

文章编号: 1673-3193(2024)06-0823-09

## 悬臂式掘进机位姿测量方法研究

郑瑞东<sup>1,2,3</sup>, 韩 燮<sup>1,2,3</sup>, 高 波<sup>4</sup>

- 中北大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051;
- 中北大学 机器视觉与虚拟现实山西省重点实验室, 山西 太原 030051;
- 中北大学 山西省视觉信息处理及智能机器人工程研究中心, 山西 太原 030051;
- 山西科达自控股份有限公司, 山西 太原 030006)

**摘要:** 针对复杂地质条件下煤矿巷道施工中悬臂掘进机位姿检测精度的提升难题, 本文提出了一种基于激光投影与机器视觉的掘进机位姿检测算法。该算法聚焦于克服高粉尘、强震动环境下位姿测量的不稳定性, 确保掘进机的精确导航与控制。测量系统集成了激光发射装置和工业级防爆摄像机, 其利用摄像机捕获激光线序列图像, 然后通过图像处理技术计算掘进机的航向角, 实现行进方向的即时校正。倾角传感器用于协助测量摄像机拍摄时的倾斜角度, 同时运用三角测量法来准确测定掘进机的水平位移。该设计采用在掘进过程中随机抽样图像的策略, 有效抑制了强震动干扰; 同时, 高粉尘环境反而增强了激光线亮度, 提高了检测性能。通过建立模拟巷道进行了仿真测试, 结果表明, 该技术在水平位移测量时的航向角误差 $\leq 0.5^\circ$ 。通过分析科达自控公司提供的实际矿井数据, 证明了算法在真实工况下的稳健性和有效性。与现行技术相比, 本算法不仅保持了一定的检测精度, 还简化了实施步骤, 增强了采矿作业的安全性与效率。

**关键词:** 悬臂式掘进机; 位姿检测; 三角测量法; 机器视觉; 特征提取

**中图分类号:** TD672 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.011

**引用格式:** 郑瑞东, 韩燮, 高波. 悬臂式掘进机位姿测量方法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 823-831.

ZHENG Ruidong, HAN Xie, GAO Bo. Research on pose measurement method for cantilever roadheader[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(6): 823-831.

## Research on Pose Measurement Method for Cantilever Roadheader

ZHENG Ruidong<sup>1,2,3</sup>, HAN Xie<sup>1,2,3</sup>, GAO Bo<sup>4</sup>

- School of Computer Science and Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Shanxi Key Laboratory of Machine Vision and Virtual Reality, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Shanxi Province's Vision Information Processing and Intelligent Robot Engineering Research Center, North University of China, Taiyuan 030051, China;
- Shanxi Keda Automatic Control Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In response to the difficulty of improving the accuracy of cantilever roadheader pose measurement in coal mine roadway construction under complex geological conditions, this paper proposed a kind of roadheader pose detection algorithm based on laser projection and machine vision. This algorithm focused on overcoming the instability of pose measurement in high dust and strong vibration environments, and ensured accurate

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(202203021222027)

作者简介: 郑瑞东(1998-), 男, 硕士生, 主要从事悬臂式无人掘进机位姿测量方法的研究。

通信作者: 韩 燮(1964-), 女, 教授, 博士, 主要从事计算机视觉、仿真和可视化的研究。E-mail: hanxie@nuc.edu.cn。

navigation and control of the roadheader. The measurement system integrated a laser emitting device with an industrial grade explosion-proof camera, and the camera captured a sequence of laser line images, then the heading angle of the roadheader was calculated through image processing technology to achieve real-time correction of the travel direction. Inclination angle sensors was used to measure the inclination angle of the camera, and the triangulation method was used to accurately measured the horizontal displacement of the roadheader. The images were randomly sampled during excavation, which was took as the design strategy to effectively suppress strong vibration interference; meanwhile, the high dust environment actually enhanced the brightness of the laser line, which could improve the measurement performance. A simulated tunnel was built to make to simulation test. The results show that the heading angle error of the technology is less than or equal  $0.5^\circ$  in horizontal displacement measurement. The robustness and effectiveness of the algorithm under real working conditions is verified by analyzing the mine data provided by Keda Automation Company. Compared with current technology, this algorithm not only maintains considerable detection accuracy, but also simplifies implementation steps, and enhances the safety and efficiency of mining operations.

**Key words:** cantilever roadheader; pose measurement; triangulation method; machine vision; characteristic extraction

## 0 引言

巷道掘进机是煤矿巷道机械化开挖的核心装备,其技术先进性直接影响掘进效率与安全。空间限制、光线差、地质复杂等煤矿巷道环境特点,制约了掘进机的自动化与智能化发展<sup>[1]</sup>。因此,研究掘进机的定位偏差修正及智能切割技术,对增进巷道掘进智能化、加速煤炭开采进程并保障作业安全极为关键<sup>[2]</sup>。

