

特约综述



江松,工学博士,教授,西安建筑科技大学资源工程学院院长助理、大数据系主任,入选2023年全国高校矿业石油与安全工程领域优秀青年科技人才、江苏省科技创新(双创)人才,担任中国岩石力学与工程学会露天开采与边坡工程委员会副秘书长。研究方向为智慧矿山、智能边坡监测与预警、矿山计算机视觉,主持国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目、中国博士后科学基金面上项目、陕西自然科学基金面上项目、国家重点实验室开放基金等纵向课题11项目,主持参与企业重大产学研项目20余项。以第一作者或通信作者在 *Process Safety and Environmental Protection*、《煤炭学报》《中国安全科学学报》等国内外学术期刊上发表论文50余篇,授权国家发明专利6项,研究成果先后获中国冶金矿山科学技术一等奖、中国有色金属工业协会一等奖、中国安全生产协会安全科技进步一等奖、陕西省科学进步三等奖等奖励。

SLAM技术在矿井智能化的研究现状与应用进展

徐中华¹, 张鑫¹, 付信凯¹, 崔智翔^{2,3}, 江松^{2,3,4}

(1. 中钢集团山东富全矿业有限公司, 山东 济宁 272516; 2. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安市智慧工业感知、计算与决策重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

摘要:智能采矿是矿井生产发展过程中的重要阶段,直接影响矿产企业的安全生产、矿产产量、经济效益和社会效益,随着矿井智能化水平的提高和相应政策的颁布,特别是我国智慧矿山和智能感知设备的快速发展和普及,矿井智能化地图构建和定位导航技术已成为重要的研究课题。回顾传统矿井地图绘制和定位技术的发展历程,结合矿井环境特点分析传统技术面临的挑战。介绍同步定位与建图(SLAM)技术在矿井智能化应用方面的优势,综述SLAM技术在非结构化复杂矿井工作环境下数字地图构建及无网络井下人、机/车定位导航的研究现状与应用进展。最后,对未来SLAM技术在矿井智能化领域中的发展趋势进行展望,即融合深度学习、三维重建与可视化、5G与云计算等。

关键词:同步定位与建图(SLAM); 矿井智能化; 智慧矿山; 采矿工程

中图分类号:TD 05; TP 391 **文献标志码:**A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24064



收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374136); 陕西省重点研发计划基金项目(2024GX-YBXM-495)

作者简介: 徐中华(1986—), 男, 山西运城人, 高级工程师, 主要研究方向为智慧矿山。

通信作者: 江松(1990—), 男, 江西鄱阳人, 工学博士, 教授, 博士后, 主要研究方向为智慧矿山、智能边坡监测与预警、矿山计算机视觉。

引文格式: 徐中华, 张鑫, 付信凯, 等. SLAM技术在矿井智能化的研究现状与应用进展[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 294-304.

Research Status and Application Progress of SLAM Technology in Mine Intelligence

XU Zhonghua¹, ZHANG Xin¹, FU Xinkai¹, CUI Zhixiang^{2,3}, JIANG Song^{2,3,4}

(1. Sinosteel Shandong Fuquan Mining Co., Ltd, Jining 272516, China; 2. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Key Laboratory of Perception, Computing and Decision Making for Intelligent Industry, Xi'an 710055, China; 4. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan 243000, China)

Abstract: Intelligent mining is an important stage in the development of mine production, which directly affects the safety production, mineral production, economic and social benefits of mineral enterprises. With the improvement of mine intelligence level and the promulgation of corresponding policies, especially the rapid development and popularization of intelligent mines and intelligent sensing equipment in China, mine intelligent map construction and positioning navigation technology has become an important research topic. The development process of traditional mine mapping and mine localization technology were reviewed. Combined with the characteristics of mine environment, the challenges faced by traditional technology were analyzed. The advantages of simultaneous localization and mapping (SLAM) technology and its application in mine intelligence were introduced. The research status and application progress of SLAM technology in unstructured complex underground working environment digital map construction and network-free underground human, machine/vehicle localization and mapping were summarized. Finally, the future development trend of SLAM technology in the field of mine intelligence was prospected, including the integration of deep learning, 3D reconstruction and visualization, 5G and cloud computing, etc.

Keywords: simultaneous localization and mapping (SLAM); intelligent mine; smart mine; mining engineering

近年,随着计算机运算能力的提高和科研人员对计算智能、感知智能和大数据等理论的不断优化,大数据、物联网等新兴技术得以迅猛发展,加之“智能矿井 2025”等矿井智能化建设政策的实施,采矿工程的发展进入了 1 个新的历史阶段^[1]。从国家发展战略《新一代人工智能发展规划》,以及矿业行业标准《智能矿山建设规范》、《有色金属行业智能矿山建设指南(试行)》的颁布与实施看,实现整个采矿工程由单个系统智能化转向多个系统协同智慧化方向发展,是实现智慧矿山第二阶段的主要目标^[2]。矿山测量和设备定位是矿山开采工程设计规划环节的重要组成部分之一,尤其是在环境恶劣、非结构化的矿山井下,如何勘察清楚矿山开采现状并准确、安全地指导矿井生产和开采,是矿井智能化建设中的关键环节。

全球定位系统(global positioning system, GPS)、实时动态(real-time kinematic, RTK)载波相位差分技术和遥感(remote sensing, RS)等传统测量技术常用于露天矿场景,无法对内部非结构化、没有通

信信号、光线条件不足等错综复杂条件的矿井巷道进行地图绘制与设备定位。同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术作为近年最热门、最先进的定位和建图技术,具有非接触性、全域性、高精度等特点,其以坐标变换法为基础,结合智能环境感知技术,常用来实现机器人、无人机、无人驾驶设备的定位及不同场景下的建图、路径规划等。在智能矿井建设中,SLAM 技术可用于无人矿卡、巡检机器人、激光扫描仪^[3]等设备,采集高精度点云信息并构建三维空间模型,为后续路径规划、自身定位和自主导航提供良好的先决条件。国外早期研究的 SLAM 技术大多针对室内环境或针对较为简单室外场景的定位和建图^[4-5];21 世纪初才开始将研究方向对准矿山场景,主要是在煤矿井下将 SLAM 技术用于扫描设备^[6]、移动小车^[7]、探测机器人^[8]等对环境建模,后来逐渐出现利用搭载 LIDAR 传感器和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的矿车来实现矿山的高精度地图构建^[9]、基于固定式扫描仪的矿井测绘^[10]等应用。国内在

