



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目： 基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量方法  
作者： 李馨茹，黄喆，李佳雄，赵世艺，祝凤娟  
DOI： 10.13364/j.issn.1672-6510.20240003  
网络首发日期： 2024-11-05  
引用格式： 李馨茹，黄喆，李佳雄，赵世艺，祝凤娟. 基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量方法[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240003>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20240003

## 基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量方法

李馨茹, 黄 喆, 李佳雄, 赵世艺, 祝凤娟  
(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

**摘要:** 针对现有煤矿巷道掘进机位姿测量技术中存在的测量精度低、设备布置繁琐等问题, 提出一种基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量技术。以视觉测量原理为基础, 融合双矢量定姿、标靶定位算法以及坐标变换技术, 能够精确解算出掘进机的位姿以及机身中心点相对巷道设计轴线的水平/垂直偏差。在实验室条件下搭建位姿测量系统实验平台, 进行位姿参数绝对测量精度和水平/垂直偏差绝对测量精度评定实验, 测量并统计分析了位姿参数、水平偏差和垂直偏差的误差情况。实验结果显示: 在 100 m 测试范围内, 机身姿态角的最大误差为  $-0.32^\circ$ , 机身位置测量最大误差为 8.5 mm, 水平偏差测量误差小于 7.3 mm, 垂直偏差测量误差小于 8.4 mm。将该方法应用于井下环境中进行测试, 测试结果表明: 该方法能够实现对掘进机机身的六自由度空间位姿的精确测量。

**关键词:** 煤矿巷道掘进机; 多目视觉; 双矢量定姿; 标靶定位; 位姿测量

中图分类号: TD421

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (2024)00-0000-00

### Position and Orientation Measurement Method for Coal Mine Roadheader Based on Multi-Vision Target

LI Xinru, HUANG Zhe, LI Jiexiong, ZHAO Shiyi, ZHU Fengjuan

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low measurement accuracy and cumbersome equipment arrangement in the existing position measurement technology of coal mine roadway boring machine, a position measurement technology of coal mine roadway boring machine based on binocular vision is proposed. Based on the principle of visual measurement, the integration of dual-vector posing, target positioning algorithms and coordinate transformation technology can accurately solve the position of the roadheader, as well as the horizontal/vertical deviation of the centre point of the machine body with respect to the axis of the roadway design. The experimental platform of the position measurement system was built under laboratory conditions, and the experiments of absolute measurement accuracy of position parameters and absolute measurement accuracy of horizontal/vertical deviation were carried out to measure and statistically analyse the errors of position parameters, horizontal deviation and vertical deviation. The experimental results show that the maximum error of the fuselage attitude angle is less than  $-0.32^\circ$ , the maximum error of the fuselage position is less than 8.5 mm, the horizontal deviation measurement error is less than 7.3 mm, and the vertical deviation measurement error is less than 8.4 mm within the 100 m test range. The method was applied to a downhole environment for testing, and the test results show that the method is capable of achieving accurate measurement of the six-degree-of-freedom spatial position of the body of a roadheader.

**Key words:** coal mine roadheader; multi-vision; double-vector attitude determination; target location; position and orientation measurement

收稿日期: 2024-01-05 修回日期: 2024-06-20

作者简介: 李馨茹(1999—), 女, 山西运城人, 硕士研究生; 通信作者: 黄 喆, 讲师, huangzhe@tust.edu.cn

煤炭是我国能源体系的支柱，在煤矿开采中，巷道掘进作为重要环节之一受到广泛关注。《煤炭工业发展“十三五”规划》把巷道高效掘进列为重点发展目标<sup>[1]</sup>。掘进机作为巷道掘进的核心设备，其智能化程度直接影响掘进效率和安全<sup>[2]</sup>。因此，提升煤矿巷道掘进机智能化水平成为当前研究的关键。

国内外学者针对掘进机位姿检测技术进行广泛研究，研究方向主要包括光电传感器定位、惯性定位、机器视觉定位三大类。

Halama 等<sup>[3]</sup>提出一种基于激光定位技术的煤矿掘进机定位系统。该系统通过联合定位传感器对反射器所反射激光的感知实现对掘进机的定位，并将掘进机的位置信息传递至操作人员处进行及时纠偏，实现掘进过程的可视化。吴淼等<sup>[4]</sup>提出基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机自主位姿测量方法，利用激光发射器发射旋转激光平面，经过掘进机后方安装固定的激光接收器并通过激光平面获取激光发射器相对其自身的方位。陶云飞等<sup>[5]</sup>对基于惯性导航技术的掘进机位姿测量系统的测量精度进行分析，研究掘进机在不同测量距离下位姿参数的测量精度。田原<sup>[6]</sup>提出基于零速修正的掘进机惯性导航定位方法，在较短的掘进机停车时间间隔内，利用二次曲线拟合惯性导航系统的速度误差曲线，经过积分得到位置误差曲线，从而修正惯性导航系统的位置测量值。张旭辉等<sup>[7]</sup>提出一种以激光点和激光束为特征的悬臂式掘进机机身位姿视觉测量技术，利用单目视觉测量技术，以巷道中激光指向仪的激光点和激光束为特征构建基于门形结构的掘进机机身位姿视觉测量模型，通过空间矩阵变换解算巷道中机身位姿。王学等<sup>[8]</sup>提出一种基于近红外双目立体视觉的悬臂式掘进机定位方案，以 LED 作为近红外标靶，构建掘进机特征信息。此外还引入一维卷积神经网络，预测掘进机截割部位的位姿变化，这一方案可以在视觉测量失效情况下发挥辅助定位作用。张凯<sup>[9]</sup>提出基于顶板视觉的位姿检测方法，通过对顶板的目标进行识别和特征提取，使用 PNP 算法求解掘进机的位姿。

