

基于机器人巡检的矿冶领域四足机器人开发研究

郭丽敏, 张维国, 古 健, 李建舟, 郝朋越, 刘 君

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 随着物联网的普及, 各行各业的数字化转型和智能化升级已经成为必然趋势, 实现大量基础设施和设备运转的无人值守, 机器人巡检和运维成为关键环节。矿冶生产场景存在厂区结构复杂、设备多样, 工艺阀门众多且危险系数高等特点, 机器人巡检仅在某些典型场景取得了一些应用成果。本文综述了目前主流的几类智能巡检机器人的特点及应用案例, 自主研发了四足巡检机器人, 在矿冶领域的安全预警和应急疏散中取得了较好的应用效果。

[关键词] 巡检机器人; 矿冶领域; 导航控制; 环境感知

[中图分类号] TD67; TP242

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2022)06-0030-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.06.004

0 概述

我国矿冶过程存在多元素资源共生、原料品质波动大、冶炼工艺复杂等特点, 按照《国家智能制造标准体系建设指南》的总体要求, 需切实推进有色金属冶炼企业智能升级, 建成低耗、安全高效的有色金属智能冶炼工厂^[1]。在智能化工厂中, 机器人被誉为“制造业皇冠顶端的明珠”, 其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志^[2-3]。

当前机器人产业蓬勃发展, 根据中国电子学会发布的《中国机器人产业发展报告 2021》统计, 2021 年全球机器人市场规模已达到 335.8 亿美元, 2016—2021 年平均增长率为 11.5%^[4]。智能巡检机器人作为特种机器人领域的一个分支, 已经在变电站、城市管廊、矿井、机场巡逻等领域发挥着重要作用^[5-6]。矿冶过程包含井下的开采和矿物冶炼提纯过程, 井下作业场景复杂多变, 且危险因素高, 冶炼过程也多为高温、高压、高噪声、高浓度药剂提纯

场景, 存在较多危害职业健康的工作^[7]。在当前“智能化”的时代下, 机器人代替人工井下作业和冶炼危险作业是大势所趋, 智能巡检机器人将在矿冶巡检领域“扮演”更加重要的“角色”^[8]。除了巡检本身任务外, 矿冶现场智能巡检机器人还需要兼具安全预警和应急疏散的工作。

本文综合分析了智能巡检机器人的技术现状, 结合矿冶行业巡检机器人的应用开发实践, 分析了限制智能巡检机器人大规模应用中的主要技术问题, 自主研发了四足巡检机器人, 可适应多种地形条件, 并在安全预警和应急疏散中取得了较好的应用效果。

1 智能巡检机器人技术

智能巡检机器人是特种机器人的一种, 是在某种特定环境, 如高危、艰苦、人工作业有短板环境中进行智能化巡检的应用型机器人。智能巡检机器人的实现方式是采用一种基于可移动式的执行机构搭载多种传感器, 对特定场景实时进行温度测量、数据收集、缺陷管理、开关状态、设备状态监测等安全运维工作, 及时发现现场事故和问题, 便于运行人员及时进行维护^[9-10]。

1.1 智能巡检机器人系统组成

智能巡检机器人系统是集机电一体化技术、多传感融合技术、机器视觉技术、无线传输技术于一体的复杂系统, 按功能模块划分主要分为四个部分: 移

[收稿日期] 2022-09-22

[作者简介] 郭丽敏(1982—), 女, 山东威海人, 光学工程博士, 中级工程师, 主要从事安全运行智能检测机器人和设备运行的健康管理的研究工作。

[引用格式] 郭丽敏, 张维国, 古健, 等. 基于机器人巡检的矿冶领域四足机器人开发研究[J]. 有色设备, 2022, 36(6): 30-35.

