]^T \quad (3)$$

指示激光在标靶坐标系下的单位方向向量 \mathbf{l}_B 可表示为

$$\mathbf{l}_B = \frac{T_b^B - T_f^B}{|T_b^B - T_f^B|} \quad (4)$$

根据1.1节可知:测量坐标系与工程坐标系方向相同,且指示激光在工程坐标系下的水平角 θ_{hz} 与垂直角 θ_v 为已知量,则测量坐标系下指示激光的水平角 θ_{hz}^H 与垂直角 θ_v^H 为

$$\begin{cases} \theta_{hz}^H = \theta_{hz} \\ \theta_v^H = \theta_v \end{cases} \quad (5)$$

如图5所示,在测量坐标系下,取指示激光直线上一点 O_1^H ,使得向量 $\mathbf{O}_H O_1^H$ 模长为1,则点 O_1^H 的三维空间坐标 (X_1^H, Y_1^H, Z_1^H) 可表示为

$$\begin{cases} X_1^H = \cos(\theta_v^H) \sin(\theta_{hz}^H) \\ Y_1^H = \cos(\theta_v^H) \cos(\theta_{hz}^H) \\ Z_1^H = \sin(\theta_v^H) \end{cases} \quad (6)$$

指示激光在测量坐标系下的单位方向向量 \mathbf{l}_H 可表示为

$$\mathbf{l}_H = \frac{\mathbf{O}_1^H - \mathbf{O}_H}{|\mathbf{O}_1^H - \mathbf{O}_H|} \quad (7)$$

$$\mathbf{l}_B = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \mathbf{l}_H \quad (13)$$

实时俯仰角 α 、滚转角 β 可由标靶结构中的双轴倾角仪解算得出,将其代入式(13),即可求得标靶的实时偏航角 γ ,进而解算出旋转矩阵 \mathbf{R}_z^B ^[28]。

最后,标靶坐标系与测量坐标系间的旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R}_B^H = (\mathbf{R}_H^B)^{-1} \quad (14)$$

综上所述,平移矩阵 \mathbf{T}^B 可由栅格标定、索引方式求得,旋转矩阵 \mathbf{R}_B^H 可通过坐标变换与欧拉角计算式求得。将 \mathbf{R}_J^B 、 \mathbf{T}_J^B 、 \mathbf{T}^B 、 \mathbf{R}_B^H 代入式(1),即可知掘锚机机身中心点 O_J 在测量坐标系下的实时空间坐标 O_J^H 。

1.3 横向/纵向偏差测量

在解算出实时空间坐标 O_J^H 后,根据点与直线的相对位置关系,可获得掘锚机机身中心点 O_J^H 到巷道设计轴线的最短距离,即为横向/纵向偏差。

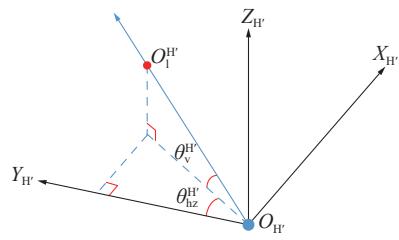


图5 单位方向向量计算模型
Fig.5 Computation model of unit direction vector

根据坐标变换原理可知单位方向向量 \mathbf{l}_B 与 \mathbf{l}_H 之间的转换关系式为

$$\mathbf{l}_B = \mathbf{R}_H^B \mathbf{l}_H \quad (8)$$

\mathbf{R}_H^B 的数学表达式为

$$\mathbf{R}_H^B = \mathbf{R}_y^B \mathbf{R}_x^B \mathbf{R}_z^B \quad (9)$$

式(9)中的旋转矩阵 \mathbf{R}_x^B 、 \mathbf{R}_y^B 、 \mathbf{R}_z^B 分别由双屏视觉标靶的实时俯仰角 α 、滚转角 β 和偏航角 γ 决定,即为

$$\mathbf{R}_x^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_y^B = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_z^B = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

联立式(9)~(12),可将式(8)表示为

测量原理如图6所示。以测量坐标系 $O_H - X_H Y_H Z_H$ 为基准建立巷道水平面与垂直面。直线 L 为矿用激光指示仪发射的指示激光,用于模拟巷道计划线,点 A 代表掘锚机机身中心点, L_1 、 A' 、 L_2 、 A'' 分别代表直线 L 与点 A 在水平面与垂直面的投影线(点)。分别过点 A' 、 A'' 向直线 L_1 、 L_2 做垂线,交点记为 E 、 F 。按照本文的偏差定义可知, $A'E$ 、 $A''F$ 即为机身中心点相对于巷道计划线的横向、纵向偏差。