矿井场景的研究开始仅针对工程车辆的粗略定位和避障系统的搭建,如无线电定位、惯性导航系统(inertial navigation system, INS)等经济实用的定位技术^[1],激光雷达、毫米波雷达等传感器仅用作自主避障^[12]。直到近年,国内学者才将 SLAM 技术用于矿井场景的应用研究。为此,综述传统矿井地图构建和定位方法及 SLAM 技术在矿井智能化方面的研究和应用现状,分析 SLAM 为实现高精地图构建和实时鲁棒定位性能需关注和待解决的问题,并对今后相关研究和应用场景发展趋势进行展望。

1 传统矿井地图绘制与定位技术

对于矿井地图的绘制与定位,早期主要依靠手工绘图及机械式测量,后逐渐发展为数字化地图与电子地图,并通过地理信息系统(geographic information system, GIS)进行分析和管理的;随着无线信号处理技术的发展,射频识别(radio frequency identification, RFID)等定位技术以其实时定位的优势被广泛用于矿井定位,并逐渐趋于多传感器融合。传统矿井绘图与定位技术的发展历程如图 1。

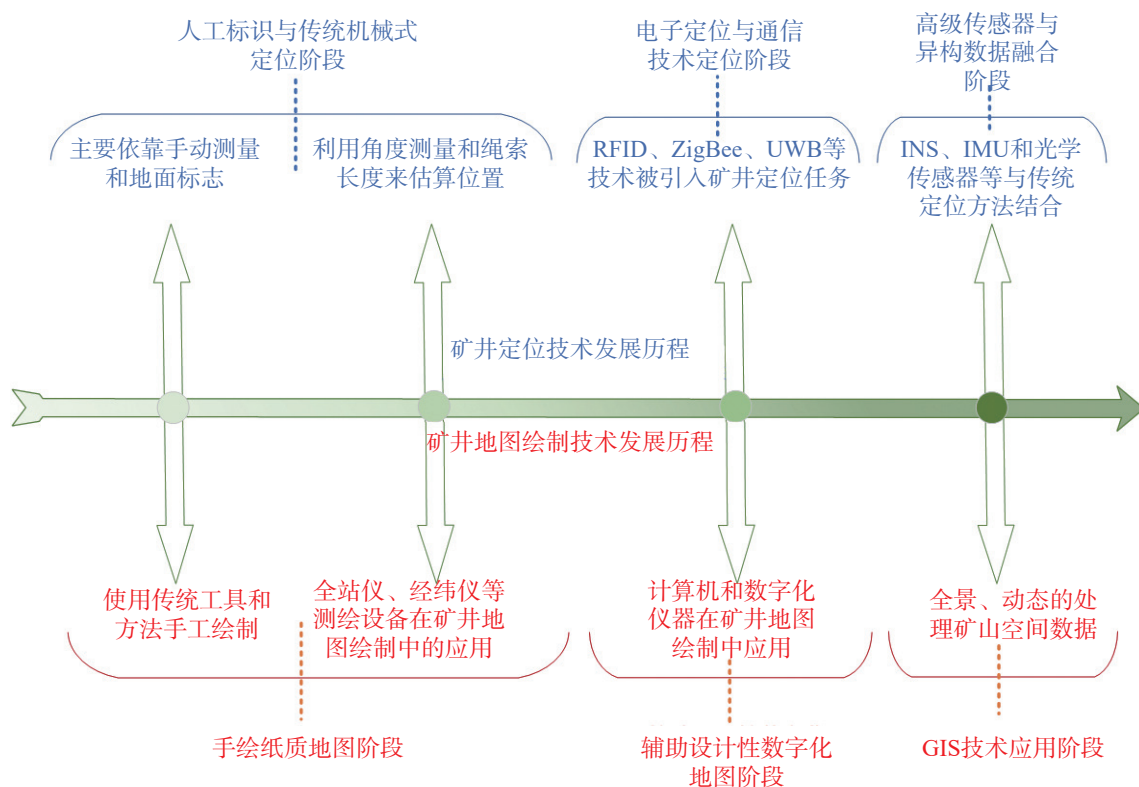


图1 传统矿井绘图与定位技术发展历程

Fig. 1 Development process of traditional mine map drawing and positioning technology

1.1 传统矿井地图绘制方法

如图 1, 矿井地图绘制技术的发展主要包括手绘纸质地图阶段、辅助设计性数字化地图阶段及 GIS 技术应用阶段。

1.1.1 手绘纸质地图阶段

矿井地图绘制的发展可追溯到古代人类开始探索和开采地下资源时,那时主要依靠亲临考察、手工绘制的地图记录矿井的布局 and 结构,通常是基于矿工的 actual 经验和观察,用纸和笔绘制而成。这种方法在矿井规模较小、结构简单的情况下具有一定的实用性,但耗时耗力,且精度极受人为因素影响。随着科学技术的发展,尤其是测绘技术的进步,自 20 世纪初开始采用经纬仪、水准仪等测量仪器绘制

矿井地图,一定程度上提高了绘图效率。但当矿井规模逐渐扩大,矿井地形结构逐渐趋于复杂时,纸质二维地图难以继续支持矿井的后续开采工作。

1.1.2 辅助设计性数字化地图阶段

20 世纪中后期,计算机技术的迅速发展为矿井地图绘制带来了革命性的变化,电子的、可视化的矿井地图受到矿业界关注^[13-14]。与传统纸质地图校对数据相比,矿井电子地图实现了将抽象符号转变为集合图像,加之图像表达的直观性,使用者由此能够进一步模拟矿井开采,并分析计算矿井内部的空间关系。计算机辅助设计(computer aided design, CAD)软件的出现使矿井地图的绘制变得快速、准确和高效,还可轻松修改和更新地图,绘制的地图能