近年来,针对悬臂式掘进机位姿测量问题,国内外多位专家学者开展了大量研究,提出了不少宝贵的方案。目前主要有以全站仪为基础的掘进工位姿态探测系统<sup>[3-4]</sup>,以惯性导航为基础的掘进工位姿态探测系统<sup>[5-6]</sup>,基于iGPS的掘进机位姿检测系统,以机器视觉为基础的掘进工位姿态探测系统<sup>[7]</sup>。Schneider<sup>[8]</sup>针对煤矿井下环境特点,如光线弱、粉尘浓厚及空间局限,采取了全站仪与激光扫描技术相结合的方法进行精确位姿定位,并深入探讨了井下定位与导航系统的关键需求。田原<sup>[9-10]</sup>针对掘进机独特的运动特性进行了深入探究,并研发了一款专门适应掘进机需求的惯性定位系统方案。该系统采用了PHINS型惯性导航系统技术,旨在实现掘进机的自动化精确定位,并通过采用零速度更新技术(ZUPT)进一步优化了定位精度。金铃子等<sup>[11]</sup>提出了惯导与双目里程计融合的掘进机定位方法。与此同时,毛清华等<sup>[12]</sup>提出了惯导与视觉信息融合的掘进机

定位方法。贾文浩等<sup>[13]</sup>为解决目前掘进机定位方法中存在的非坐标化测量、自动化程度低、易被障碍物遮挡等问题进行了基于iGPS的煤巷狭长空间中掘进机绝对定位精度的研究。石勇<sup>[14]</sup>提出一种基于3D激光雷达的动态测距、测向方法,用于实时控制掘进机位于巷道的中线位置。此外,薛光辉等<sup>[15]</sup>设计了一种新颖的基于激光靶向跟踪的悬臂式掘进机位姿测量系统。该系统通过求解激光跟踪装置、激光标靶、掘进机和巷道等坐标系间的转换矩阵,准确测得掘进机的位姿。这一技术的出现为掘进机的精确定位提供了新的可能性。王学等<sup>[16]</sup>针对现有掘进机无法实时定位、定位不准确、视觉定位中相机视野被遮挡导致定位失败等问题,提出了一种基于近红外双目立体视觉的悬臂式掘进机定位方案。

已有定位方法在正常环境下的精确度能达到使用要求,但是,面对山西省地质构造复杂的环境时,掘进机的强震动与高浓度粉尘会对掘进机的位姿测量产生严重影响。山西的煤炭资源埋藏相对较浅,便于开采,但其地质构造的多样性对开采技术与安全生产提出了独特挑战。同时,山西不同矿区从软岩到硬岩不等的开采条件,对开采技术装备的要求也极为严苛,特别是在长距离、大角度倾斜以及厚煤层的开采场景下,掘进机、支架等关键设备的安装定位及其工作姿态的精确检测等方面的技术挑战性显著增加。为此,本文设计了一种基于机器视觉的掘进机位姿检测系统。该系统在掘进机侧上方固定一个激光发射

装置,在掘进机上固定两个工业防爆摄像机,通过其中一个摄像机拍摄激光前后两帧图像,对这两张图像融合处理,求取掘进机在行进过程中所产生的航向角,并利用航向角将掘进机回正。然后通过倾角传感器检测两个摄像机在拍摄激光时产生的倾角,再通过三角测量法检测出掘进机在水平方向的偏离距离。由于本算法只在掘进机行进过程中随机采集一帧图像,因此大大减少了掘进机强震动带来的影响,而且粉尘浓度越大,环境越暗,激光线越亮,检测效果越好。同时,为了验证本文提出算法的实际效果,在实验室搭建了模拟实地巷道的场景,并进行了大量实验,同时与科达自控公司合作实地采集了矿井中的激光线数据并进行了测试。

## 1 系统组成与测量原理

### 1.1 系统组成

掘进机是一种专用于地下巷道挖掘作业的多功能综合体设备,集截割、装载运输、自主移动及喷雾除尘等多项功能于一体<sup>[17]</sup>。掘进机的任务执行过程包含推进掘进、动态切割、后退回收物料等多个环节,具体包括向前推进、路径修正、初步破岩、精确定位、连续切割、侧面修整、底部清理以及物料收集等一系列工序<sup>[2]</sup>。

本文所设计的悬臂式掘进机位姿测量方案中,关键组成部分包含了激光发射单元以及相应的激光跟踪装置,如图 1 所示。

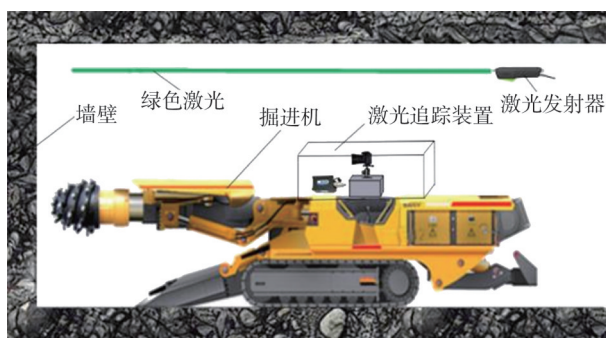


图 1 悬臂式掘进机位姿测量系统组成

Fig. 1 Composition of pose measurement system of cantilever roadheader

图 1 中,激光发射装置被水平安装在掘进机右后方(或左后方)的巷道顶板上,以确保激光信号的稳定性和准确性,同时对激光发射装置采用密封处理,以减少喷雾降尘时水分对激光路径的干扰。激光跟踪装置被固定安装于掘进机机体上,其核心作