已知入射激光在测量坐标系下的水平角 θ_{hz}^H 与垂直角 θ_v^H ,可求得其在测量坐标系下的横向旋转矩阵 \mathbf{R}_z^H 与纵向旋转矩阵 \mathbf{R}_x^H ^[29]:

$$\mathbf{R}_z^H = \begin{bmatrix} \cos \theta_{hz}^H & \sin \theta_{hz}^H & 0 \\ -\sin \theta_{hz}^H & \cos \theta_{hz}^H & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

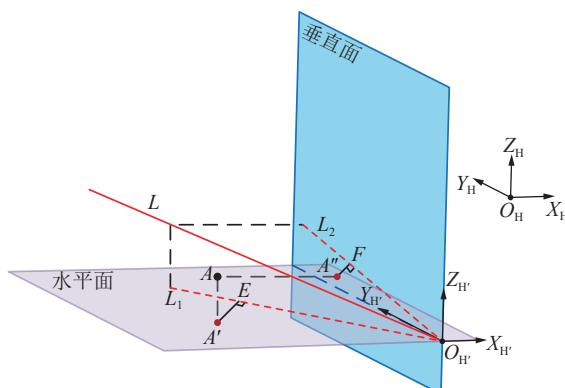


图 6 横向/纵向偏差测量原理

Fig.6 Principle of horizontal/vertical deviation measurement

$$\mathbf{R}_x^{H'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_v^{H'} & \sin \theta_v^{H'} \\ 0 & -\sin \theta_v^{H'} & \cos \theta_v^{H'} \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据式(15)、(16)即可求得在测量坐标系下掘锚机机身中心点相对于巷道设计轴线的横向/纵向偏差 $S_{hz}^{H'}$ 和 $S_v^{H'}$ 为

$$\begin{cases} S_{hz}^{H'} = \mathbf{R}_z^{H'} O_J^{H'} \\ S_v^{H'} = \mathbf{R}_x^{H'} O_J^{H'} \end{cases} \quad (17)$$

1.4 脱靶分析

针对掘锚机在工作过程中因机身横向偏差过大而导致双屏视觉标靶脱靶的问题, 进行如下分析。

图 7 为双屏视觉标靶俯视。已知标靶尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 850 \text{ mm}$ 。 AB 、 CD 分别代表双屏视觉标靶前、后感光屏, 点 P 为矩形 $ABCD$ 对角线的交点。假设在初始时刻, 指示激光 l 与标靶轴线重合。规定顺时针旋转为正方向。

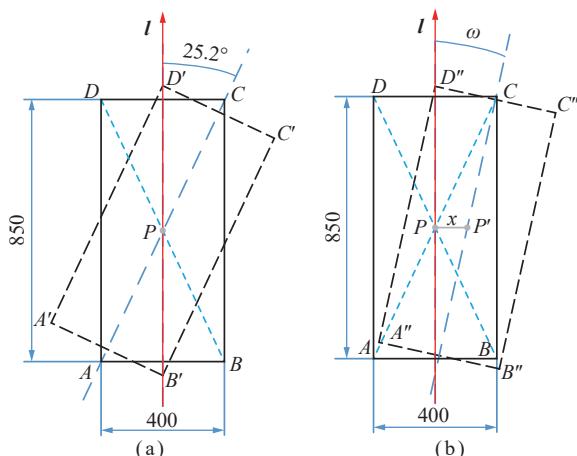


图 7 脱靶分析模型

Fig.7 Analysis model of off-target

设 PP' 为标靶的横向偏差 $|x|$, $\pm\omega$ 为标靶的可旋转

角度。根据几何关系可求得横向偏差 $|x|$ 与旋转角度 ω 之间的函数关系式为

$$\omega = \arccos\left(\frac{|x|}{\sqrt{220625}}\right) + \arctan\left(\frac{8}{17}\right) - 90 \quad (18)$$