更好地吻合矿井实际情况。然而,CAD的应用着重于数据的可视化而非模拟分析,导致矿山的大量属性信息得不到有效利用,使后续调度信息查询、生产经营决策变得非常困难。

1.1.3 地理信息系统技术应用阶段

GIS是在矿井环境中建立1个空间数据库,用于描述矿井地质信息、环境信息以及设备运行状态,将矿井生产状态进行全景和动态显示,进一步地通过存储的矢量地图和栅格地图数据对其进行分析^[15-16],可直观呈现矿井、钻孔、挖槽、采掘工作面的形态和机械装备的工作状态,真实准确地再现地表地层、围岩形态和矿体。但GIS擅长于历史数据和静态数据的处理,而非实时动态更新数据,使其应用在不断变化的矿井采掘中受到限制。

1.2 无网络强干扰矿井定位技术

如图1,矿井定位技术的发展主要包括人工标识与传统机械式定位阶段、电子定位与通信技术定位阶段、高级传感器与异构数据融合阶段。

1.2.1 人工标识与传统机械式定位阶段

20世纪80年代前,矿井的定位主要依赖于手动测量和地面标志,矿工通常通过设置简单的标志物如矿灯、标志牌或喷漆标记等进行辅助定位,存在劳动强度大、效率低下等不足。而且在复杂多变的矿井环境中,人工标识会因环境变化和人的主观判断而带来不可避免的误差。

1.2.2 电子定位与通信技术阶段

20世纪90年代起,随着数字信号处理与信道编解码技术的进步,基于电子设备的定位系统被用于矿井人员定位^[17-18],即通过在井下放置多个信号发射器实现对井下人员的定位。之后,以RFID^[19]、ZigBee^[20]和超宽带(ultra wide ban, UWB)^[21]为代表的无线通信技术受到关注。其中:RFID于21世纪初被投入矿井使用,用于跟踪人员和设备的移动,但只满足区域定位;ZigBee是基于短距离、低速率、低功耗的无线通信技术,但只能获取粗略的位置数据;UWB是目前诸多通信技术中唯一能在密闭空间达到工业应用的精确定位技术。

1.2.3 高级传感器与异构数据融合阶段

在矿井环境下,GPS、北斗等全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)由于无法穿透矿井深层,信号会大幅减弱甚至完全丧失。此外,矿井环境下的空气灰尘、漂浮颗粒物、水雾等会影响无线信号的稳定性,采掘机器、电机车等电气设备会产生电磁干扰,这些环境因素均会对无线

通信技术的定位产生负面影响。因此,需利用更先进、更多的传感器来辅助定位,由此产生了将INS和光学^[22]、IMU等传感器与传统定位方法进行融合的方法。Wang等^[23]开发IMU辅助的UWB定位系统,通过IMU提供的方向姿态信息来提高系统的定位精度;李明锋等^[24]进一步将UWB定位基站与5G基站以级联的方式连接,提出新型矿井定位基站模型,结果表明可将井下人员定位精度降低至15 cm。此外,融合异源数据和算法的指纹定位系统在近年也受到研究者的关注^[25-27]。

综上所述,随着科学技术的迭代和革新,矿井状态可被越来越准确地描述,且在矿井工作人员、设备定位等方面取得初步成效,但距离矿井智能化建设还有一定的发展空间。如传统矿井地图的绘制仍存在绘图效率低、地图精度低、地图三维数据不全面、地图更新难度大等问题;矿井定位仍面临现有技术定位精度不达标、定位方法抗干扰能力弱等难题,严重阻碍了矿井智能化建设。

2 SLAM技术在矿井环境下的研究与应用

为进一步克服矿井非结构化地形、强干扰环境对矿井地图绘制和井下定位任务的影响,当前研究正聚焦于无需外部设备辅助的多源异构传感器融合技术和更精确、鲁棒性更强的算法,SLAM技术在矿井智能化下的研究与应用应运而生,且被认为是当前地下矿井设备定位技术发展的必然趋势。

2.1 SLAM技术在矿井环境的应用方案

SLAM是移动机器人利用自身搭载的传感器构建收集并分析环境数据的1种技术,能够构建如栅格类、特征点类、点云类等数字地图(如图2),同时利用这些信息进行自主定位^[28]。



图2 常见数字地图

Fig. 2 Common digital maps

SLAM以设备搭载传感器的数据为输入,通过前端和后端处理数据来实现定位和建图功能。其中前端环节进行特征提取和数据耦合,实现实时位姿估计与局部建图;后端环境进行位姿优化和重定位,进而实现全局建图,并在回环检测环节将当前帧与历史帧比较以消除累计误差,保持全局一致性,整体

流程如图 3。前端部分的数据预处理算法与传感器的选择有关,如常见的激光和毫米波雷达着重于前端的扫描匹配;后端部分可实现全局状态估计,为 SLAM 算法的核心,算法核心方法以滤波法和优化法为主。针对设备精密度的提高和算法的迭代更新,