上述方法为实现掘进机自主定位做出了很大贡献，但受制于恶劣的巷道环境，仍然存在长距离测量精度低、工况适配性弱等问题。基于以上研究背景，本文提出一种基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿解算技术。在井下巷道多粉尘、低照度的环境中，由于丁达尔效应，所以指示激光的光路痕迹更加明显，易于识别。本方法所用设备由多相机、倾

角传感器、高精度测量标靶屏组成，安装简便，不需要进行繁琐的巷道布置。与惯性导航等测量技术相比，在实现同等测量功能的条件下，具有成本低、测量精度高的优势。

## 1 技术方案

基于多目视觉标靶的掘进机位姿测量系统主要由双目相机、单目相机、高精度标靶屏、双轴倾斜仪组成，为防止因振动过大造成的角度变化，各设备之间设计为刚性固连关系，测量系统示意图如图 1 所示。

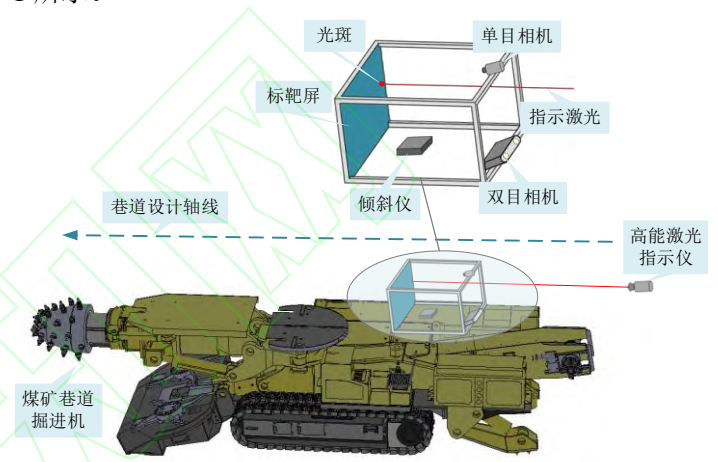


图 1 煤矿巷道掘进机测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system of coal mine roadheader

根据掘进机和测量系统之间的位置关系，建立空间坐标系，如图 2 所示。假设以激光指示仪发射中心为原点建立导航坐标系  $O_n - X_n Y_n Z_n$  (右手系)， $X_n$  轴指向为指示激光发射方向。以双轴倾斜仪中心为原点建立倾斜仪坐标系  $O_s - X_s Y_s Z_s$  (右手系)， $Y_s$  轴沿机身指向机头方向，与掘进机前进方向平行， $X_s$  轴垂直于机身前进方向， $Z_s$  轴垂直于  $X_s O_s Y_s$  平面，机身坐标系与倾斜仪坐标系固连，且服从右手定则；以指示激光在标靶屏上的落点为原点建立测量坐标系  $O_r - X_r Y_r Z_r$  (右手系)，由于测量坐标系和导航坐标系处于同一道指示激光上，因此测量坐标系与导航坐标系为平移关系，坐标系指向与导航坐标系相同；以标靶屏的左上角为原点建立标靶坐标系  $O_b - X_b Y_b Z_b$  (右手系)，以双目相机的左相机镜头光心为原点建立相机坐标系  $O_{c1} - X_{c1} Y_{c1} Z_{c1}$ ，右相机镜头光心为原点建立相机坐标系  $O_{c2} - X_{c2} Y_{c2} Z_{c2}$ ，以单目相机镜头光心为原点建立相机坐标系  $O_{c3} - X_{c3} Y_{c3} Z_{c3}$ 。

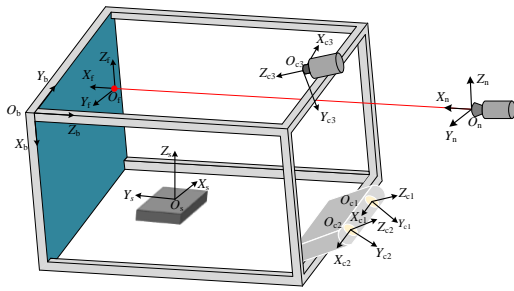


图2 坐标系构建示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system construction

基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量技术方案,如图3所示。该方案主要分为掘进机姿态测量、掘进机位置测量、掘进机偏差测量3个环节。

(1) 掘进机姿态测量。由安装在掘进机上的双目相机和双轴倾斜仪采集信息,分别解算出光矢量和重力矢量在掘进机机身坐标系下的表达,利用双矢量定姿算法,解算出机身姿态角。

(2) 掘进机位置测量。由单目相机实时拍摄光斑,经过灰度质心法解算出光斑质心坐标,结合机身姿态角以及特征点坐标,利用标靶标定算法,标定相机与标靶屏之间刚体位置关系,利用空间位置变换技术求解机身中心点坐标。

