

Research on the Technology and Practical Application of Autonomous Mobile Inspection Robot in Fully Mechanized Mining Face

Zhidong Cui

Nanjing North Road Intelligent Control Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211161, China

Abstract

This paper studies the technology and application of autonomous mobile inspection robots for fully mechanized mining faces, and explores their importance in the intelligentization of coal mines. By analyzing national policies, technological status, and challenges faced, an autonomous mobile inspection robot system suitable for fully mechanized mining faces has been designed, focusing on solving key technical problems such as flexible tracks, seamless roaming of mobile communication, and autonomous operation. The experimental and application results show that the system improves the monitoring efficiency and safety of the fully mechanized mining face, and verifies the effectiveness and practicality of the autonomous mobile inspection robot in intelligent mining.

Keywords

fully mechanized mining face; autonomous mobile inspection robot; intelligent coal mine; SLAM technology; real-time monitoring

综采工作面自主移动巡检机器人技术与实践应用研究

崔志东

南京北路智控科技股份有限公司, 中国·江苏 南京 211161

摘 要

论文研究了综采工作面自主移动巡检机器人的技术和应用, 探讨其在煤矿智能化中的重要性。通过分析国家政策、技术现状和面临的挑战, 设计了一种适用于综采工作面的自主移动巡检机器人系统, 重点解决了柔性轨道、移动通信无缝漫游和自主操作等关键技术问题。实验和应用结果表明, 该系统提高了综采工作面的监控效率和安全性, 验证了自主移动巡检机器人在智能开采中的有效性和实用性。

关键词

综采工作面; 自主移动巡检机器人; 煤矿智能化; SLAM技术; 实时监控

1 研究背景及意义

随着科技的进步和煤矿工业的发展, 智能化采矿逐渐成为行业趋势。综采工作面作为煤矿开采的重要环节, 其环境复杂且危险, 对安全生产提出了严峻挑战。传统的人工巡检方式存在劳动强度大、危险性高、效率低等问题, 亟需一种更安全、高效的解决方案。自主移动巡检机器人在此背景下应运而生, 其具备自主导航、智能感知和远程控制等功能, 可以大幅提高巡检的效率和准确性, 降低人员风险, 提升煤矿的整体智能化水平。因此, 研究综采工作面自主移动巡检机器人的技术与实践应用具有重要的现实意义和应用价值。

2 综采工作面巡检机器人系统设计

2.1 系统总体架构

综采工作面巡检机器人系统由地面控制中心、通信网络、巡检机器人三部分组成。地面控制中心负责系统的整体监控、任务调度和数据分析; 通信网络保障控制指令和数据信息的可靠传输; 巡检机器人按照预设或动态规划的路线进行巡检, 实时采集并上传数据。系统设计考虑模块化和可扩展性, 便于根据实际需求进行调整和升级。

2.2 巡检机器人硬件设计

2.2.1 底盘与驱动系统

底盘采用两轮驱动系统, 选用聚氨酯胶轮通过拉力弹簧紧紧卡在柔性轨道上, 适应综采工作面的复杂地形。驱动系统由 2 个无刷直流电机组成, 每个电机配备独立的驱动器和控制器, 实现精确的速度和方向控制。底盘还配置了多个支撑轮和导向轮, 以确保机器人在崎岖不平的轨道上平稳行驶。

【作者简介】崔志东(1978-), 男, 中国河南新乡人, 本科, 工程师, 从事煤矿及化工机械自动化研究。

2.2.2 传感器与检测设备

传感器系统包括多线激光雷达、深度相机、气体检测仪等。激光雷达用于构建环境地图和障碍物检测；深度相机提供高精度的三维点云数据，辅助机器人导航；气体检测仪实时监测甲烷、一氧化碳等有害气体浓度，确保工作环境安全。所有传感器通过数据融合算法协同工作，提高检测的准确性和可靠性。

2.2.3 电源与能量管理

考虑到井下长时间作业的需求，机器人采用高性能密封兼本安型电池组作为主电源，并配备能量管理系统。能量管理系统监控电池状态，优化充放电过程，延长续航时间。此外，机器人还支持快速更换电池功能，以满足连续作业的要求。

2.3 软件系统设计

2.3.1 操作系统与中间件

巡检机器人的操作系统选用稳定性高的实时操作系统（RTOS），以保证任务的及时响应和处理。中间件采用ROS（Robot Operating System），提供标准化的通信协议和丰富的工具包，促进各模块之间的协作开发。

2.3.2 导航与定位算法

导航与定位是自主移动巡检机器人的核心技术之一。论文采用SLAM技术进行实时定位与地图构建。SLAM算法融合激光雷达和惯性导航数据，生成高精度的环境地图，并通过闭环检测纠正位姿误差。机器人利用该地图进行自主导航。