其函数图像如图 8 所示。

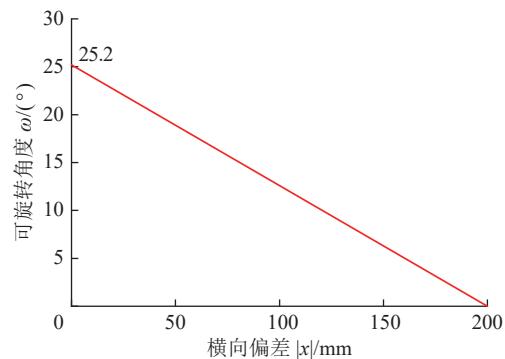


图 8 横向偏差-旋转角度范围关系

Fig.8 Diagram between horizontal deviation and the range of rotation angle

当 $|x|=0$ 时 (即不出现横向偏差, 如图 7(a) 所示), 由图 8 可知, 标靶的最大可旋转角度为 $\pm 25.2^\circ$, 在此范围内无需考虑脱靶问题。

当 $|x|\neq 0$ 时 (即标靶出现横向偏差, 如图 7(b) 所示), 根据图 8 可知: 随着横向偏差 $|x|$ 逐渐增大, 在确保不脱靶的情况下, 标靶可旋转的角度逐渐减小。

对于因纵向偏差而导致脱靶的可能性分析可通类比获得。在掘锚机掘进过程中, 机身前进速度缓慢, 且该导向方法的目的是对掘锚机机身位姿与机身关键点的横向/纵向偏差进行测量, 进而为机身偏差纠正提供数据支撑。当掘锚机机身相对于巷道设计轴线的横向/纵向偏差过大时, 工作人员应及时调整掘进路线, 以保证现场施工精度, 同时降低双屏视觉标靶的脱靶概率。

2 实验结果与分析

为对该导向方法的有效性进行验证, 本文设计了偏航角精度评定实验和横向/纵向偏差测量精度评定实验。表 1 为实验过程中使用的硬件设备技术参数。

2.1 偏航角精度评定实验

搭建如图 9 所示的实验平台, 对系统偏航角的重复性测量精度与绝对测量精度进行评定。实验过程中使用的硬件设备包括双屏视觉标靶、高精度一维转台和全站仪。

将双屏视觉标靶固定在高精度一维转台上, 形成稳定的刚体结构 (此处无需考虑一维转台与双屏视觉

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameter

设备	技术参数
双轴倾角仪	测角精度: $\leq 0.01^\circ$
	测角分辨率: 0.0001°
高精度一维转台	精度: $2''$
工业相机	型号: Basler Aca1300-60gm 分辨率: $1280 \text{ px} \times 1024 \text{ px}$ 像素尺寸: $5.3 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$
全站仪	型号: Leica TS12
	测量精度(无棱镜模式): $2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$
	测角精度: $2''$ 分辨率: 0.1 mm
矿用激光指示仪	型号: 徐州天文 YBJ-1000 功率: 10 mW

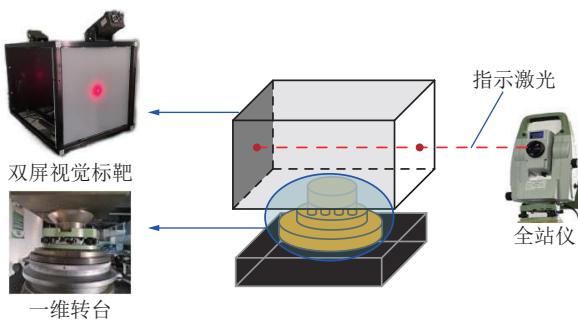


图 9 偏航角精度评定实验平台

Fig.9 Experiment platform of yaw angle accuracy evaluation

标靶的初始配准问题,无论一维转台与标靶的旋转中心是否重合,2者的旋转角度均保持一致)。全站仪置于标靶后方直线距离约9 m处。实验过程中,为精确评定双屏视觉标靶偏航角的测量精度,分别调整一维转台与全站仪底部的调平旋钮,将2者调至同一水平状态;同时结合标靶底部的双轴倾角仪以消除在实验过程中俯仰角与滚转角对测量结果的影响。

2.1.1 光斑质心提取稳定性分析

光斑质心提取是影响偏航角测量精度的重要因素。在对偏航角精度进行评定前,应先设计实验对光斑质心提取稳定性进行分析。

如图9所示,一维转台保持静置,指示激光射向靶面,利用工业相机连续采集200组光斑图像,经过图像处理、区域分割、质心提取等步骤后,即可获得光斑质心在图像坐标系下的坐标(U, V)。实验数据如图10所示。