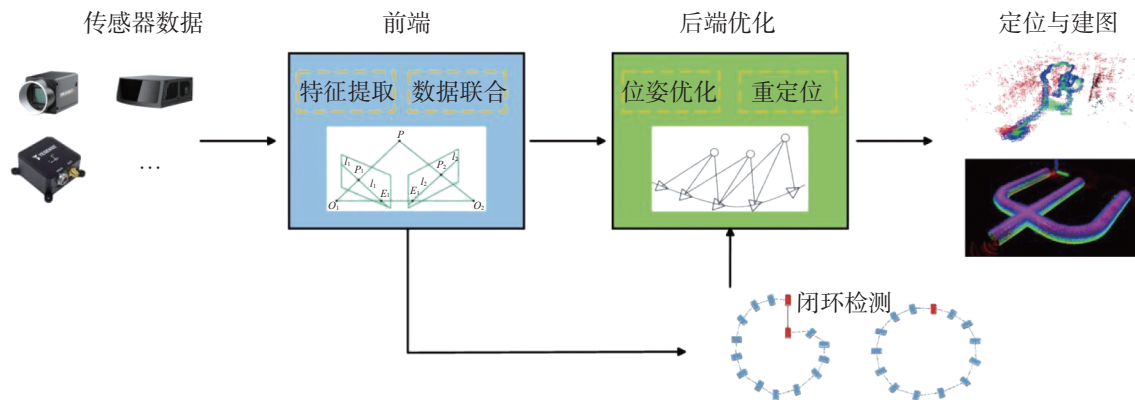


图3 SLAM 算法流程框图

Fig. 3 Algorithm procedure of SLAM

对于矿井环境,因地质环境复杂,直接使用点云图和重构地图均存在点云匹配拼接误差率大、数据量大,且存在冗余、无用信息等缺点。鉴于此,SLAM 算法在矿山上的应用多结合人工智能如神经网络、深度学习等来改进,以提高算法的鲁棒性。但算法的改进对硬件缺陷的弥补是有限的,因此多源异构传感器数据融合的方法^[18,33-34]亦被越来越多的学者关注,通过配置不同类型的感知传感器,将其收集到的数据进行坐标变换,在数据关联后再统一坐标系实现融合。考虑到视觉 SLAM 和激光 SLAM 各自的优缺点,有学者提出了将视觉与激光雷达融合的 SLAM 方法^[35-37],如通过视觉相机的大范围、大信息量等特点弥补激光扫描的退化现象,利用激光雷达高精度和更好的鲁棒性来提高运动估计的精度等,互相弥补不足。表 1 为矿山场景下常用的传感器组合(并标注部分代表文献),√代表已有的研究方案。其中,不同的视觉传感器会导致 SLAM 方法性能各异,而激光雷达的种类不会对 SLAM 方法产生太大的影响。

表 1 矿山用 SLAM 常见传感器组合

Tab. 1 Common sensor combinations of SLAM in mines

组合	次级类别	IMU	毫米波雷达	INS	视觉传感器	激光雷达
视觉传感器	单目相机	√ ^[38]		√ ^[41]		√ ^[41,44]
	双目相机			√ ^[42]		
	深度相机	√ ^[39]	√ ^[40]		—	
	全景相机			√ ^[43]		√ ^[45]
激光雷达	—	√ ^[46-47]	√ ^[40]	√ ^[41]	√ ^[41,44]	—

SLAM 算法以基于优化的方法为主,系统数据也趋于多源异构数据融合,技术框架也从开始的单线程向多线程演进。根据传感器分类,以视频流为输入数据的 SLAM 技术称为视觉 SLAM^[29-30],以激光点云为输入数据的 SLAM 技术称为激光 SLAM^[31-32]。

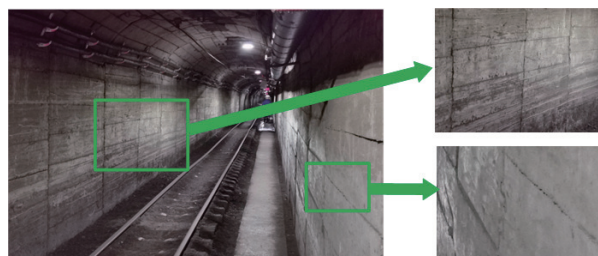
2.2 SLAM 技术在不同矿井场景下的研究应用

矿井因本身的工程特殊性,施工、开采及由此引发的矿井山体压力变化都会影响矿井的健康状态。矿井环境往往存在光线昏暗、光照条件不均匀,各种人工光源和反射面也会对矿井环境产生干扰,尤其影响视觉 SLAM 的效果;矿井内部环境相对单一,尽管存在大量的岩石、支架、管道等物体,但缺乏足够的纹理信息;粉尘和水雾可能导致图像失真,激光雷达难以穿透尘粒和水雾;地形复杂且多变,可能存在坑道、斜坡、台阶等不平整地面,其场景参考如图 4。这些问题往往不是单一出现,均会导致 SLAM 系统无法准确提取环境信息,增加 SLAM 系统的工作难度。



矿井场景(1): 光线昏暗、光照不均

场景细节



矿井场景(2): 缺乏足够纹理信息

场景细节



图4 矿井参考场景

Fig. 4 Mine reference scene

表 2 SLAM 技术在矿井应用的不同方案

Tab. 2 Different schemes of SLAM technology in mine application

应用方案/任务	针对弱光照	针对弱纹理	针对强干扰	针对复杂地形
多源异构数据融合	Jacobson等 ^[41] 、 江松等 ^[48] 、Wen等 ^[49]	杨林等 ^[46] 、 陈先中等 ^[51]	远洋等 ^[30] 、 Jacobson等 ^[41] 、Zhang ^[45] 、 陈先中等 ^[51] 、司垒等 ^[56]	Xu等 ^[44] 、张征 ^[59] 、 Chang等 ^[60] 、Li ^[61]
结合传统方法	—	顾清华等 ^[52]	李芳威等 ^[57]	顾清华等 ^[52] 、 张征 ^[59] 、李芳威 ^[58] 、 Kumar等 ^[62] 、Torres-torriti等 ^[63]
结合高效计算方法	冯玮等 ^[50]	杨林等 ^[46] 、 邹筱瑜等 ^[53] 、 李训杰 ^[54] 、 马宏伟等 ^[55]	司垒等 ^[56] 、杨健健等 ^[58]	贾学姣等 ^[39] 、Xu等 ^[44] 、 李芳威等 ^[57] 、Chang等 ^[60] 、 Buratowski等 ^[64] 、韩超等 ^[65] 、 Zhu等 ^[66] 、Rossi等 ^[67]
引入深度学习	江松等 ^[48] 、Wen等 ^[49]	—	—	—