2.3.3 数据处理与通信协议

数据处理模块整合各类传感器信息，通过数据融合算法提高环境感知的精度和可靠性。通信协议采用Wi-Fi与4G/5G混合模式，保证数据传输的稳定性和实时性。关键数据通过加密传输，确保信息安全。此外，系统支持远程固件更新和故障诊断功能，便于维护和管理。

3 自主移动巡检机器人关键技术

3.1 并发建图与定位（SLAM）技术

3.1.1 SLAM 基本原理

SLAM（Simultaneous Localization and Mapping，即并发建图与定位）技术是机器人在未知环境中进行自主导航的核心。其基本原理是通过传感器获取环境信息，实时构建地图，同时估算自身在地图中的位置。SLAM技术分为前端和后端两部分：前端处理原始传感器数据关联和初步映射，后端则进行全局一致性优化。常用的SLAM算法包括Gmapping、Cartographer等。

3.1.2 激光 SLAM 与视觉 SLAM 对比

激光SLAM基于激光雷达的高精度距离测量，构建二维或三维地图，具有稳定性高的优点，但对环境细节表现较差。视觉SLAM则利用摄像头获取丰富的环境纹理信息，成本较低且信息量大，但在光照变化和快速运动情况下表现不佳。两者结合的多传感器融合SLAM成为当前研究的热

点，能够在不同应用场景中发挥各自的优势。

3.2 柔性轨道设计与应用

3.2.1 柔性轨道材料选择

柔性轨道材料需要具备高强度、耐磨损、耐腐蚀等特性。通常选用高强度钢、聚合物或复合材料，如聚氨酯、碳纤维等，这些材料不仅重量轻便，还能承受较大的机械负荷。此外，柔性轨道表面涂有耐腐蚀层，以延长使用寿命。

3.2.2 柔性轨道布局方案

柔性轨道设计需要考虑综采工作面的实际地形和设备分布。一般采用模块化设计，每段轨道之间通过柔性连接件相连，允许一定的弯曲和扭曲，适应地形变化。轨道布局应尽量避免与现有设备发生干涉，同时保证巡检机器人的畅通无阻。典型的布局方案沿刮板机顶部铺设轨道，兼顾高度和稳定性。

3.3 移动通信无缝漫游技术

3.3.1 无缝漫游基本原理

无缝漫游技术通过多个接入点（AP）的合理布置，实现机器人在大面积区域内的连续网络覆盖。当机器人在不同接入点之间移动时，网络能自动切换并保持连接不中断。关键技术包括邻居列表管理和切换算法的优化，确保漫游过程中通信的稳定性和低延迟。

3.3.2 双频 Wi-Fi 零切换技术

双频Wi-Fi零切换技术结合2.4GHz和5GHz频段的优势，提供更稳定的无线连接。2.4GHz频段覆盖范围广但速度较慢，而5GHz频段速度快但穿透力差。通过智能选择频段并自动切换，保证机器人在不同环境下都能获得最佳连接质量。此外，采用零切换技术，确保在漫游过程中数据流不断、通信不中断。

3.4 自主操作与远程控制技术

3.4.1 自主导航技术

自主导航技术使机器人能够在未知环境中独立完成巡检任务。通过SLAM技术生成环境地图后，机器人利用路径规划算法（如A*或Dijkstra算法）选择最优路径。同时，结合实时避障算法（如TF-IDDF），动态调整路径以避免突发障碍物。

3.4.2 远程控制架构

远程控制架构包括地面控制中心、通信链路和机器人端控制系统。地面控制中心提供用户界面，显示机器人状态、地图和视频流等信息。通信链路采用光纤或无线网络，确保控制指令和数据信息的可靠传输。机器人端控制系统负责执行具体任务，并将现场情况反馈给地面控制中心。整体架构要求高度集成化和模块化，便于维护和升级。

4 综采工作面巡检机器人工程应用

4.1 现场部署方案

4.1.1 轨道安装与调试

轨道的安装过程涉及多个步骤。首先进行现场测量与

规划,确定轨道的最佳布局;然后准备轨道材料,并根据设计进行切割和组装。轨道安装完成后,进行详细的调试工作,确保轨道平整度和连接点的牢固性。此过程还包括设置初始坐标系和标定传感器位置,为后续导航做准备。

4.1.2 机器人部署流程

机器人部署流程包括以下几个步骤:首先是预检查,确保所有设备功能正常;接下来是轨道测试,验证轨道的连续性和平滑性;然后进行机器人与轨道的适配测试;最后启动机器人并进行初步试运行,确保其能够按预定轨迹稳定运行。部署过程中需严格按照操作规程进行,避免任何可能的操作失误。