(3) 掘进机偏差测量。通过实时测量掘进机机身中心相对巷道设计轴线的水平/垂直偏差,确定掘进机是否偏离巷道设计轴线。

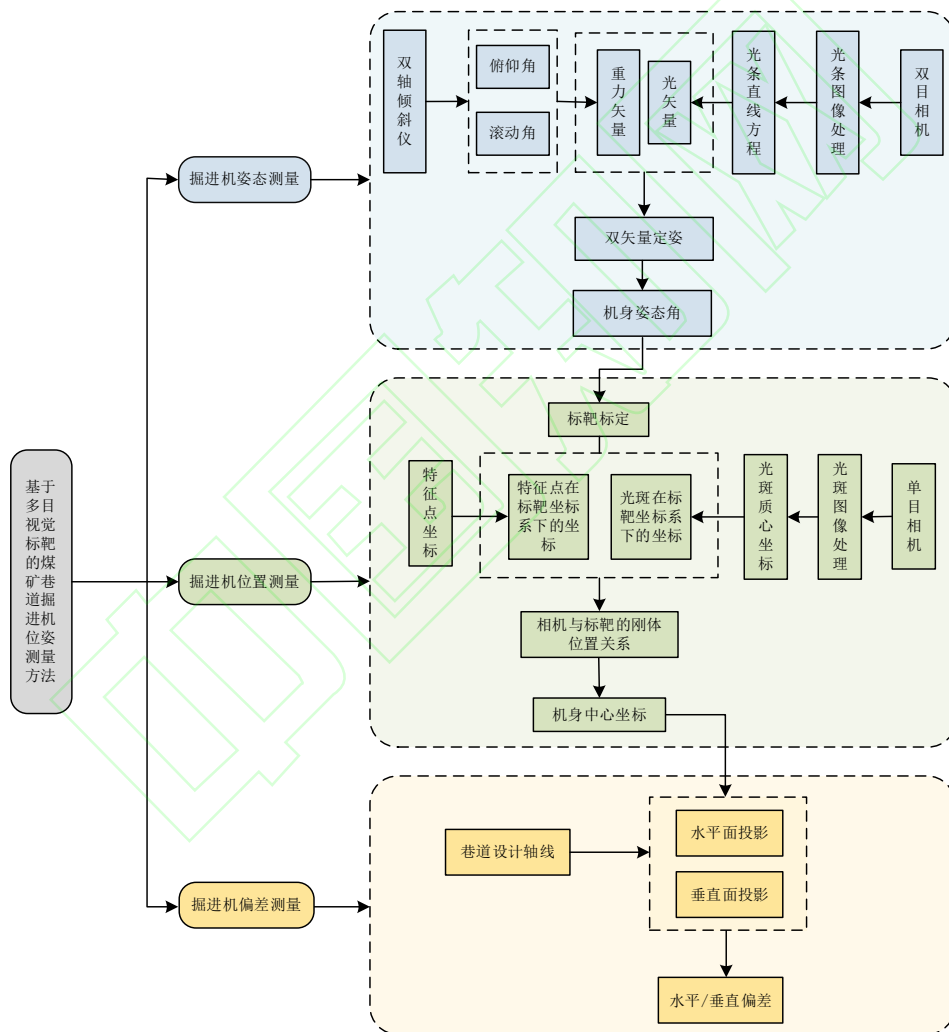


图3 技术方案

Fig. 3 Technical proposal

## 2 原理

### 2.1 双矢量定姿算法

在煤矿采掘工作过程中,由高能激光指示仪发

射出一道指示激光,利用双目相机和双轴倾斜仪分别对光条信息以及双轴姿态信息进行捕捉,解算光矢量和重力矢量分别在掘进机机体坐标系以及测量坐标系下的表达,基于双矢量定姿算法,完成机身姿态解算。



假设光矢量与重力矢量分别表示为  $l$  和  $g$ ，两个矢量在掘进机机身坐标系和测量坐标系下分别记为  $l_s$ 、 $g_s$ 、 $l_f$ 、 $g_f$ 。参考坐标系构建示意图如图 4 所示。

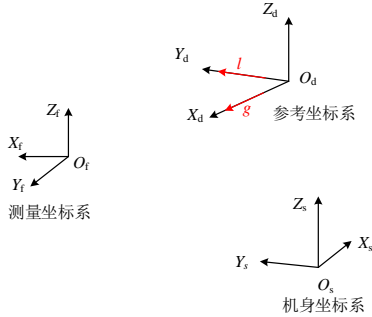


图 4 参考坐标系构建示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the construction of the reference coordinate system

以两个矢量建立参考坐标系  $d$ ，参考坐标系  $d$  在掘进机机身坐标系下构建的正交坐标基为

$$\begin{cases} a = l_s \\ b = \frac{g_s \cdot l_s}{|g_s \cdot l_s|} \\ c = a \cdot b \end{cases} \quad (1)$$

从机身坐标系到  $d$  系的姿态变换矩阵为

$$R_s^d = \begin{pmatrix} a^T \\ b^T \\ c^T \end{pmatrix} \quad (2)$$

同理可得， $d$  系在测量坐标系下的坐标正交基为

$$\begin{cases} A = l_f \\ B = \frac{l_f \cdot g_f}{|l_f \cdot g_f|} \\ C = A \cdot B \end{cases} \quad (3)$$

测量坐标系到  $d$  系的姿态变换矩阵为

$$R_f^d = \begin{pmatrix} A^T \\ B^T \\ C^T \end{pmatrix} \quad (4)$$

联立式(2)和(4)，可求出机身坐标系相对测量坐标系的姿态变换矩阵

$$R_s^f = (R_f^d)^{-1} \cdot R_s^d \quad (5)$$

由于激光指向仪投射出的激光束方位信息已知<sup>[10-11]</sup>且测量坐标系的  $O_f X_f Y_f$  面与大地水准面平行，因此  $l_f$ 、 $g_f$  为已知量，只需要解算出  $l_s$  与  $g_s$  即可求解出机身坐标系相对测量坐标系的姿态变换矩阵。