2.2.1 矿井弱光照场景

矿井环境存在的光源问题制约着视觉 SLAM 技术在矿井巷道中的高效应用,当相机采集不到正常光照度的图像帧序列时,SLAM 前端将无法获取足够的特征点,导致 SLAM 系统甚至无法正常初始化。Jacobson 等^[41]运用激光雷达耦合单目相机,基于滤波法构建 SLAM 系统,在新南威尔士矿井测试的定位平均误差为 1.32 m。冯玮等^[50]基于传统图像增强方法,引入双边滤波的 Retinex 算法融合 ORB-SLAM2^[68],验证了矿井环境中图像增强算法用于视觉 SLAM 的可行性。进一步地,江松等^[48]制作煤矿井下暗光照、光照不均数据集,设计融合深度学习和解析解 IMU 初始化策略的 FCM-SLAM 系统,在 EuRoC 数据集上的实验结果表明,其在暗环境下的定位精度误差降低了 13.7%,如图 5 所示,在昏暗环

境下可提高 SLAM 前端特征点的提取数量。对于图 4 所示矿井场景,多采用如表 2 所示的方案展开研究:多源异构数据融合方法、结合传统方法、结合高效计算方法和引入深度学习方法,表中“—”代表暂无相应的公开研究。凭借多传感器融合,SLAM 技术能够弥补各传感器在特定矿井场景的不足,达到扩能增效的目的;基于与传统方法结合,SLAM 技术在保持精度的同时可降低工程部署难度;利用高效的数学计算方法,可提高 SLAM 运行速度;引入深度学习方法,可解决特定场景存在的问题。

境下可提高 SLAM 前端特征点的提取数量。

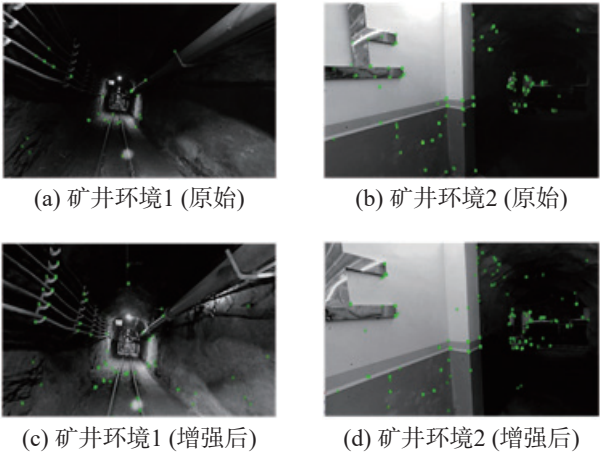


图5 融合深度学习方法的 SLAM 特征点提取数^[48]

Fig. 5 Number of SLAM feature point extracted by integrating deep learning method^[48]

2.2.2 矿井弱纹理场景

长直巷道是矿井中典型的弱纹理场景,不仅同样不利于特征点的提取,同时因“重复”场景过多而导致系统退化。邹筱瑜等^[53]提出1种基于集成因子图优化的方法,前端融合迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法和正态分布变换(normal distributed transform, NDT)算法设计点云匹配模块,后端构建集成 ICP 和 NDT 相对位姿的因子图优化模型,可降低长直巷道特征点缺失、建图重影现象发生的概率,但方法未涉及后续机器人的定位精度。顾清华等^[52]针对弱纹理、稀疏特征点的井下斜坡道口,提出1种适用于矿山井下斜坡道环境的定位与建图方法,通过点云高度差与坡度信息融合来改善斜坡道定位与建图问题,基于改进的CVC(curved-voxel clustering)聚类算法来改善高噪声环境下点云聚类鲁棒性,且在中钢集团山东某井下斜坡道的现场实验证明,与原算法相比精度提升13.15%, z 轴误差降低22.3%,地图质量明显提升,能有效解决井下无人驾驶建图及定位的难题。李训杰^[54]将光流法和点云复合滤波引入ORB-SLAM2^[68]中,构建稠密点云地图以检测矿井巷道形变状态,但特征点法和光流法的结合会占用大量的计算资源,如何设计更高效的耦合方案需进一步研究。

2.2.3 矿井强干扰环境

巷道掘进的整体工艺和装备水平直接影响矿井生产效率,现有综掘工作面仍需投入大量的工人辅助作业,距离实现掘进工作面的“少人则安,无人更安”的目标还相距甚远。激光SLAM技术通过运动模型结合数学统计,在建立巷道环境地图、估算掘进机位置和巷道内部障碍物监测方面可有效改善掘进工作效率^[59,69-70]。Zhang等^[45]基于开源库RTAB-Map框架将激光和视觉数据融合,提出利用视觉SLAM和激光SLAM技术估算掘进机位姿与构建导航地图的方法,实验证明在强干扰、动态条件下的煤矿巷道,该方法具有较强的鲁棒性。宋国栋^[71]设计代替传统安全员裸眼经验判断和便携检测设备的方法,将SLAM扫描结合地质雷达,生成井下巷道三维空间体,如图6所示,10 min内扫描所得模型精度可达3 cm。但对于工作面极易出现的扬尘和水雾(如图4矿井场景(3)),尚未有较好的解决方案。可考虑的方案是将视觉方法融合去雾、降噪等图像复原技术,或采用可穿透尘粒的毫米波雷达作为辅助传感器^[51]。

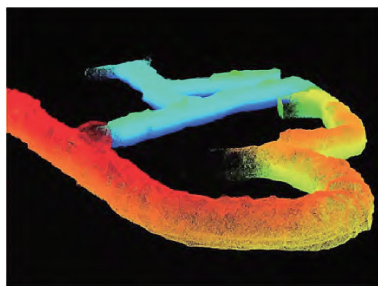


图6 SLAM扫描后的巷道空间体^[71]

Fig. 6 Roadway space body after SLAM scanning^[71]