图10分别为实验采集的光斑质心图像坐标的 U 、 V 轴数据。经统计分析可知: U 、 V 坐标的峰峰值分别

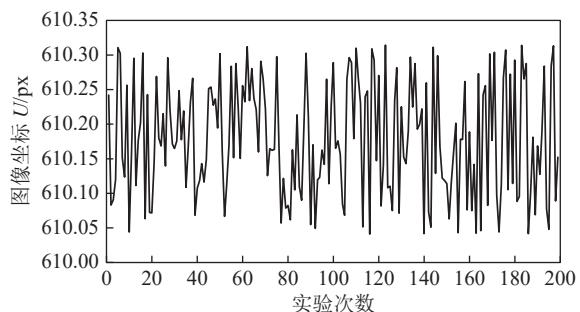
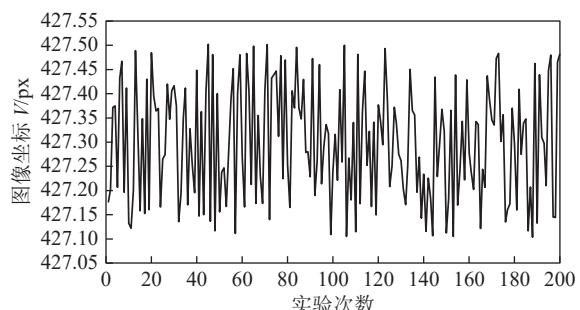
(a) 光斑质心点图像坐标 U 轴数据(b) 光斑质心点图像坐标 V 轴数据

图 10 光斑质心图像坐标

Fig.10 Image coordinates of spot centroid

为0.27、0.39 px;平均值分别为610.18、427.29 px;标准差分别为0.05、0.14 px。综上所述,光斑质心提取不确定度小于0.5 px,能够满足现场施工要求。

2.1.2 偏航角重复性测量精度评定实验

设计该实验以评定偏航角重复性测量精度。如图9所示,高精度一维转台保持静置,工业相机采集光斑图像,利用标靶姿态解算算法对偏航角进行500次重复测量,实验结果如图11所示。

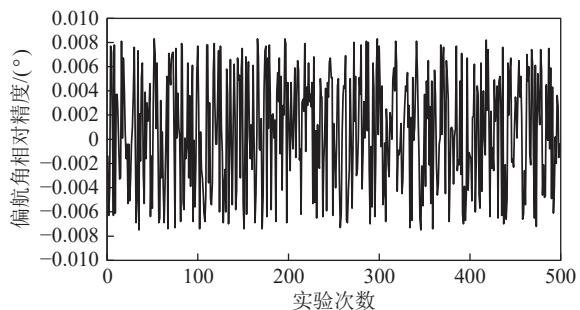


图 11 偏航角重复性测量精度评定实验结果

Fig.11 Experimental results of evaluation for yaw angle repeatability measurement accuracy

分析数据可知,偏航角重复性测量误差峰峰值为0.015 8°,均值为0.000 644°,标准差为0.004 63°。实验结果表明,该导向方法的偏航角重复性测量精度优于0.01°。

2.1.3 偏航角绝对测量精度评定实验

设计该实验以评定偏航角绝对测量精度。如图9

所示,当指示激光在标靶前后感光屏上形成光斑后,调整一维转台的转动角度,作为标靶的偏航角变动实际值,同时将其与导向系统解算出的偏航角变动测量值作差,即可获得标靶偏航角的绝对测量精度。

图 12 为获得的实验数据,分析可知:偏航角绝对测量误差峰峰值为 0.092° ,均值为 -0.004° ,标准差为 0.016° 。综上所述,该方法的偏航角绝对测量误差小于 0.05° ,能够满足现场施工要求^[30-31]。

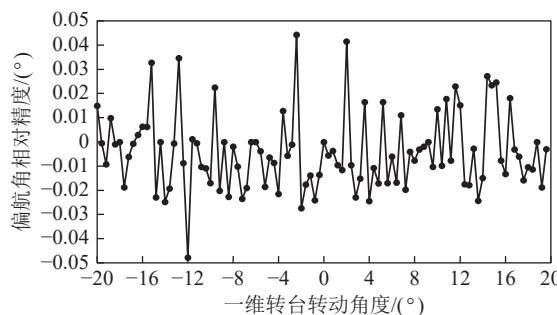


图 12 偏航角绝对测量精度评定实验结果

Fig.12 Experimental results of evaluation for yaw angle absolute measurement accuracy