### 2.1.1 重力矢量解算

重力矢量解算示意图如图 5 所示。以倾斜仪坐标系的  $X_s$  轴作为滚动轴，绕  $X_s$  轴输出滚转角，记为  $\gamma'$ 。以  $Y_s$  轴作为俯仰轴，记为  $\beta'$ 。根据几何关系<sup>[12]</sup>，重力矢量的俯仰角  $\beta$  和滚转角  $\gamma$  可以表达为

$$\begin{cases} \beta = \beta' \\ \gamma = \arcsin\left(\frac{\sin \gamma'}{\cos \beta}\right) \end{cases} \quad (6)$$

重力矢量可表示为

$$g_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

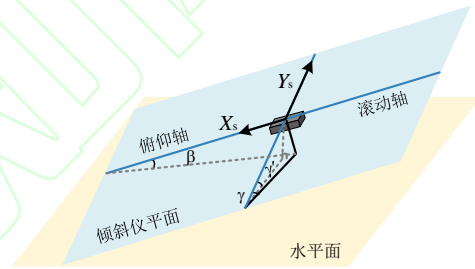


图 5 重力矢量解算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of gravity vector solution

### 2.1.2 光矢量解算

光矢量解算示意图如图 6 所示。利用双目相机拍摄指示激光，设左相机拍摄得到的激光线段为  $AB$ ，右相机拍摄得到的激光线段为  $CD$ 。利用左相机光心  $O_{c1}$  和激光线段  $AB$  建立左光平面，右相机光心  $O_{c2}$  和激光线段  $CD$  建立右光平面，则指示激光可由左右光平面的交线表示<sup>[13]</sup>。

左右相机拍摄得到激光线段后，经过图像处理，获得指示激光在图像坐标系下的数学表达式<sup>[14]</sup>。根据相机内参将其转换到相机坐标系下从而得到左右光平面的平面方程<sup>[15]</sup>。由此可求得左相机坐标系下左光平面的法向量  $N_{c1}^l$  和右相机坐标系下右光平面的法向量  $N_{c2}^r$ 。

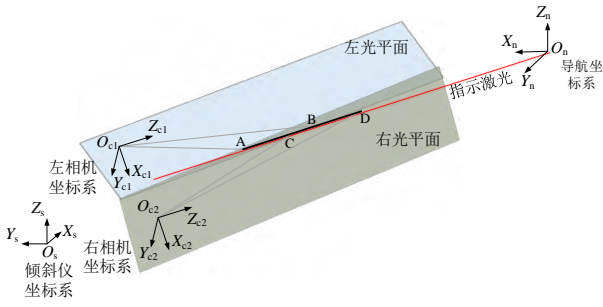


图6 光矢量解算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of light vector solution

根据标定的右相机坐标系到左相机坐标系之间的姿态变换矩阵  $\mathbf{R}_{c2}^{c1}$ , 左相机坐标系下右光平面的法向量为

$$\mathbf{N}_{c1}^{lr} = (\mathbf{R}_{c2}^{c1})^{-1} \cdot \mathbf{N}_{c2}^{lr} \quad (8)$$

左相机坐标系下两个光平面的交线为

$$\mathbf{l}_{c1} = \mathbf{N}_{c1}^{lc} \cdot \mathbf{N}_{c1}^{lr} \quad (9)$$

结合标定的左相机坐标系到倾斜仪坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}_{c1}^s$ , 倾斜仪坐标系下交线为

$$\mathbf{l}_s = \mathbf{l}_{c1} \cdot \mathbf{R}_{c1}^s \quad (10)$$

## 2.2 标靶定位算法

设计标靶定位算法并结合空间坐标变换技术, 对标靶坐标系与测量坐标系之间的平移  $\mathbf{T}_b^f$  和旋转矩阵  $\mathbf{R}_b^f$  进行求解, 进而获得掘进机机身中心点在测量坐标系下坐标  $P_f$ , 而  $\mathbf{T}_b^f$ 、 $\mathbf{R}_b^f$  可通过以下标定方法获得。

求解  $\mathbf{T}_b^f$  即求解标靶坐标系原点在测量坐标系下的坐标, 可以通过转换到  $\mathbf{T}_f^b$  进行求解。

$$\mathbf{T}_f^b = -\mathbf{R}_b^f \cdot \mathbf{T}_f^b \quad (11)$$

求解  $\mathbf{T}_f^b$  即求解测量坐标系原点在标靶坐标系下的坐标, 即光斑在标靶坐标系下的坐标  $g_b$ , 该坐标通过直线  $H$  与测量标靶平面求解交点获得。

光斑坐标解算示意图如图 7 所示。设光斑在标

靶坐标系下的坐标为  $g_b$ , 光斑质心坐标为  $g_0(u, v)$ , 相机光心  $O_{c3}$  在相机坐标系下的坐标为  $(0, 0, 0)$ ; 根据相机投影模型, 光斑在相机坐标系下的坐标为  $g_{c3}(x_{c3}, y_{c3}, z_{c3})$ , 由  $g_{c3}$  和相机光心  $O_{c3}$  确定一条直线  $H$ , 直线  $H$  与标靶平面的交点为光斑在标靶坐标系下的坐标  $g_b$ 。