2.2.4 矿井复杂地形

常见的矿井复杂地形包括断层、褶皱和较大起伏的地质构造复杂区,含水层、隔水层并伴随突水、涌水等风险的水文地质复杂区,以及顶板岩石破碎、稳定性差的区域等。智能设备在上述复杂地形的运用有助于实现矿井安全、矿井少人化及无人化管理。Mansouri等^[72]提出1种基于深度神经网络的井下无人机视觉位姿估计方法,但该方法存在计算资源需求量大、计算时长相对较长等问题。李芳威等^[57]基于Cartographer算法构建井下巷道环境的二位栅格地图,将Lazy Decision(LD)引入来优化Cartographer(1种激光SLAM技术)算法,可解决Cartographer建图时的重叠、模糊现象,提高建图精度;并设计基于全局路径规划A*算法和局部路径规划的无轨胶轮车自主导航方案。Chang等^[60]设计多机器人集中式SLAM系统LAMP 2.0,用于预支持大规模环境和多机器人场景下大型机器人之间和内部的回环检测,模拟矿井环境建图效果如图7,在轨迹长度2.2 km的情况下,误差达到2 m以下。编队目前仅能支持4台机器人,还无法扩展到大型机器人团队。若能针对矿井部署5G网络,在发挥个体机器人视野、算力的同时依靠数据流在云端汇总、实时更新,将可极大提高矿井建图效率。

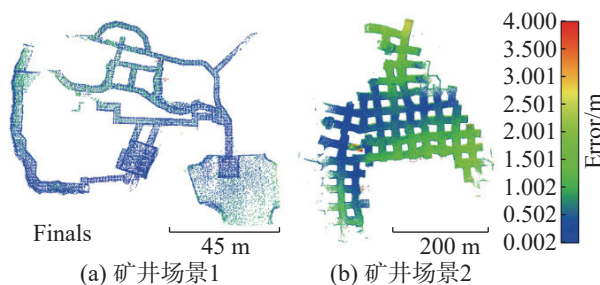


图7 LAMP2.0系统在矿井场景建图效果^[60]

Fig. 7 Mapping effect of LAMP2.0 system applied in the mine scene^[60]

矿井灾害事故会严重改变矿井地形结构,对矿工和救援人员造成极大的安全风险,即使在救援人

员可视范围内近距离遥控操作机器人也有很大的局限性。配备多个传感器的矿井救援机器人 (coal mine rescue robots, CMRRs) 可实时、全面地对事故现场进行巡检并重新建立与灾区的通信^[73-74]。灾害事故会导致矿井电源中断,故 CMRR 须使用自身配备的光源,但其光照强度低、变化剧烈,严重干扰视觉 SLAM 的应用;此外,CMRR 中的传感器还须满足防爆要求,大大限制了可用传感器的类型。Li 等^[61]基于正态分布变换 (normally distributed transform, NDT) 构建紧耦合激光里程计,并基于地板和墙壁提取平面节点特征构建地标约束,误差减小了 19%,但最小闭环优化时间上升至 1.56 s。Buratowski 等^[64]基于自适应蒙特卡洛定位 (adaptive Monte Carlo localization, AMCL) 和扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 创建三维地图,用于机器人在存在风险的封闭或孤立区域内的检查与救援行动。张征^[59]基于双目相机融合 IMU 和 UWB 测距原理,提出 1 种视觉/IMU/UWB 融合定位技术,该技术属于 SLAM 融合传统定位技术,在 SLAM 消耗较多计算资源的情况下,这种方法在工程上更易实现。Rossi 等^[67]以球型水下机器人 UNEXMIN^[75]为实验平台,如图 8 所示,设计基于拓扑的导航系统,构建淹没地下矿井非结构化未知环境的数字地图,并根据三维网络进行定位与自主导航收集数据,此思路可移植到海底采矿应用上,但还需进一步研究。



图8 球型水下机器人 UNEXMIN^[66]

Fig. 8 Spherical underwater vehicle UNEXMIN^[66]

3 结论与展望

3.1 结论

1) 矿井地图绘制与设备定位已成为实现矿井智能化建设的主要任务之一,传统的绘图和定位手段已无法满足矿井智能化需求。

2) SLAM 技术在矿井应用中面临的问题场景为矿井场景的弱光照、弱纹理、强干扰 (振动、水雾、扬尘等)、复杂地形 (地质构造复杂区、水文地质复杂区、灾后区)。

3) SLAM 技术在矿井环境的应用方案主要包括多源异构传感器融合,能够有效提高 SLAM 精度,但数据融合有一定复杂性;结合传统方法,部署成本低,但精度提升有限;利用高效计算方法能有效提高 SLAM 精度,但设备算力要求高;引入深度学习方法,能有效应对特定场景、显著提高 SLAM 精度,但对设备算力要求高,且影响 SLAM 计算速度。

4) SLAM 技术在矿井环境的应用方案除与多源异构传感器融合外,还可进一步结合 VR, AR, 5G 和云计算等新兴技术,为 SLAM 技术扩能增效,推进矿井智能化、乃至无人化进程。

3.2 展望

随着矿井采掘进程不断深化,矿井智能化建设对矿井地图绘制和智能设备定位技术要求的精度和稳定性越来越高。传统技术手段由于准确性不高、抗干扰性差等因素已不能满足未来矿井智能化技术发展的需求。随着 SLAM 技术向着结合深度学习、多源异构数据融合的方向发展,其实用性已逐渐体现在矿井作业上,无人机高清巷道建模、地下场景的测绘测量、应对复杂环境的救援机器人等衍生领域,这些新兴技术的应用有望进一步满足智能装备在井下作业的实际要求,未来可从以下方面开展进一步研究。

1) 深度学习深耦合 SLAM,深度解析矿井环境。深度学习在图像识别和特征提取领域已取得显著成果,将其与 SLAM 技术结合,可使 SLAM 系统更具有针对性地应用在掘进工作面、未知和灾后等特定场景,甚至实现准确地识别动态目标、分割矿井环境等任务,从而完成更精确的建图和定位任务。

2) 传统技术辅助 SLAM,提高部署可行性。露天矿已采用 GPS 辅助 SLAM 进行路网建图和矿卡定位,而在矿井场景,将传统技术尤其是定位技术作为辅助手段,可在减轻 SLAM 计算压力的同时,以更低成本部署高精度的定位设备。