2.2 横向/纵向偏差测量精度评定实验

为进一步验证该导向方法的可行性,设计了横向/



图 13 横向/纵向偏差测量精度评定实验环境

Fig.13 Experimental environment of evaluation for horizontal/vertical deviation measurement accuracy

分析数据可知:在实验室环境下,以全站仪指示激光为基准,测试距离为 15、40 m 时该导向方法的横向/纵向偏差测量误差分别小于 2、5 mm;以矿用激光指示仪发射的激光为基准,测试距离为 15、40 m 时的横向/纵向偏差测量误差分别小于 6、15 mm;均能满足巷道施工的精度要求^[30-31]。

在实验过程中,指示激光强度会随测试距离的增大而逐渐衰减,导致相机获取的光斑图像逐渐模糊,进而影响系统的纵向测量距离。因此,若要实现更大范围的高精度测量,则需进一步增强指示激光的能量

纵向偏差测量精度评定实验。实验中使用的设备有:双屏视觉标靶、全站仪、矿用激光指示仪、棱镜、测试工装。

搭建的实验平台如图 13 所示。双屏视觉标靶、棱镜、测试工装形成稳定的刚体结构,用于模拟掘锚机机身,2 块棱镜分别用于模拟掘锚机机身中心与机尾。通过模拟掘锚机始发零位的方式,用全站仪对关键数据进行测量。实验开始后,先利用全站仪设置计划线,同时模拟掘锚机向前推进 15~40 m,并将全站仪测得的实际偏差值与导向系统的测量结果进行对比,获得横向/纵向偏差绝对测量精度;实验结束后,再通过吊棉线的方式(如图 13 所示,在全站仪发射的激光光线上吊棉线,并撤去全站仪,使矿用激光指示仪发射的指示激光穿过所有棉线)将计划线激光更换为矿用激光指示仪,以模拟现场环境,重复上述步骤,最终完成横向/纵向偏差测量精度评定实验。

表 2 为实验测得的数据。其中 (T'_0, T'_1, T'_2) 、 (T''_0, T''_1, T''_2) 分别代表导向系统与全站仪测得的机首、机身中心、机尾三点相对于计划线的偏差测量值与实际值, $(\Delta T_0, \Delta T_1, \Delta T_2)$ 则表示测量误差。机首坐标可通过机身中心与机尾 2 点求得。

强度和稳定性。

2.3 误差分析

由测量原理可知,该导向方法能够实现掘锚机位姿测量,是通过双屏视觉标靶栅格标定以及姿态解算获得的。而在此过程中,影响系统测量精度的主要因素有:光斑质心提取误差、全站仪坐标测量误差、坐标系间转换误差、双轴倾角仪测量误差、光矢量解算误差等。

(1) 光斑质心提取误差。该导向系统采用 Basler Aca1300-60gm 型工业相机,分辨率为 $1280 \text{ px} \times$

表2 横向/纵向偏差绝对测量精度评定实验数据

Table 2 Experimental data of evaluation for horizontal/vertical deviation absolute measurement accuracy