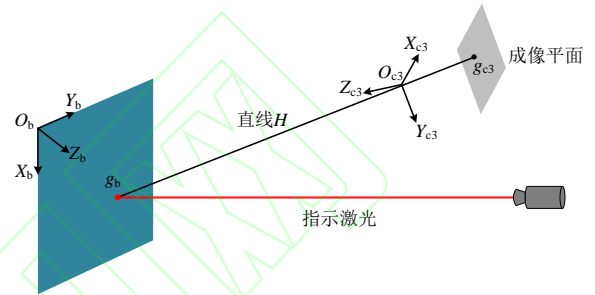


图7 光斑坐标解算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of light spot coordinate solution  
标靶屏平面方程为

$$v_1 \cdot (x - x_b) + v_2 \cdot (y - y_b) + v_3 \cdot (z - z_b) = 0 \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{v}(v_1, v_2, v_3)$  为标靶平面的法向量, 其在标靶坐标系下的值为  $(0, 0, -1)$ ;  $(x_b, y_b, z_b)$  为标靶平面上的一点, 此处指的是标靶坐标系原点  $(0, 0, 0)$ 。

假设空间直线  $H$  的参数方程为

$$\begin{cases} x = x_h + t \cdot m_1 \\ y = y_h + t \cdot m_2 \\ z = z_h + t \cdot m_3 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{m}(m_1, m_2, m_3)$  为直线  $H$  的方向向量;  $(x_h, y_h, z_h)$  为直线上的一点, 在此处指相机光心  $O_{c3}$ 。

直线  $H$  的方向向量可表示为

$$m = \begin{cases} \frac{x_{c3} - 0}{\sqrt{(x_{c3})^2 + (y_{c3})^2 + (z_{c3})^2}} \\ \frac{y_{c3} - 0}{\sqrt{(x_{c3})^2 + (y_{c3})^2 + (z_{c3})^2}} \\ \frac{z_{c3} - 0}{\sqrt{(x_{c3})^2 + (y_{c3})^2 + (z_{c3})^2}} \end{cases} \quad (14)$$

其中  $g_{c3}$  可以表达为

$$g_{c3} = -f \cdot \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_o \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ -1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中:  $f$  为单目相机焦距,  $f_x$ 、 $f_y$  为归一化焦距,

$(u_o, v_o)$  为相机主点坐标。

联立式(12)、式(13)即可求解  $t$ 。

$$t = \frac{(x_b - x_h)m_1 + (y_b - y_h)m_2 + (z_b - z_h)m_3}{m_1v_1 + m_2v_2 + m_3v_3} \quad (16)$$

联立式(14)、式(15)、式(16)即可求解  $g_b$ 。

标靶坐标系到测量坐标系的旋转矩阵  $R_b^f$ , 可通过如下坐标传递链求得

$$R_b^f = R_b^{c1} \cdot R_{c1}^f \quad (17)$$

$$R_{c1}^f = R_s^f \cdot R_{c1}^s \quad (18)$$

因此, 只需获得  $R_b^{c1}$  即可求得  $R_b^f$ 。

求解  $R_b^{c1}$  需要利用标靶上的特征点, 假设特征点

在导航坐标系下的坐标记为  $B_n^i (i=1, 2, 3, \dots, m; m$  为特征点的个数), 在标靶坐标系下的坐标记为  $B_b^i (i=1, 2, 3, \dots, m; m$  为特征点的个数), 特征点在测量坐标系下的坐标可以通过如下坐标传递链获得。

$$B_f^i = R_n^f \cdot B_n^i + T_n^f = R_b^{c3} \cdot R_{c3}^f \cdot B_b^i + T_b^f \quad (19)$$

式中:  $R_n^f$  为单位矩阵,  $B_n^i$ 、 $B_b^i$  已在特征点设定时通过。

将式(21)展开可得

$$x_n^i + t_{n1}^f = \begin{pmatrix} r_{c111}^f r_{b11}^c + r_{c112}^f r_{b21}^c + r_{c113}^f r_{b31}^c \\ r_{c111}^f r_{b12}^c + r_{c112}^f r_{b22}^c + r_{c113}^f r_{b32}^c \\ r_{c111}^f r_{b13}^c + r_{c112}^f r_{b23}^c + r_{c113}^f r_{b33}^c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b^i - t_{f1}^b \\ y_b^i - t_{f2}^b \\ z_b^i - t_{f3}^b \end{pmatrix} + \quad (20)$$

$$y_n^i + t_{n2}^f = \begin{pmatrix} r_{c121}^f r_{b11}^c + r_{c122}^f r_{b21}^c + r_{c123}^f r_{b31}^c \\ r_{c121}^f r_{b12}^c + r_{c122}^f r_{b22}^c + r_{c123}^f r_{b32}^c \\ r_{c121}^f r_{b13}^c + r_{c122}^f r_{b23}^c + r_{c123}^f r_{b33}^c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b^i - t_{f1}^b \\ y_b^i - t_{f2}^b \\ z_b^i - t_{f3}^b \end{pmatrix} + \quad (21)$$

$$z_n^i + t_{n3}^f = \begin{pmatrix} r_{c131}^f r_{b11}^c + r_{c132}^f r_{b21}^c + r_{c133}^f r_{b31}^c \\ r_{c131}^f r_{b12}^c + r_{c132}^f r_{b22}^c + r_{c133}^f r_{b32}^c \\ r_{c131}^f r_{b13}^c + r_{c132}^f r_{b23}^c + r_{c133}^f r_{b33}^c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b^i - t_{f1}^b \\ y_b^i - t_{f2}^b \\ z_b^i - t_{f3}^b \end{pmatrix} + \quad (22)$$