3) 实时 SLAM 的三维重建与可视化,提升矿井采掘作业体验。随着智能设备计算能力的提升和算法的优化,SLAM 技术有望结合虚拟现实 (virtual reality, VR) 或增强现实 (augmented reality, AR) 技术,帮助矿井人员进一步了解矿井结构和布局,实现矿井少人化安全高效生产作业,为矿井人员提供更直观、沉浸式的矿井作业体验。

4) SLAM 技术结合 5G、云计算,实现高效协同作业。通过 5G 网络的高速传输和低延迟特性,实现智能设备与远程控制中心之间的实时数据交互和

协同作业,如将 5G 网络部署到矿井中,为 SLAM 技术提供强大计算资源的云算力,减轻设备计算负担。

将来,井下采矿工程更具智能化,也将加速推进智慧矿山建设。特定任务下的新思路也将带动 SLAM 技术在特种作业环境下的成熟度,提升其向新质生产力的转化程度,为技术本身带来进步和突破。

参考文献:

- [1] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿2025情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.
- [2] 顾清华,江松,李学现,等.人工智能背景下采矿系统工程发展现状与展望[J].金属矿山,2022(5):10-25.
- [3] 李金星,马毅敏,付信凯.李官集铁矿溜井三维激光扫描测量及稳定性分析[J].现代矿业,2024,40(1):44-47.
- [4] OLUF S, VINCZE M. An efficient area-based observation model for monte-carlo robot localization[C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St Louis: IEEE, 2009:13-20.
- [5] HUANG S, WANG Z, DISSANAYAKE G. Sparse local submap joining filter for building large-scale maps[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(5):1121-1130.
- [6] BOSSE M, ZLOT R, FLICK P. Zebedee: design of a spring-mounted 3D range sensor with application to mobile mapping[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(5):1104-1119.
- [7] HUBER D F, VANDAPEL N. Automatic three-dimensional underground mine mapping[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(1):7-17.
- [8] THRUN S, THAYER S, WHITTAKER W, et al. Autonomous exploration and mapping of abandoned mines[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2004, 11(4):79-91.
- [9] ZLOT R, BOSSE M. Efficient large-scale three-dimensional mobile mapping for underground mines[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(5):758-779.
- [10] LAVIGNE N J, MARSHALL J A. A landmark-bounded method for large-scale underground mine mapping[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(6):861-879.
- [11] 孙继平,江赢.矿井车辆无人驾驶关键技术研究[J].工矿自动化,2022,48(5):1-5,31.
- [12] 韦海良,郭安斌,董文斌,等.矿用卡车毫米波雷达防撞系统的应用[J].煤矿安全,2015,46(S1):43-47.
- [13] 郭康平.基于GLScene的矿井三维可视化系统的设计与实现[D].大连:大连理工大学,2009.
- [14] ARONOFF S. Geographic information systems: a management perspective[J]. Geocarto International, 1989, 4(4):58-58.
- [15] 赵国宁.基于GIS煤矿井下电子地图系统的研究[D].西安:西安科技大学,2010.
- [16] 付达杰,姜蕴莉.基于WebGIS的矿区电子地图的设计[J].煤炭技术,2013,32(11):141-142.
- [17] DELOGNE P. Communications: radio goes underground: communicating in mine tunnels has been taken seriously by radio and microwave engineers only in the last decade[J]. IEEE Spectrum, 1980, 17(7):26-29.
- [18] 毕林,王黎明,段长铭.矿井环境高精度定位技术研究现状与发展[J].黄金科学技术,2021,29(1):3-13.
- [19] 李锋.煤矿井下精确定位技术现状及应用[J].工矿自动化,2023,49(S1):44-46.
- [20] MA H, XUE W. Research on the system of mine intelligent positioning[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131(4):2493-2500.
- [21] 王雪莉,卢才武,顾清华,等.无线定位技术及其在地下矿山中的应用[J].金属矿山,2009(4):21-125.
- [22] 薛卓.可见光定位技术在矿井人员定位系统中的应用研究[J].煤炭技术,2024,43(3):267-270.
- [23] WANG L, ZHANG S, QI J, et al. Research on IMU-assisted UWB-based positioning algorithm in underground coal mines[J]. Micromachines, 2023, 14(7):1481.
- [24] 李明锋,刘用,等.基于5G+UWB和惯导技术的井下人员定位系统[J].工矿自动化,2024,50(1):25-34.
- [25] 王智勇,张宏伟,卜旭辉.基于UWB与指纹定位的矿井移动目标TOA定位算法[J].矿业研究与开发,2024,44(3):192-200.
- [26] 金华明,许凡非,王巧利,等.煤矿井下WSN自适应更新指纹地图定位算法研究[J].小型微型计算机系统,2020,41(6):1253-1257.
- [27] SONG M, QIAN J. Underground coal mine fingerprint positioning based on the MA-VAP method[J]. Sensors, 2020, 20(18):5401.
- [28] 于向军,槐元辉,姚宗伟,等.工程车辆无人驾驶关键技术[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(4):1153-1168.
- [29] 王朋,郝伟龙,倪翠,等.视觉SLAM方法综述[J].北京航空航天大学学报,2024,50(2):359-367.
- [30] 远洋,尤文博,江松,等.基于视觉惯性融合的井下无人车定位方法研究[J].矿业研究与开发,2024,44(2):178-185.
- [31] 龚建萍.三维扫描技术在井下测量中的应用探讨[J].铜业工程,2020(4):25-27,47.
- [32] 王锦凯,贾旭.视觉与激光融合SLAM研究综述[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2020,40(6):356-361.
- [33] SINGANDHUPE A, LA H M. A review of SLAM techniques and security in autonomous driving[C]//2019 Third IEEE international conference on robotic computing