偏差	基准线	测量距离/m	$(T'_0, T'_1, T'_2)/\text{mm}$	$(T''_0, T''_1, T''_2)/\text{mm}$	$(\Delta T_0, \Delta T_1, \Delta T_2)/\text{mm}$
横向	全站仪	15	(23.8, 17.5, 22.6)	(24.5, 16.9, 23.8)	(-0.7, 0.6, -1.2)
			(29.6, 31.2, 23.8)	(30.5, 33.0, 23.1)	(-0.9, -1.8, 0.7)
		40	(29.2, 20.8, 15.1)	(28.7, 18.6, 17.8)	(0.5, 2.2, -2.7)
			(32.1, 101.5, 114.6)	(30.5, 97.6, 113.5)	(1.6, 3.9, 1.1)
	矿用激光指示仪	40	(47.3, 27.6, 20.9)	(48.3, 25.3, 20.5)	(-1.0, 2.3, 0.4)
			(-62.0, 11.1, 26.5)	(-57.5, 9.7, 25.1)	(-4.5, 1.4, 1.4)
		15	(75.9, 129.5, 141.2)	(74.5, 126.8, 139.1)	(1.4, 2.7, 2.1)
			(-394.5, 112.0, 234.1)	(-400.3, 106.4, 228.5)	(5.8, 5.6, 5.6)
纵向	全站仪	40	(274.4, 207.2, 194.8)	(262.1, 192.8, 184.6)	(12.3, 14.4, 10.2)
			(52.6, 120.3, 137.0)	(41.2, 108.6, 124.3)	(11.4, 11.7, 12.7)
		15	(-181.1, -37.0, 2.9)	(-194.4, -49.8, -10.3)	(13.3, 12.8, 13.2)
			(-528.9, 1.3, 129.7)	(-542.9, 14.6, 118.5)	(14.0, -13.3, 11.2)
	矿用激光指示仪	15	(30.5, 25.6, 20.9)	(30.2, 24.8, 21.2)	(0.3, 0.8, -0.3)
			(47.3, 25.8, 22.3)	(46.5, 26.9, 23.5)	(0.8, -1.1, -1.2)
		40	(77.5, 129.6, 141.8)	(74.5, 126.7, 139.9)	(3.0, 2.9, 1.9)
			(37.3, 31.8, -21.3)	(37.5, 29.3, -22.6)	(-0.2, 2.5, 1.3)
纵向	全站仪	40	(69.3, 40.0, 91.9)	(68.0, 42.4, 88.8)	(1.3, -2.4, -3.1)
			(-74.5, 108.8, 133.5)	(-73.3, 104.5, 134.6)	(-1.2, 4.3, -1.1)
		15	(-63.3, 11.6, 28.9)	(-57.9, 9.5, 24.4)	(-5.4, 2.1, 4.5)
			(47.3, 25.4, 20.6)	(49.9, 22.6, 24.7)	(-2.6, 2.8, -4.1)
	矿用激光指示仪	40	(-71.5, 1.8, 19.0)	(-85.6, -11.8, 6.3)	(14.1, 13.6, 12.7)
			(-90.7, -7.1, 12.3)	(-103.1, -22.0, -1.8)	(12.4, 14.9, 14.1)
		15	(259.6, 43.8, -9.7)	(246.8, 32.1, -21.0)	(12.8, 11.7, 11.3)
			(246.8, 41.3, -8.0)	(232.3, 28.8, -22.6)	(14.5, 12.5, 14.6)

1 024 px。由光斑质心提取实验可知,光斑质心提取不确定度小于0.5 px。

(2) 全站仪坐标测量误差。实验过程中采用了Leica TS12型全站仪,无棱镜模式下测量精度为2 mm+ $2 \times 10^{-6} D$,分辨率为0.1 mm。

(3) 坐标系间转换误差。测量过程中存在多次坐标变换。经验证,坐标系转换误差约为0.01 mm。

(4) 双轴倾角仪测量误差:考虑到测量过程中振动对加速度传感器的影响,采用抗振倾角仪,其两轴测角精度 $\leq 0.01^\circ$,测角分辨率为0.000 1°。

(5) 光矢量解算误差:系统在对光矢量进行解算时存在一定误差。根据实验可知,光矢量解算精度约为0.01°。

在栅格标定过程中,光斑质心提取误差、全站仪坐标测量误差、坐标系转换误差会对光斑质心的空间坐标测量精度造成影响;而在下一步的姿态解算过程中,又因双轴倾角仪测量误差、光矢量解算误差因素的影响,最终影响标靶偏航角的测量精度。通过引入

误差源进行分析,并结合上述实验结果可知:偏航角重复性测量精度优于 0.01° 、绝对测量误差小于 0.05° ,上述误差源对系统测量精度影响较小。

此外,该方法还可通过后续优化进一步减小系统误差:①采用精度更高的工业相机来获取光斑图像,同时对系统算法进行优化,以减小光斑质心提取误差;②采用更高精度的全站仪来进行栅格标定,以减小全站仪坐标测量误差;③进一步优化倾角仪的抗振性能,增强其稳定性和可靠性,同时结合双轴倾角仪角度测量值建立误差补偿矩阵,以对姿态参数进行校正,进而减小倾角仪的测量误差。

2.4 现场应用

基于本方法研发的掘锚一体机自动导向系统已成功应用于鄂尔多斯市龙王沟煤矿61607辅运回采巷道项目并完成始发。该项目位于地下深层400 m,巷道总长约2 000 m,掘锚机编号为ABM20-063。在现场应用过程中,采用了本安型防爆技术对电气设备结构进行设计,同时在标靶外部增加防护罩,以提高

设备的防尘、防水能力;该系统各个组件及整套装置已通过了国家煤矿安全认证及整机装置关联试验认证。该测量装置安装在掘锚机右上走道板处,图14即为现场应用。图15为该导向系统软件界面,图中UWB装置是对掘锚机的掘进里程进行测量。