从上式可知, 每个等式含有 9 个  $R_b^{c1}$  的元素, 而每个特征点可以列 3 个等式, 需要 3 个特征点即可求得  $R_b^{c1}$ 。

掘进机身中心坐标在测量坐标系下的坐标  $P_f$ , 可通过如下坐标系传递链计算得到。

$$P_f = R_b^f \cdot P_b + T_b^f \quad (23)$$

综上所述, 将解算出来的  $R_b^f$ 、 $T_b^f$  代入式(23)即

为掘进机身中心坐标在测量坐标系下的坐标  $P_f$ 。

### 2.3 水平/垂直偏差测量

设计水平/垂直偏差测量原理, 解算出掘进机身中心点的坐标相对巷道设计轴线的水平/垂直偏差, 用来判断实际掘进方向是否偏离计划掘进方向<sup>[18]</sup>。

偏差测量原理示意图如图 8 所示。以测量坐标系为基准建立水平面与垂直面, 点  $A$ 、 $B$  为巷道设计轴线上的两点, 点  $A'$ 、 $A''$  分别为点  $A$  在水平、垂直面的投影点, 点  $B'$ 、 $B''$  分别为点  $B$  在水平、垂直面的投影点。点  $P$  为机身中心点, 其在水平、垂直面的投影点分别为点  $P'$ 、 $P''$ , 因此,  $P'C'$ 、 $P''C''$  分别机身相对巷道设计轴线的水平、垂直偏差。

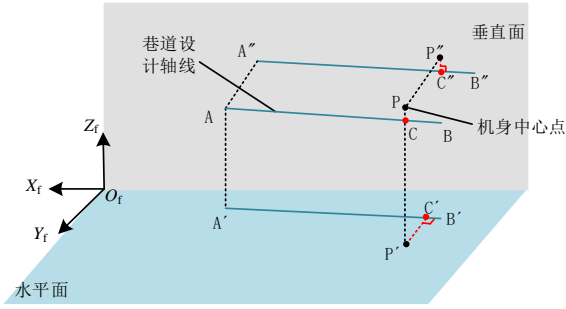


图 8 偏差测量原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the principle of deflection measurement

根据空间点与直线位置关系<sup>[19]</sup>可得

$$\begin{cases} |P'C'| = \sqrt{|B'P'|^2 - \left(\frac{B'A' \cdot B'P'}{|B'A'|}\right)^2} \\ |P''C''| = \sqrt{|B''P''|^2 - \left(\frac{B''A'' \cdot B''P''}{|B''A''|}\right)^2} \end{cases} \quad (24)$$

### 2.4 脱靶分析

通过建立几何模型，推导出标靶的最大可旋转角度及其与横向偏差之间的函数关系，进而解算出标靶的最大可旋转角度与水平偏差的数学表达式。脱靶分析示意图如图 9 所示。根据标靶的几何尺寸为 660 mm×470 mm×340 mm。

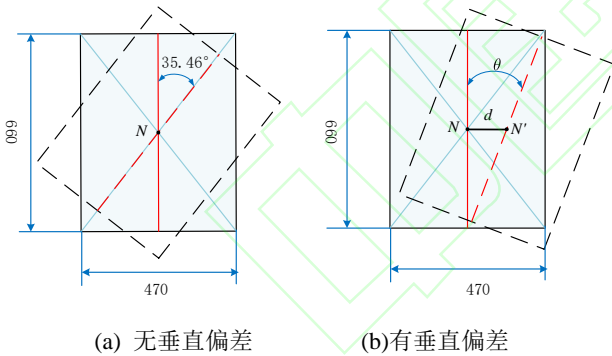


图 9 脱靶分析示意图

Fig. 9 Schematic of off-target analysis

图 9 (a)为无垂直偏差，仅出现标靶旋转的情况，根据几何关系可知视觉标靶的可旋转范围为 ±35.46°，在此旋转范围内不会发生脱靶问题。图 9 (b)所示假设掘进机行进时的垂直偏差为 d，标靶的最大可旋转角度 θ 可以通过以下几何关系计算得出

$$\theta = \arctan \frac{235 - d}{330} \quad (25)$$

经过分析可知：标靶最大可旋转角度与水平偏差呈线性关系，垂直偏差越大，标靶的可旋转角度越小。

## 3 实验验证

为了验证本文所提出方法的有效性，利用单目相机、双目相机、双轴倾斜仪、激光器、全站仪搭建了位姿测量系统实验平台来对测量系统进行性能评价测试，实验设备技术参数见表 1，实验环境如图 10 所示，分别从位姿参数绝对测量精度、水平/垂直偏差绝对测量精度两个方面对本方法进行验证。

表 1 实验设备技术参数

Tab. 1 Technical parameters of experimental equipment

设备	技术参数
双目相机	型号为 ZED2;分辨率为 920 像素×1080 像素;像素尺寸为 2 μm×2 μm
单目相机	型号为 BaslerAca2040-25gmNIR;分辨率为 2048 像素×2048 像素;像素尺寸为 5.5 μm×5.5 μm
双轴倾斜仪	型号为 STAK-01;分辨率为 0.0001°;角度测量精度为 ≤0.01°
激光器	型号为 DD532-50-5;功率为 50 mW
全站仪	型号为 LeicaTS12;角度测量精度为 2";分辨率为 0.1 mm