用是实时捕获发射装置发射出的激光信号,并进行精准高效的追踪处理。悬臂式掘进机位姿测量系统中的激光发射装置采用对水分子吸收较少的红外波长激光,以减少喷雾降尘时水雾的影响,激光发射器所发出的激光与巷道水平地面保持平行状态,确保激光束的投射方向准确无误。激光追踪装置主要由倾角传感器、铁制固定支架及两个高分辨率摄像机组成。两个高分辨率相机固定在铁制固定支架的两头,倾角传感器放置在相机附近用于测量相机追踪激光发射器时的俯仰角。

### 1.2 测量原理

本文主要测量掘进机在行进过程中所产生的偏转角与偏离距离。

#### 1.2.1 偏转角

当掘进机位于初始状态时,掘进机无偏转,此时激光线与水平地面保持平行,两个相机中的右侧相机拍摄一张激光线图像,如图 2(a) 所示;掘进机启动后的某一时刻,掘进机可能产生偏转,相机拍摄的激光线图像也会发生了倾斜,如图 2(b) 所示。利用 Halcon 软件对初始和偏转状态的激光线图像进行处理,结果如图 2(c) 所示,图中由两条激光线所构成的夹角代表掘进机在行进过程中所产生的偏转角。

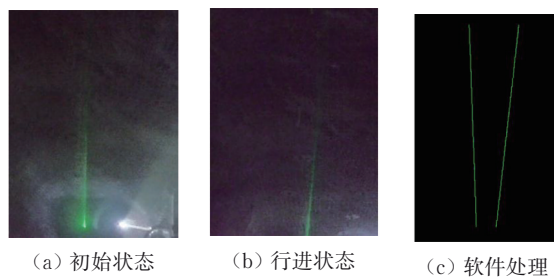


图 2 掘进机激光线图像

Fig. 2 Laser line images of the roadheader

#### 1.2.2 偏离距离

以掘进机前进方向为正向,根据图 3 计算偏离距离。图 3(a) 中,  $A$ 、 $B$  为掘进机上相机的放置点,  $E$  为  $AB$  的中点,面  $M$  过  $A$ 、 $B$  且垂直于地面,  $D$  为激光线穿过  $M$  面的交点,穿过点  $D$  且与水平地面垂直的直线与  $AB$  延长线的交点为  $C$ 。图 3(b) 中,面  $N$  过  $A$ 、 $B$  且与水平地面平行,  $G$  为激光发射装置在面  $N$  上的投影,  $GF$  为激光线在面  $N$  上的投影,  $C$  为  $A$ 、 $B$  延长线与  $GF$  的交点。

当掘进机处于初始状态时,根据本文的算法求出  $EC$  长度,记为  $d_{EC_1}$ ,当掘进机启动一段时间

后,根据上述的偏转角将掘进机回正,然后再计算一次此时的 $EC$ 长度,记为 $d_{EC_2}$ ,这两个 $EC$ 长度的差即为偏离距离 $d$ 。

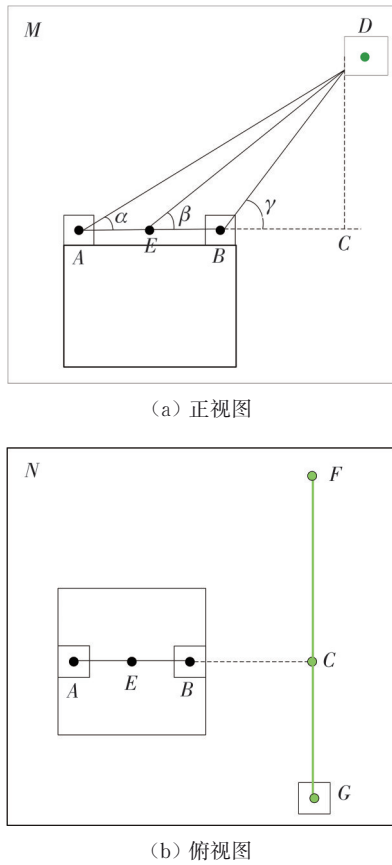


图3 偏离距离测量示意图

Fig. 3 Deviation distance measurement diagram

## 2 计算方法

基于上述测量原理可以得到激光线的信息,激光线信息类似图2(c)所示。对激光线图像进行霍夫变换后,可获得两条激光线的极坐标 $(\rho_1, \theta_1)$ ,  $(\rho_2, \theta_2)$ 。首先对激光线 $(\rho_1, \theta_1)$ 进行处理,设 $(x_0, y_0)$ 是激光线上一个点, $\rho_1$ 是该点与原点的距离,根据式(1)可以得到点 $(x_0, y_0)$ 的坐标值。

$$\begin{cases} x_0 = \rho_1 \cos \theta_1, \\ y_0 = \rho_1 \sin \theta_1. \end{cases} \quad (1)$$

通过在方向向量上加上和减去一个足够大的数值(这里是1 000),以此确保线条能完全覆盖在图像可视区域内,利用式(2)和式(3)计算得到两个端点的坐标。

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - 1\,000 \sin \theta_1, \\ y_1 = y_0 + 1\,000 \cos \theta_1, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + 1\,000 \sin \theta_1, \\ y_2 = y_0 - 1\,000 \cos \theta_1. \end{cases} \quad (3)$$