4.2 数据采集与处理

4.2.1 实时数据采集方法

实时数据采集依赖于多种传感器的协同工作。激光雷达提供高精度的距离信息,用于构建环境地图;深度相机捕捉详细图像数据,辅助识别标志物;气体检测仪实时监测环境中的有害气体浓度;温度传感器监控设备的温度变化情况。所有传感器数据通过统一的数据采集卡进行收集,并传输到中央处理单元进行实时处理。

4.2.2 数据处理与存储策略

数据处理包括预处理、特征提取和存储三个步骤。预处理阶段进行数据清洗和去噪;特征提取阶段采用机器学习算法识别关键特征;存储阶段使用分布式数据库保证数据的高可用性和可靠性。所有处理后的数据都打上时间戳和标签,便于后续查询和分析。

5 实验与测试

5.1 实验设计

5.1.1 实验目的与方案

本实验旨在评估综采工作面自主移动巡检机器人在不同环境和工况下的性能表现。实验主要包括轨道适应性测试、数据传输稳定性测试和自主导航精度测试三个方面。轨道适应性测试模拟井下复杂地形,检验轨道的耐用性和机器人的通过能力;数据传输稳定性测试评估在不同距离和障碍条件下的通信效果;自主导航精度测试验证 SLAM 算法在实际环境中的定位精度和地图构建能力。

5.1.2 实验设备与环境搭建

实验设备包括一台自主移动巡检机器人、一条装有柔性轨道的综采工作面模型、多种环境传感器以及地面控制中心。柔性轨道布局按照实际综采工作面设计,包含上下坡、弯道和障碍物等复杂地形元素。环境传感器包括高精度激光雷达、深度相机、气体检测仪等。地面控制中心配置高性能服务器和监控大屏,用于实时数据显示和远程控制。整个实验环境尽可能还原井下真实工况,确保测试结果的可信度。

5.2 测试结果与分析

5.2.1 轨道适应性测试结果

轨道适应性测试表明,柔性轨道在各种复杂地形条件下均表现出色。机器人顺利通过了上下坡、弧度路段,轨道无明显变形或损坏迹象。巡检机器人在轨道上运行平稳,达到设计要求。实验证明,柔性轨道设计能够满足综采工作面的实际需求。

5.2.2 数据传输稳定性测试结果

数据传输稳定性测试结果显示,双频 Wi-Fi 零切换技术在大部分场景下表现良好,只有在极端条件下(如大量金属设备干扰)才出现短暂的信号中断。总体而言,数据传输的稳定性和实时性达到了预期效果,能够支持综采工作面的远程监控需求。

5.2.3 自主导航精度测试结果

自主导航精度测试采用先进的 SLAM 算法,结果表明机器人在已知地图上的导航误差控制在 $\pm 2\text{cm}$ 以内,能够准确识别环境中的固定特征。在动态障碍物存在的情况下,导航精度有所下降,但仍能满足实际操作需求。SLAM 算法在新环境中的建图速度较快,能够实时更新地图信息,确保巡检任务的顺利进行。

5.3 问题讨论与改进建议

实验过程中发现的主要问题包括:柔性轨道在极限条件下的耐久性、数据传输在强电磁干扰下的稳定性以及动态障碍物对自主导航精度的影响。针对这些问题,提出以下改进建议:首先,优化柔性轨道材料配方,增加耐磨性和抗拉强度;其次,引入更强大的抗干扰技术,如自适应频谱跳变和信号加强器;最后,结合多传感器融合技术和机器学习算法,提高动态环境中的导航精度。通过以上改进措施,进一步提升综采工作面自主移动巡检机器人的综合性能。

6 结论

论文围绕综采工作面自主移动巡检机器人的关键技术及实践应用展开深入研究。通过设计一种适用于综采工作面的自主移动巡检机器人系统,解决了柔性轨道应用、移动通信无缝漫游及自主操作等技术难题。实验结果表明,该系统能够有效提高综采工作面的监控效率和安全性,验证了自主移动巡检机器人在智能开采中的实用性和可行性。论文的研究对推动煤矿智能化进程具有重要意义。

参考文献

- [1] 任伟.煤矿本安型轨道式巡检平台研制与应用[J].智能矿山,2023,4(8):66-72.
- [2] 任伟.综采工作面自主移动巡检机器人技术及工程实践[J].智能矿山,2023,4(5):60-65.
- [3] 李延河.“数智”引擎助力煤矿智能化跑出“新速度”——河南平宝煤业有限公司智能化建设纪实[J].智能矿山,2024,5(1):25-32.