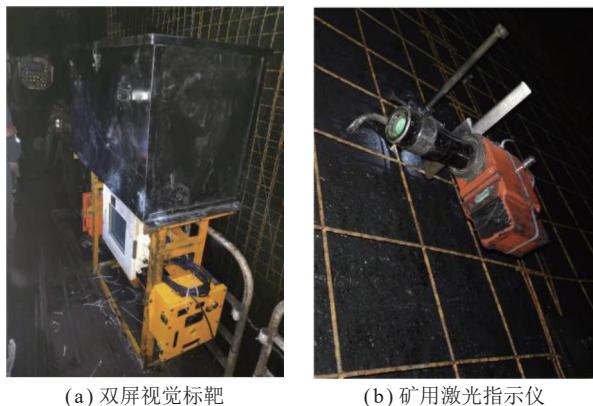


图14 导向系统现场应用

Fig.14 Schematic diagram of field application



图15 系统软件界面

Fig.15 Software interface of the system

受掘进工作面高粉尘、低亮度等多种外界因素干扰,以及掘锚机机身持续振动的影响,该导向系统在现场工作环境中能够实现厘米级定位精度,且偏航角测量精度优于 0.1° ^[32]。

3 结 论

(1) 提出一种基于双屏视觉标靶的掘锚机导向方法,具有精度高、成本低等优点,而相比于其他环境感知类光电测量方式,该方法中涉及的光学测量功能均在双屏视觉标靶内部完成,具有较强的抗粉尘干扰能力。

(2) 通过双轴倾角仪辅助视觉成像,融合高精度栅格标定等技术,根据坐标变换、欧拉角解算原理,实现

了掘锚机机身六自由度位姿以及机身关键点相对于巷道设计轴线的实时横向/纵向偏差的高精度测量。

(3) 测试距离为9 m时的偏航角重复性测量精度优于 0.01° 、绝对测量误差小于0.05°;模拟掘锚机行进15~40 m,用全站仪与矿用激光指示仪设置计划线时机身关键点横向/纵向偏差测量误差分别小于5、15 mm。在现场实际应用中,能够达到厘米级定位精度,具有较强的工程实用性和推广价值。

在未来的工作中,笔者将会对以下问题做进一步研究:针对现场应用过程中掘锚机摆角幅度过大时可能会出现的脱靶问题,后续工作将对现场掘进环境、标靶尺寸、相机参数等进行深入考究,取得最优平衡,以降低脱靶概率;针对掘锚机机身关键特征点与双屏视觉标靶位姿之间标定步骤繁琐的问题,将进一步对标定方法进行优化,以简化现场操作流程。

参考文献(References):

- [1] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34~41.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huawei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34~41.
- [2] 葛世荣,王世佳,曹波,等.智能采运机组自主定位原理与技术[J].煤炭学报,2022,47(1):75~86.
GE Shirong, WANG Shijia, CAO Bo, et al. Autonomous positioning principle and technology of intelligent shearer and conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 75~86.
- [3] 薛旭升,张旭辉,毛清华,等.基于双目视觉的掘进机器人定位定向方法研究[J].西安科技大学学报,2020,40(5):781~789.
XUE Xusheng, ZHANG Xuhui, MAO Qinghua, et al. Localization and orientation method of roadheader robot based on binocular vision[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 781~789.
- [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 Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310~320.
- [5] 田原.悬臂式掘进机导航技术现状及其发展方向[J].工矿自动化,2017,43(8):37~43.
TIAN Yuan. Present situation and development direction of navigation technology of boom-type roadheader[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(8): 37~43.
- [6] 雷孟宇,张旭辉,杨文娟,等.煤矿掘进装备视觉位姿检测与控制研究现状与趋势[J].煤炭学报,2021,46(S2):1135~1148.
LEI Mengyu, ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, et al. Current status and trend of research on visual pose detection and control of tunneling equipment in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1135~1148.
- [7] ROMAN M, JOSIF B, NIKOLAY D. Development of position system of a roadheader on a base of active IR-sensor[J]. Procedia Engi-