根据两个端点坐标 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ ,由式(4)可以得到激光线的斜率 $k_1$ 。

$$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (4)$$

根据式(1)~式(4),也可以得到另一条激光线 $(\rho_2, \theta_2)$ 的斜率 $k_2$ ,再通过式(5)计算出掘进机的偏转角 $\varphi$ 。

$$\varphi = \arctan\left(\frac{k_1 - k_2}{1 + k_1 k_2}\right). \quad (5)$$

根据偏转角对掘进机进行调整,使得掘进机的朝向回正,然后利用三角测量法计算掘进机行进过程中的偏离距离 $d_{EC}$ 。图3(a)中 $AE$ 、 $EB$ 、 $AB$ 的距离 $d_{AE}$ 、 $d_{EB}$ 、 $d_{AB}$ 已知, $\alpha$ 、 $\gamma$ 可由倾角传感器获得,其余皆未知。根据式(6)可得

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{d_{CD}}{d_{BC}}, \\ \tan \gamma = \frac{d_{CD}}{d_{AC}}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $d_{CD}$ 、 $d_{BC}$ 、 $d_{AC}$ 分别为 $CD$ 、 $BC$ 、 $AC$ 的长度,由式(6)有

$$d_{BC} \tan \alpha = d_{AC} \tan \gamma. \quad (7)$$

又因为 $d_{AC} = d_{AB} + d_{BC}$ ,所以有

$$d_{BC} \tan \alpha = (d_{AB} + d_{BC}) \tan \gamma. \quad (8)$$

式中: $d_{AB}$ 为 $AB$ 的长度。

由式(8)最终可以得到 $BC$ 的长度为

$$d_{BC} = \frac{d_{AB} \tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \gamma}. \quad (9)$$

$CD$ 的长度为

$$d_{CD} = d_{BC} \tan \gamma = \frac{d_{AB} \tan \gamma \tan \alpha}{\tan \gamma - \tan \alpha}. \quad (10)$$

最终,两台摄像机的中点与激光段到水平地面的投影距离 $d_{EC}$ 可由式(11)得出。

$$d_{EC} = d_{EB} + d_{BC} = \frac{d_{EB} (\tan \gamma - \tan \alpha)}{\tan \gamma - \tan \alpha} + \frac{(d_{AE} + d_{EB}) \tan \alpha}{\tan \gamma - \tan \alpha} = \frac{d_{EB} \tan \gamma + d_{AE} \tan \alpha}{\tan \gamma - \tan \alpha}. \quad (11)$$

将后面解算出的 $d_{EC_2}$ 与掘进机初始状态时解算出的 $d_{EC_1}$ 相减,如式(12)所示,可以得出掘进机行进一段时间后产生的偏离距离 $d$ 。

$$d = d_{EC_2} - d_{EC_1}. \quad (12)$$

### 3 特征提取

确定激光线的信息需要对获取的图像与基准图像同时进行特征提取。

由于矿井下存在大量强照度的照明灯,其光线会造成光反射现象,导致光污染,如图 4 所示,此时拍摄的图像中激光线就不明显,因此需要剔除图像中的干扰信息,从而确定激光线的信息。除了光污染,有时当巷道中粉尘浓度不够时,还会产生激光线间断的现象,如图 5 所示,为解决激光线间断的问题,可以设定掘进机行进一段时间后,巷道内粉尘浓度足够大时,再开始使用摄像机采集数据。



图 4 矿道中的光污染场景

Fig. 4 Scenarios of light pollution in mining tunnels

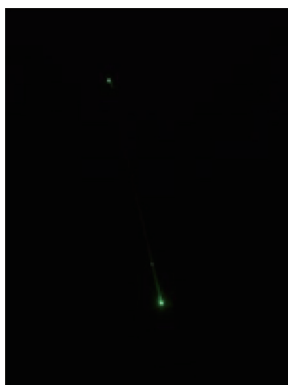


图 5 激光线出现断连的现象

Fig. 5 The disconnected laser line

本文的特征提取步骤如下:

1) 先使用均值滤波器  $f(x, y)$  滤去图像中的粉尘噪声,具体运算为

$$f(x, y) = \frac{1}{mm} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} g(s, t), \quad (13)$$

式中:  $g(s, t)$  为含有噪声的原始图像;  $f(x, y)$  为经过均值滤波后得到的图像;  $S_{xy}$  是以点  $(s, t)$  为中心的模板中像素的集合,模板尺寸为  $m \times n$ 。

2) 本文所使用的激光为绿色光线,而光污染

通常为白色,可将 RGB 图像中的通道转化到 HSV 通道后再处理图像。先将 RGB 的 R、G、B 三个通道归一化到 0~1,再通过式(14)~式(16)将图像转化为 HSV 通道。

$$V = \max(V_R, V_G, V_B), \quad (14)$$

式中:  $\max$  为求取最大值;  $V_R, V_G, V_B$  为图像的 R、G、B 值;  $V$  为 HSV 通道的明亮度。

$$S = \begin{cases} [V - \min(V_R, V_G, V_B)]/V & V > 0, \\ 0 & V = 0, \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\min$  为求取最小值;  $S$  代表 HSV 通道的饱和度,根据(14)和式(15),可以得到 HSV 通道的色调  $H$ 。

$$H =$$

$$\begin{cases} 60[(V_G - V_B)/SV] & V = V_R, V_G \geq V_B, \\ 60[6 + (V_G - V_B)/SV] & V = V_R, V_G < V_B, \\ 60[2 + (V_G - V_B)/SV] & V = V_G, \\ 60[4 + (V_G - V_B)/SV] & V = V_B, \\ 0 & V = 0. \end{cases} \quad (16)$$