- (IRC). Naples: IEEE, 2019:602–607.
- [34] XU X, ZHANG L, YANG J, et al. A review of multi-sensor fusion SLAM systems based on 3D LIDAR[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12):2835.
- [35] 佟国峰, 杨宇航, 彭浩, 等. 基于视觉语义与激光点云交融构建的SLAM算法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 103–111.
- [36] SHAO W, VIJAYARANGAN S, LI C, et al. Stereo visual inertial LIDAR simultaneous localization and mapping[C]// 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019:370–377.
- [37] ZHAO S, ZHANG H, WANG P, et al. Super odometry: IMU-centric LiDAR-visual-inertial estimator for challenging environments[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague: IEEE, 2021:8729–8736.
- [38] ZHU D, JI K, WU D, et al. A coupled visual and inertial measurement units method for locating and mapping in coal mine tunnel[J]. *Sensors*, 2022, 22(19):7437.
- [39] 贾学蛟, 张文涛, 赖景宜, 等. 基于多源信息融合的掘进机器人定位研究[J]. *煤矿机械*, 2022, 43(12):201–205.
- [40] 贺海涛, 廖志伟, 郭卫. 煤矿井下无轨胶轮车无人驾驶技术与探索[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(S1): 212–217.
- [41] JACOBSON A, ZENG F, SMITH D, et al. What localizes beneath: a metric multisensor localization and mapping system for autonomous underground mining vehicles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2021, 38(1):5–27.
- [42] HE K, MA X. Research on avoidance obstacle strategy of coal underground inspection robot based on binocular vision[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing: IEEE, 2017:6732–6737.
- [43] YANG Y, YANG D, WANG D, et al. Multi-camera visual SLAM for off-road navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 128:103505.
- [44] XU J, HUANG Y, ZHAO R, et al. Probabilistic membrane computing-based SLAM for patrol UAVs in coal mines[J]. *Journal of Sensors*, 2021(9):7610126.
- [45] 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):4968.
- [46] 杨林, 马宏伟, 王岩. 煤矿井下移动机器人基于激光惯性的融合SLAM算法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3523–3534.
- [47] WANG J, ZHAO M, CHEN W. MIM_SLAM: a multi-level ICP matching method for mobile robot in large-scale and sparse scenes[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12):2432.
- [48] 江松, 崔智翔, 代碧波, 等. 暗环境适应性的基于SLAM的煤矿井下机器人定位方法[J]. *煤炭科学技术*, [2024 –03 –26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20240325.1341.004>.
- [49] WEN T, FANG Y, LU B, et al. LIVER: a tightly coupled LIDAR-inertial-visual state estimator with high robustness for underground environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(3):2399–2406.
- [50] 冯玮, 姚顽强, 蔺小虎, 等. 顾及图像增强的煤矿井下视觉同时定位与建图算法[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(5): 74–81.
- [51] 陈先中, 刘荣杰, 张森, 等. 煤矿地下毫米波雷达点云成像与环境地图导航研究进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6):2182–2192.
- [52] 顾清华, 白昌鑫, 陈露, 等. 基于多线激光雷达的井下斜坡道无人矿卡定位与建图方法[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3):1680–1688.
- [53] 邹筱瑜, 黄鑫森, 王忠宾, 等. 基于集成式因子图优化的煤矿巷道移动机器人三维地图构建[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(12):57–67,92.
- [54] 李训杰. 基于视觉SLAM的煤矿井下巷道变形检测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [55] 马宏伟, 王岩, 杨林. 煤矿井下移动机器人深度视觉自主导航研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6):2193–2206.
- [56] 司垒, 王忠宾, 魏东, 等. 基于IMU–LIDAR紧耦合的煤矿防冲钻孔机器人定位导航方法[J]. *煤炭学报*, [2024–03–28]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0832>.
- [57] 李芳威, 鲍久圣, 王陈, 等. 基于LD改进Cartographer建图算法的无人驾驶无轨胶轮车井下SLAM自主导航方法及试验[J]. *煤炭学报*, [2024–04–01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0731>.
- [58] 杨健健, 王超, 张强, 等. 井工巷道环境建模与掘进障碍检测方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(11):12–18.
- [59] 张征. 基于多传感器数据融合的煤矿井下移动机器人精确定位技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [60] CHANG Y, EBADI K, DENNISTON C, et al. LAMP 2.0: a robust multi-robot SLAM system for operation in challenging large-scale underground environments[C]// in IEEE Robotics and Automation Letters. USA: IEEE, 2022:1–8.
- [61] LI M, ZHU H, YOU S, et al. Efficient laser-based 3D SLAM for coal mine rescue robots[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:14124–14138.
- [62] KUMAR S S, JABANNAVAR S S, SHASHANK K R, et al. Localization and tracking of unmanned vehicles for

- underground mines[C]//2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). Coimbatore: IEEE, 2017:1–4.
- [63] 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.
- [64] BURATOWSKI T, GARUS J, GIERGIEL M, et al. Real-time 3D mapping in isolated industrial terrain with use of mobile robotic vehicle[J]. *Electronics*, 2022, 11(13):2086.
- [65] 韩超, 陈敏, 黄宇昊, 等. 基于全局特征描述子的激光 SLAM回环检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(10):1379–1387.
- [66] ZHU D, SUN X, LIU S, et al. A SLAM method to improve the safety performance of mine robot[J]. *Safety Science*, 2019, 120:422–427.
- [67] ROSSI C, CARO ZAPATA A, MILOSEVIC Z, et al. Topological navigation for autonomous underwater vehicles in confined semi-structured environments[J]. *Sensors*, 2023, 23(5):2371.
- [68] MUR-ARTAL R, TARDÓS J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(5):1255–1262.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 宋国栋. 面向掘进工作面爆破质量评价的移动测量机器人技术研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4):182–186.
- [72] MANSOURI S S, KANELAKIS C, KOMINIAK D, et al. Deploying MAVs for autonomous navigation in dark underground mine environments[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 126:103472.
- [73] 郑学召, 赵炬, 张铎, 等. 煤矿救援机器人研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9):7–12.
- [74] 张立宽, 武强. 新中国70年煤炭工业铸就十大辉煌[J]. 中国能源, 2019, 41(10):4–8.
- [75] LOPES L, ZAJZON N, BODO B, et al. UNEXMIN: developing an autonomous underwater explorer for flooded mines[J]. *Energy Procedia*, 2017, 125:41–49.

责任编辑: 何莉