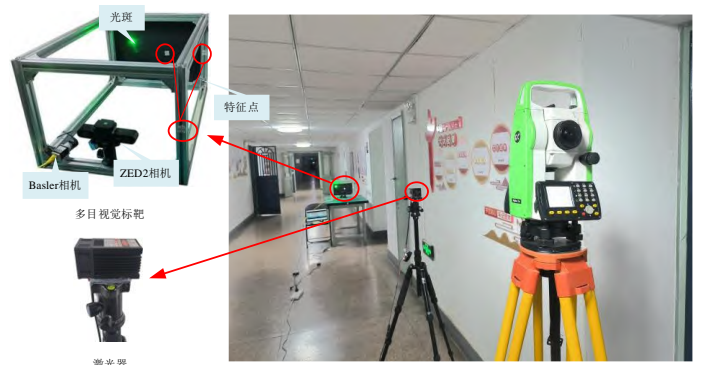


图 10 实验环境示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental environment

### 3.1 位姿参数绝对测量精度实验

设计该实验的主要目的是验证位姿参数测量算法的精度，按照如下步骤进行实验。

(1)将测量装置固定在静电台上，放置在距离激



光器 5 m 处，调整静电台使得姿态角的读数为零，记为初始状态。

(2)控制多相机和双轴倾斜仪实时采集光斑、光束图像以及双轴信息，同时对采集到的图像进行处理，代入位姿算法中进行解算，获得位姿测量值。

(3)利用全站仪获得位姿真实值，与算法得到的位姿测量值进行对比，获得测量误差。

重复以上步骤，移动测量装置在距离指示激光 5~100 m 的不同位置进行实验，用来模拟掘进机向前行进，实验结果如图 11 所示。俯仰角的最大误差为  $-0.26^\circ$ ，偏航角的最大误差为  $-0.32^\circ$ ，滚转角的最大误差为  $0.24^\circ$ 。 $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的最大误差分别为 8.5、6.1、5.4 mm。

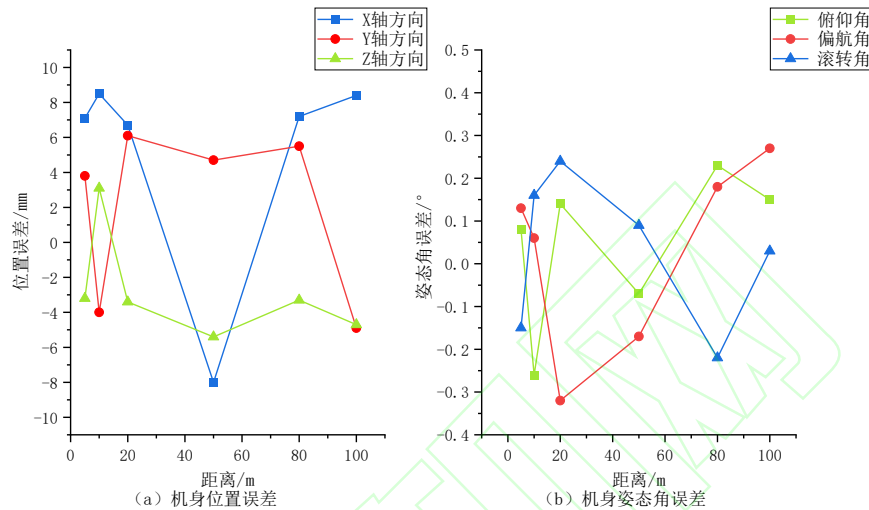


图 11 位姿参数绝对测量精度实验数据

Fig. 11 Experimental data on absolute measurement accuracy of attitude parameters

### 3.2 水平/垂直偏差绝对测量精度评价实验

设计该实验用来评价测量方法的水平/垂直测量精度，按照如下步骤进行实验。

(1)首先调整激光器使得光条与地面垂直，利用全站仪对该光条的方位信息进行测量。

(2)将实验台沿计划线放置，在实验台上放置反射片，用来模拟掘进机机身中心点。

(3)控制相机采集光斑光束图像，代入偏差解算模型中，经过解算获得水平/垂直偏差。同时，利用

全站仪对水平/垂直偏差直接测量。将测量系统解算出来的偏差值记为解算值。将全站仪直接测量的偏差值，记为实际值。

(4)将测量系统解算出来的偏差值与全站仪测得的实际偏差值(解算值-实际值)进行比对，得到水平/垂直偏差绝对测量精度。

移动实验台到距离指示激光的 5~100 m 不同位置进行实验，用来模拟掘进机向前行进，实验数据见表 2。

表 2 水平/垂直偏差绝对测量精度评定实验数据

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

序号	距离	数值类别	横向偏差/mm	横向偏差测量误差/mm	纵向偏差/mm	纵向偏差测量误差/mm
1	5 m	解算值	42.6	-1.6	-49.8	0.9
		实际值	44.2		-50.7	
2	10 m	解算值	68.0	2.3	41.2	1.4
		实际值	65.7		39.8	
3	20 m	解算值	74.5	3.8	-73.3	2.1
		实际值	70.7		-75.4	
4	50 m	解算值	53.6	6.7	64.7	5.8
		实际值	46.9		58.9	
5	80 m	解算值	-72.4	-5.6	91.8	8.4
		实际值	-66.8		83.4	
6	100 m	解算值	95.7	7.3	103.6	-4.9

实际值	88.4	108.5
-----	------	-------

经统计学分析可知,在5~100 m测量范围内,特征点水平/垂直偏差分别小于7.3、8.4 mm,因此,本方法的水平/垂直偏差绝对测量精度优于9 mm,满足测量需求<sup>[20-21]</sup>。