3) 在 HSV 通道中筛选出一部分信息后,再依据灰度值进行阈值选择,根据激光的阈值范围将图片中的激光数据提取出来,利用 Canny 边缘检测后,得到图像的边缘信息。

4) 筛选所需特征。根据每个输入区域的形状特征筛选出特定区域,此时整个图像的绝大多数干扰信息已经滤除,可以确定图像中激光的位置信息,再进行一次骨架化得到激光线的单像素骨架信息。

图像单像素化后合并前后两帧图像,再通过霍夫变换获取图像中激光线的极坐标信息,然后由第 2 节的偏转角计算方法得到掘进机偏转角与偏离距离。

### 4 实验测试

测量掘进机位姿前需先对实验中所使用的相机进行标定来获取相机的内外参数,然后利用得到的相机内外参数消除所用相机的畸变。在掘进机处于初始状态时,使用相机拍摄一张激光线图片作为基准图片,并通过三角测量法计算出掘进机与激光线的距离。掘进机启动后可设定摄像机获取一帧激光线图片的时间间隔,由于悬臂式掘进机的掘进速度较为缓慢,对实时性要求不是特别高,故两帧图像的时间间隔可以设置的长一些。

煤矿井下空间紧凑,光线幽暗能见度受限,湿度较高,且间隔布置着强光照灯,为确保系统的精确度,在走廊构建了一个掘进机行进姿态

模拟检测平台进行模拟实验。该平台包括单点绿色激光器、透明光导管、一对海康威视 DS-2CD6425FWD-C 网络摄像头、双倾角传感器、笔记本电脑及遥控式履带装置。走廊的宽和高均为 3 m, 利用激光与光导管模仿矿道中的激光导向, 安装于走廊右上方, 激光基准高度设为 1.5 m, 确保其水平发射。两部摄像头安装于遥控车两侧, 间距 0.5 m, 经过精细调整后将照相机朝向激光线并获取清晰无干扰的图像, 随后通过网络连接将实时视频数据传送至笔记本电脑, 进行图像分析、姿态计算, 以此验证系统的准确度。

由于偏转角测量与获取的图像质量相关, 而偏离距离的误差主要取决于倾角传感器的检测精度, 目前市面上主流的倾角传感器精度较高, 能够达到实际应用的需求。因此, 本文只对偏转角进行测量误差实验。

图 6~图 9 中的(a)和(b)是山西科达自控公司使用定制摄像仪实地拍摄到的有一定外置光源

干扰的矿井下的激光线图像, 图 6~图 9 中的(c)是特征提取后合并(a)和(b)之后的效果图。在图 6~图 8 中可以观察到: 图像(a)中的外部光线干扰保持在一个几乎相同的水平, 整体环境相对稳定; 图像(b)则显示了外部光线从较暗逐渐变亮的趋势, 随着发射距离的增加, 激光线的亮度呈现出相应的由亮转暗的变化。相比之下, 在图 9 中可以发现: 图像(a)几乎完全不受外部光线干扰的影响, 表明环境条件非常理想; 但是, 由于激光发射器到此段的距离已经过长, 拍摄到的激光线也变得暗淡; 图像(b)受到了显著的外部光线干扰, 这种强烈的干扰对图像质量产生了明显的影响。

对图 6~图 9 中的效果图进行霍夫变换和数学计算, 可以得到这 4 组图像中两束激光线的角度差分别为  $8.125^\circ$ ,  $5.5^\circ$ ,  $8.5^\circ$  和  $5.875^\circ$ , 可以看出本系统无论在光污染强还是弱的环境下都有很好的检测效果。