- eering, 2015, 100: 617–621.
- [8] 鲁程, 王世博, 葛世荣, 等. 多惯导冗余的采煤机定位原理及其合理性分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 746–753.
LU Cheng, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Redundant multi-INS positioning algorithm of shearer and analysis of its rationality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 746–753.
- [9] 朱信平, 李睿, 高娟, 等. 基于全站仪的掘进机机身位姿参数测量方法[J]. 煤炭工程, 2011, 43(6): 113–115.
ZHU Xinping, LI Rui, GAO Juan, et al. Total station based measurement method for body position parameters of roadheading machine[J]. *Coal Engineering*, 2011, 43(6): 113–115.
- [10] 陶云飞, 宗凯, 张敏俊, 等. 基于iGPS的掘进机单站多点分时机身位姿测量方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2611–2616.
TAO Yunfei, ZONG Kai, ZHANG Minjun, et al. A position and orientation measurement method of single-station' multipoint and time-sharing for roadheader body based on iGPS[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2611–2616.
- [11] HURTEAU R, ST-AMANT M, LAPERRIÈRE Y, et al. Optical guidance system for underground mine vehicles [C]//Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE Computer Society, 1992: 639–644.
- [12] DEBEUNNE C, VIVET D. A review of visual-LiDAR fusion based simultaneous localization and mapping[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 2068.
- [13] ZHANG W, ZHAI G, YUE Z, et al. Research on visual positioning of a roadheader and construction of an environment map[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4968.
- [14] 张凯. 基于顶板视觉的掘进机空间位姿检测方法研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2021.
ZHANG Kai. Research on spatial pose detection method of roadheader based on roof vision [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [15] 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[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2186–2196.
ZHANG Xuhui, ZHAO Jianxun, YANG Wenjuan, et al. Vision-based navigation and directional heading control technologies of boom-type roadheader[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2186–2196.
- [16] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 基于三激光束标靶的煤矿井下长距离视觉定位方法研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 986–1001.
YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, et al. Research on long distance vision localization method based on triple laser beam target in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 986–1001.
- [17] 杜雨馨, 刘停, 童敏明, 等. 基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2897–2906.
DU Yuxin, LIU Ting, TONG Minming, et al. Pose measurement system of boom-type roadheader based on machine vision[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2897–2906.
- [18] YANG J, ZHANG G, HUANG Z, et al. Research on position and orientation measurement method for roadheader based on vision/INS [C]//2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10621: 1062105.
- [19] 杜雨馨. 矿井悬臂式掘进机位姿感知及定位方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
DU Yuxin. Study on the pose perception and positioning mechanism of boom-type roadheader in mines [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [20] HUANG Z, XU Y, DU W, et al. A non-contact cutterhead dynamic coordinate measurement method for double shield TBM guidance based on photographic imaging [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021.
- [21] 高扬. 面向大型精密工程的六自由度测量技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
GAO Yang. Research on 6-DOF measurement in large-scale precision engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [22] 赵文斌. 智能盾构导向系统研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.
ZHAO Wenbin. On intelligent shield guidance system [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017.
- [23] SONG W, MIAO Z, WU H. Automatic calibration method based on improved camera calibration template[C]// Iet International Conference on Wireless. IET, 2013.
- [24] 石达顺, 唐朝晖. 基于统计高斯拟合的圆形光斑中心定位方法[J]. 测控技术, 2020, 39(7): 51–56.
SHI Dashun, TANG Zhaohui. Circular spot center location method based on statistical gaussian fitting[J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(7): 51–56.
- [25] 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.
JIANG Jiawen, KANG Jiehu, WU Bin. High precision positioning and compensation algorithm for laser spot center[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 362–367.
- [26] NEUMAYR R, HARKER M, O'LEARY P, et al. New approaches to machine vision based displacement analysis [C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE, 2012: 979–984.
- [27] 黄喆, 燕庆德, 邵震宇, 等. 基于双相机标靶的直线顶管掘进机导向方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 458–465.
HUANG Zhe, YAN Qingde, SHAO Zhenyu, et al. Guiding method of linear pipe jacking machine based on dual-camera target[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 458–465.
- [28] 马杰. 基于六自由度机器人自动焊缝检漏系统设计及虚拟仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
MA Jie. Design the automation leak detection system of welds and virtual simulation based on 6-DOF robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [29] 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 36.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿井巷工程质量验收规范: GB-50213—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [31] 中国煤炭建设协会. 煤矿井巷工程质量评价标准: NB/T-51029—2015[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.
- [32] 力信测量. 力信测量助力鄂尔多斯大唐国源龙王沟煤矿顺利始发 [EB/OL]. 2021.09.23[2021.11.20]. <https://mp.weixin.qq.com/s/3rLrrGzHK-5Wk3H1g1ToA>.