#### 4 井下工业实验

基于上述测量原理与实验,本文设计的测试系统,成功在鄂尔多斯某煤矿进行测试,测试现场如图12所示。

在实际应用中,将该测量装置安装在掘进机右上走道板处,并配置防尘罩以及减振措施。测试时,利用测量系统测量掘进机的位姿,将测量系统测的值记为测量值,通过全站仪人工测量掘进机的位姿作为真实值。部分测量结果见表3,由于井下环境复杂,测量误差相对实验室有所增大。姿态角的最大误差分别为:俯仰角0.35°,偏航角-0.46°,滚转角0.38°。x、y、z轴上的最大误差分别为-12.2、50.1、42.1 mm。

为了评估测量结果的适用性,需要考虑GB 50213—2010《煤矿井巷工程质量验收规范》中关于巷道掘进工程断面全宽和全高的验收偏差标准,其要求为-30~+250 mm。因此,煤矿巷道掘进机的定位检测精度需达到厘米级,姿态检测精度则应达到角分级。根据实验数据和标准要求对比分析,测量误差在允许范围内,该技术能够有效满足巷道施工对掘进机位姿的精确测量要求。



(a) 指示激光 (b) 多目视觉标靶

图12 现场测试示意图

Fig. 12 Schematic diagram of field test

表3 井下工业实验部分实验数据

Tab. 3 Experimental data of some experiments in downhole industrial experiments

数值类别	编号	x/mm	y/mm	z/mm	俯仰角/(°)	偏航角/(°)	滚动角/(°)
真实值	1	105.2	7310.7	24600.2	1.87	-0.53	-0.75
	2	80.5	7300.1	24600.2	-5.28	5.83	3.74
	3	47.5	7310.6	24600.1	2.67	3.52	1.65
	4	-58.6	7320.3	24600.6	3.62	3.41	1.73
	5	75.3	7300.1	24600.2	3.23	-6.75	-1.79
测量值	1	96.8	7316.5	24563.7	1.52	-0.69	-0.96
	2	73.4	7325.2	24586.1	-5.56	6.29	3.48
	3	59.2	7358.0	24576.4	2.82	3.36	1.32
	4	-67.1	7370.4	24561.3	3.45	3.17	2.11
	5	83.4	7327.2	24558.1	3.36	-6.94	-1.62

#### 5 结语

本文提出一种基于多目视觉的煤矿巷道掘进机位姿测量方法。该方法以视觉测量原理为核心,结合倾角测量技术,构建了高精度的位姿测量模型。由多相机、倾角传感器、高精度测量标靶屏组成测量装置。通过融合双矢量定姿和标靶标定算法,实现了对掘进机机身位姿的精确测量。在实现同等测

量功能的条件下,与惯性导航等测量技术相比,具有成本低的优势,且不需要进行复杂的巷道布置,安装简便,具有较高的工业应用价值。

#### 参考文献:

[1] 国家发展改革委,国家能源局. 煤炭工业发展“十三五”规划 [R/OL]. (2016-12-22)[2024-01-01].

- <http://nyj.jl.gov.cn/zwgk/zcfg/201904/P020230522433797771309.pdf>.
- [2] 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.
- [3] HALAMA A, LOSKA P, SZYMAŁA P. Wireless control and directional navigation of a road header in drilling process[J]. *Pomiary automatyka robotyka*, 2013, 17 (2): 218-223.
- [4] 吴淼,贾文浩,华伟,等. 基于空间交汇测量技术的悬臂式掘进机位姿自主测量方法[J]. 煤炭学报,2015,40 (11): 2596-2602.
- [5] 陶云飞,杨健健,李嘉庚,等. 基于惯性导航技术的掘进机位姿测量系统研究[J]. 煤炭技术,2017,36 (1):235-237.
- [6] 田原. 基于零速修正的掘进机惯性导航定位方法[J]. 工矿自动化,2019,45 (8):70-73.
- [7] 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.
- [8] 王学,周红旭,张雷,等. 基于近红外双目立体视觉的悬臂式掘进机定位研究[J]. 工矿自动化,2022,48 (7):43-51.
- [9] 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:煤炭科学研究总院,2021.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 黄喆,沈小玲,张历,等. 面向双相机标靶的倾斜仪安装误差补偿方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36 (7):152-159.
- [13] 于鲲,丛明煜,戴文聪. 基于三维模型的空间目标视觉位姿测量[J]. 仪器仪表学报,2019,40 (4):179-188.
- [14] 于龙龙,李艳文,栾英宝,等. 基于二维平面靶标的线结构光标定[J]. 仪器仪表学报,2020,41 (6):124-131.
- [15] TORRES-TORRITI M, NAZATE-BURGOS P, PAREDES-LIZAMA F, et al. Passive landmark geometry optimization and evaluation for reliable autonomous navigation in mining tunnels using 2D lidars[J]. *Sensors*, 2022, 22 (8): 3038.
- [16] XUE G H, WEI J B, LI R X, et al. LeGO-LOAM-SC: an improved simultaneous localization and mapping method fusing LeGO-LOAM and scan context for underground coalmine[J]. *Sensors*, 2022, 22 (2): 520.
- [17] 薛光辉,李圆,张云飞. 基于激光靶向跟踪的悬臂式掘进机位姿测量系统研究[J]. 工矿自动化,2022,48 (7):13-21.
- [18] 郭伦锋,郭一楠,蒋康庆,等. 掘进机姿态参数测量及解算方法[J]. 工矿自动化,2021,47 (12):46-54.
- [19] 吕端良,吕亚男. 空间点到直线距离的几种常见求法[J]. 江西科学,2020,38 (5):621-622.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 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.
- [21] 国家能源局. 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.