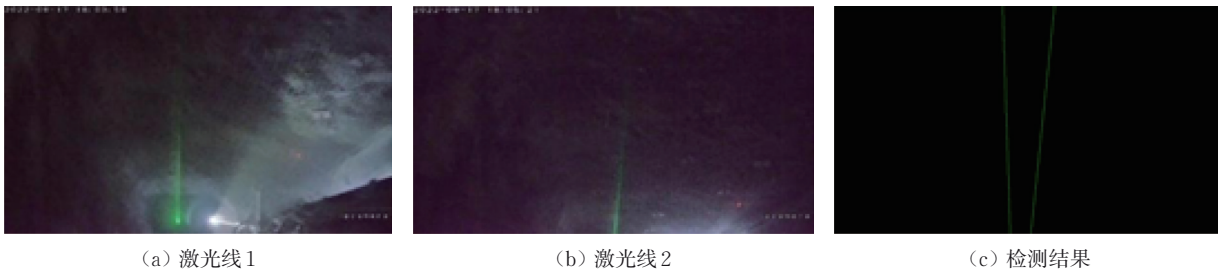


图 6 定制摄像仪拍摄的图像 1

Fig. 6 Customized camera captured images 1

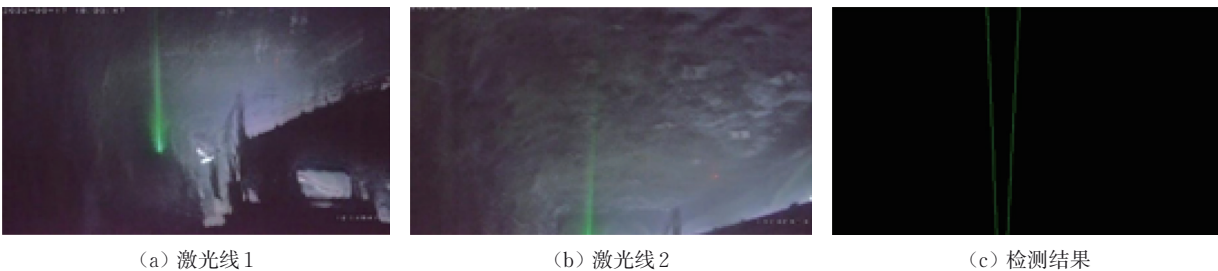


图 7 定制摄像仪拍摄的图像 2

Fig. 7 Customized camera captured images 2

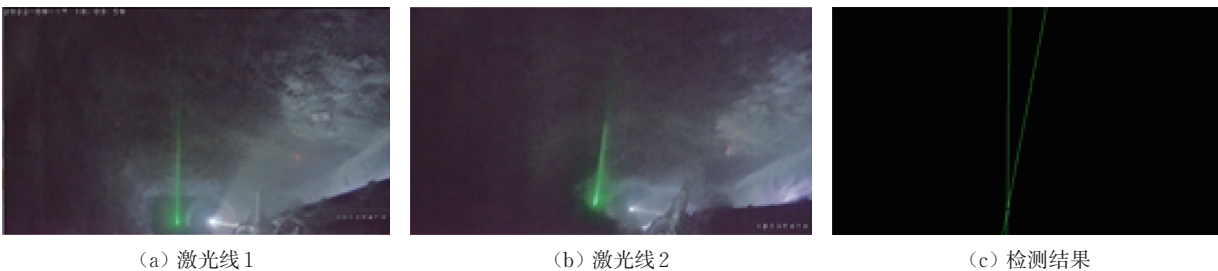


图 8 定制摄像仪拍摄的图像 3

Fig. 8 Customized camera captured images 3

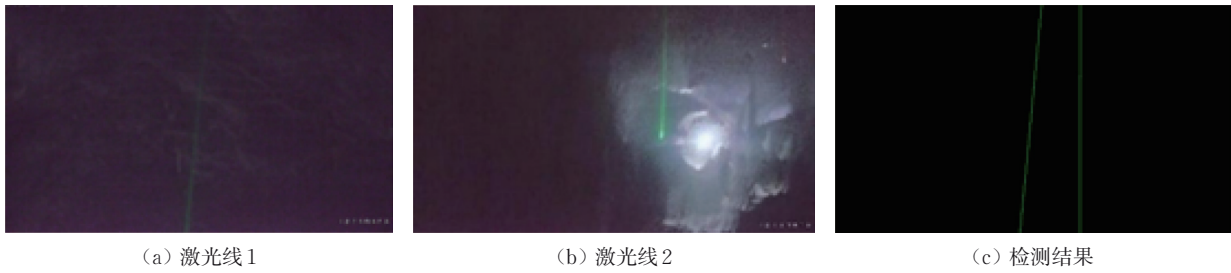


图 9 定制摄像仪拍摄的图像 4

Fig. 9 Customized camera captured images

图 10 中的(a)和(b)部分呈现了除尘摄像设备拍摄的真实矿井同一场景下的激光线图像,展示了矿井内部光线昏暗条件下的激光线成像情况。图 11 中的(a)和(b)部分显示了手机拍摄的矿井同一场景下的激光线图像,尤其突显了在强光干扰环境下捕捉到的激光线画面的特点。图 12 与图 13 分别呈现了防爆手机拍摄的矿井内部不同条件下的激光线图像。具体来说,图 12(a)和(b)为激光线亮度较高且无额外光源影响时的清晰激光线成像,图 13(a)和(b)

为激光线亮度较弱且存在连续性断裂现象的场景。

图 10~图 13 的(c)是将(a)与(b)两张原始图像进行激光线特征提取后合并的综合效果图。经过霍夫变换及相应的数学运算分析,可以得出 4 个图像序列中两道激光线之间的夹角分别为  $68.0^\circ$ ,  $83.0^\circ$ ,  $83^\circ$ 和  $4.125^\circ$ 。

图 10~图 13 的 4 组图像的检测结果显示:

1) 在环境光干扰较轻微的情况下,激光线检测系统的性能表现极为出色。

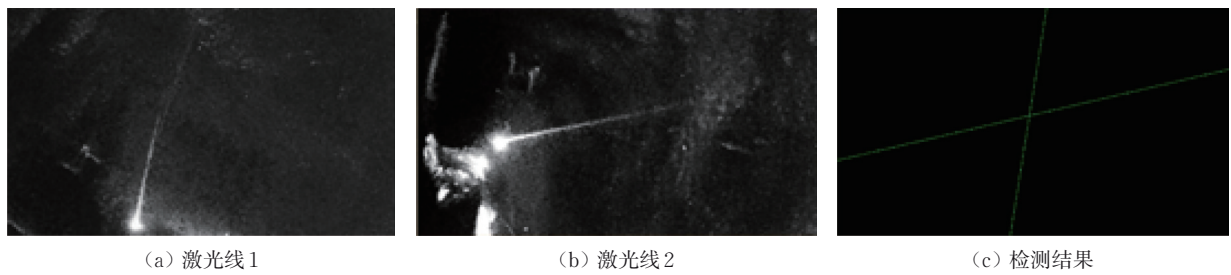


图 10 除尘摄像仪拍摄的图像

Fig. 10 Images captured by dust removal camera



图 11 手机拍摄的图像

Fig. 11 Images captured by mobile phones

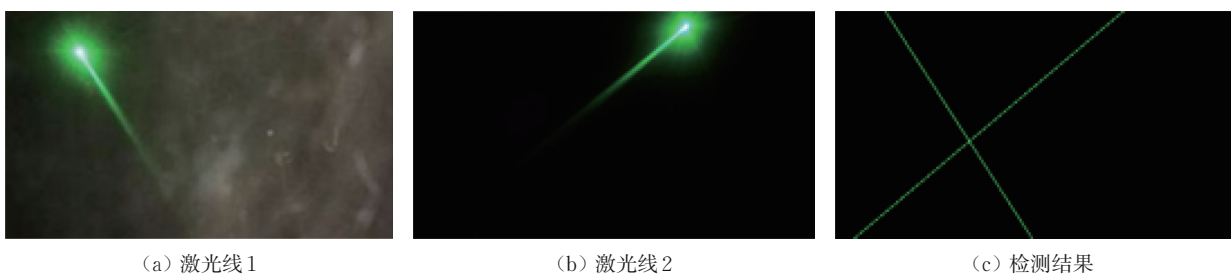


图 12 防爆手机拍摄的图像 1

Fig. 12 Image taken by explosion-proof mobile phone 1

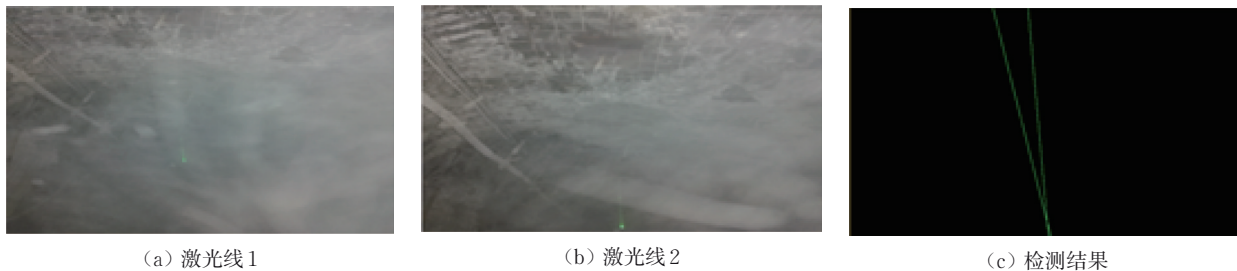


图 13 防爆手机拍摄的图像 2

Fig. 13 Image taken by explosion-proof mobile phone 2

2) 即使在激光线周围存在强烈光线干扰的情况下,该系统依然能够有效地探测到激光线的存在。

3) 无论激光线亮度显著还是微弱、连续还是间断,该系统均能成功地捕捉并测定出激光线的方向差异,从而实现对激光线的可靠检测和角度识别。

上述结果展示了真实场景中的 8 组图像,为

了全面测试检测系统,本文基于实验室搭建的测试平台模拟了掘进机机身的多种巷道位姿,进行了机身在 20 种不同位置及姿态下的姿态检测,为验证检测准确性,以倾角传感器测量平台静止角度为基准,将本系统解算出的位姿参数与之进行了对比。20 种不同位置及姿态下的实验结果、真实值及误差如表 1 所示。

表 1 实验测量数据与真实值对比  
Tab. 1 Actual data and experimental data

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实验值/(°)	7.000	-15.125	-29.375	10.235	15.315	-5.632	-18.218	-21.764	11.590	16.574
真实值/(°)	7.125	-15.430	-28.980	10.640	15.290	-5.765	-17.933	-21.686	11.991	16.353
误差/(°)	-0.125	0.305	-0.395	-0.405	-0.025	0.133	-0.285	-0.078	-0.401	0.221
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
实验值/(°)	18.976	12.453	28.850	-2.782	-9.046	12.188	18.644	1.691	15.096	8.881
真实值/(°)	18.799	12.886	28.635	-2.674	-8.878	12.553	18.526	2.000	14.768	9.153
误差/(°)	0.177	-0.433	0.215	-0.108	-0.168	-0.365	0.118	-0.305	0.328	-0.272

为验证本文方法的效果,对比了本文方法和其他几种基于机器视觉的掘进机位姿检测方法在同一组数据下的测量结果,平均误差如表 2 所示,其中,方法 1 采用基于激光靶向跟踪的悬臂式掘进机位姿测量系统,方法 2 采用基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统,方法 3 采用悬臂式掘进机机身及截割头位姿视觉测量系统。表 2 结果表明,本文方法位姿检测误差最小,能够满足公用掘进机位姿检测精度检测误差在 0.5° 以下的要求。

表 2 多种方法的平均测量误差对比

Tab. 2 Comparison of average measurement errors of multiple methods

测量方法	方法 1	方法 2	方法 3	本文方法
误差/(°)	0.295	0.252	0.286	0.243

### 5 结 论

本文针对煤矿井下复杂的施工环境,特别是地质多变、尘埃密布的严峻挑战,设计了一种悬臂掘

进机位姿检测算法,旨在克服检测中的视线障碍与照明不足等问题,以保障安全生产。该算法融合了激光与视觉技术,通过激光投影与特制摄像装置捕捉激光线条,从而精确实时地确定掘进机在三维空间中的位置与姿态,并且不受环境干扰。实验室模拟及现场应用结果表明,该算法的航向角误差能够控制在 0.5° 以内,利用倾角传感器测得的数据和三角测量法计算得出的位移偏移距离仅存在倾角传感器测量时所产生的误差,在排除掉测量误差后可以达到工业应用要求的高精度,因而显著提升了掘进作业的自动化监测水平与安全性,能够解决煤矿巷道施工中的关键技术难题。

### 参考文献:

[1] 钱鸣高,许家林,王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-13  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13. (in Chinese)

- [2] 刘送永, 张德义. 巷道掘进机智能化技术研究现状及展望[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 23-28.  
LIU Songyong, ZHANG Deyi. Research status and prospect of intelligentization technology of roadheader [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 23-28. (in Chinese)
- [3] SCHNEIDER O. Requirements for positioning and navigation in underground constructions [C]//2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2010: 1-4.
- [4] SHEN X S, LU M, CHEN W, et al. Tunnel-boring machine positioning during microtunneling operations through integrating automated data collection with real-time computing[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2011, 137(1): 72-85.
- [5] HLOPHE K, DU PLESSIS F. Implementation of an autonomous underground localization system [C]//2013 6th Robotics and Mechatronics Conference (Rob-Mech), 2013: 87-92.
- [6] BARRETT J M, GENNERT M A, MICHALSON W R, et al. Development of a low-cost, self-contained, combined vision and inertial navigation system [C]//2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013: 1-6.
- [7] 马源, 符世琛, 张子悦, 等. 悬臂式掘进机位姿检测方法研究现状[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 15-20.  
MA Yuan, FU Shichen, ZHANG Ziyue, et al. Research status of pose detection methods of boom-type roadheader [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 15-20. (in Chinese)
- [8] SCHNEIDER O. Requirements for positioning and navigation in underground constructions [C]//2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2010: 1-4.
- [9] 田原. 悬臂式掘进机惯性定位技术与试验[J]. 煤矿机电, 2020, 41(1): 9-12.  
TIAN Yuan. Research and test on inertial positioning technology of boom-type roadheader [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2020, 41(1): 9-12. (in Chinese)
- [10] 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.  
TIAN Yuan. Inertial navigation positioning method of roadheader based on zero-velocity update [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 70-73. (in Chinese)
- [11] 金铃子, 王浩然, 李正龙. 捷联惯导与双目里程计融合的掘进机组合定位方法[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(12): 171-177.  
JIN Lingzi, WANG Haoran, LI Zhenglong. Roadheader intergrated positioning method based on fusion of SINS and binocular odometer [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(12): 171-177. (in Chinese)
- [12] 毛清华, 周庆, 安炎基, 等. 惯导与视觉信息融合的掘进机精确定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 236-248.  
MAO Qinghua, ZHOU Qing, AN Yanji, et al. Precise positioning method of tunneling machine for inertial navigation and visual information fusion [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 236-248. (in Chinese)
- [13] 贾文浩, 陶云飞, 张敏骏, 等. 基于iGPS的煤巷狭空间中掘进机绝对定位精度研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1920-1926.  
JIA Wenhao, Tao Yunfei, ZHANG Minjun, et al. Research on absolute positioning accuracy of roadheader based on indoor global positioning system in narrow and long coal tunnel [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1920-1926. (in Chinese)
- [14] 石勇. 基于三维激光雷达的掘进机实时位姿纠偏系统[J]. 煤矿机械, 2023, 44(5): 64-66.  
SHI Yong. Real-time pose correction system of roadheader based on three-dimensional lidar [J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(5): 64-66. (in Chinese)
- [15] 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.  
XUE Guanghui, LI Yuan, ZHANG Yunfei. Research on pose measurement system of cantilever roadheader based on laser target tracking [J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(7): 13-21. (in Chinese)
- [16] 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.  
WANG Xue, ZHOU Hongxu, ZHANG Lei, et al. Research on the cantilever roadheader positioning based on near-infrared binocular stereo vision [J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(7): 43-51. (in Chinese)
- [17] 赵灏, 吴凤林, 张琳. 模块化理念在煤机装备中的应用研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(7): 279-281.  
ZHAO Hao, WU Fenglin, ZHANG Lin. Application on modular design in coal machine equipment [J]. Coal Technology, 2016, 35(7): 279-281. (in Chinese)