动执行模块、智能感知模块、精准识别模块和巡检监

控模块,具体如图 1 所示。



图 1 智能巡检机器人系统组成

移动执行机构是机器人运动载体,用于实现对整个巡检场景下的移动覆盖,由运动执行机构和导航控制模块两个部分组成。导航控制模块通过雷达、视觉、超声波、惯导、GPS 等信号的采集,完成扫描建图、导航定位和安全避障规划,继而将控制参数下发至运动执行机构,实现巡检机器人整机安全有序运动。

智能感知模块根据工作场景中不同的巡检目标,搭载相应的传感器进行环境感知,将耳听、手摸、眼看、鼻闻操作变成精准的定量测量,同时传感器采集的信息通过无线通讯系统可实时发送到巡检监控模块,主要搭载的传感器及功能如表 1 所示。

表 1 机器人搭载的传感器及功能

搭载的传感器名称	实现功能
红外热像仪	测量厂区的温度数据
可见光云台	表计识别、缺陷识别
噪声传感器	噪声信息并进行声音图谱分析
气体传感器	温湿度、烟雾、可燃性气体、有毒气体等多种指定气体的泄露检测
超声波传感器	无损探伤
红外热像仪和气体传感器配合	火焰识别

精准识别模块将采集的传感器数据进行精准识别,如数字、指针图像识别,颜色识别,缺陷识别,声音识别,基于多维信息的设备健康状态识别等。

巡检监控模块主要为客户端的巡检可视化平台,可实现巡检任务的下发,实时显示巡检机器人的巡检路线和实时位置,上传实时采集的传感器数据,

并对设备状态进行实现监控。客户端电脑可以通过远程访问,从而实现巡检信息的远程监控。

1.2 智能巡检机器人主要分类及特点

智能巡检机器人根据执行机构的主要形式可分为地面移动式、飞行式及轨道式三大类,不同的动作执行机构决定了其特点和应用场景^[11],如图 2 所示。

地面移动巡检机器人主要分为轮式、履带式、足式三种。如图 2 所示为三种典型的地面移动巡检机器人。轮式机构移动速度快,适合在平坦的路面上行驶、平整的室内外巡检场景。履带式机构可以跨越一定高度的障碍物,但速度较慢,适合低速重载场合,如消防救援领域,可搭载较重的灭火设备。足式机器人适合多种地形,且具备很好的灵活性,是目前发展较快的机器人,但电池容量受限,在室内外的变电站场景中得到了广泛应用。

飞行式巡检机器人主要为多旋翼式无人机,通过搭载激光雷达和 RTK 模块进行辅助环境感知和导航定位,其特点为飞行速度快,可快速到达指定位置进行巡检,且具备机动性强的优势,但受飞行器本体重量及电池规格尺寸限制,其存在的问题为续航时间短、负载重量有限以及避障距离大、且易受风速影响等,应用场景多为开阔场地或露天区域快速巡检。

轨道式巡检机器人的感知系统和运动主体具有小型化、模块化、易安装的特点,具有极强的适应性,但轨道式巡检机器人需要沿固定的悬挂轨道移动,因此轨道的设计是关键因素,随室内外运行环境的不同,对轨道环境适应性和防护等级的要求有较大不同。主要应用于电力配电室、智能养殖、铁路巡检、隧道监控等运行空间单一且环境固定的多个领



图2 智能巡检机器人主要类别

域和场景中。

2 矿冶领域智能巡检机器人典型应用

矿冶领域因行业数字化、智能化、低碳化的刚性转型需求,智能巡检市场空间广阔。由于矿冶生产场景存在厂区结构复杂、设备多样,工艺阀门众多且危险系数高等特点,机器人巡检难度较大,在典型局部场景下进行了实施落地。

2.1 采空危险区域无人机三维扫描建模应用

在采用空场法或嗣后充填法开采的地下金属矿

山,广泛分布着形态各异且空间规模不等的采空区,极易引发大规模透水、坍塌、冒落等灾害,给矿山的安全生产带来极大挑战,因此采空区是矿山亟需治理的危险源之一^[12]。采空区三维激光扫描技术采用无人机搭载三维激光扫描仪对目标进行全方位扫描,操作人员无需进入危险区域即可完成扫描作业。图3为采用无人机三维激光扫描与遥感测量相结合的手段对采空区域探测的结果,由图可知,无人机三维激光扫描可以有效解决传统三维激光扫描的点云数据缺失难题,从而获得精确的采空区形态。

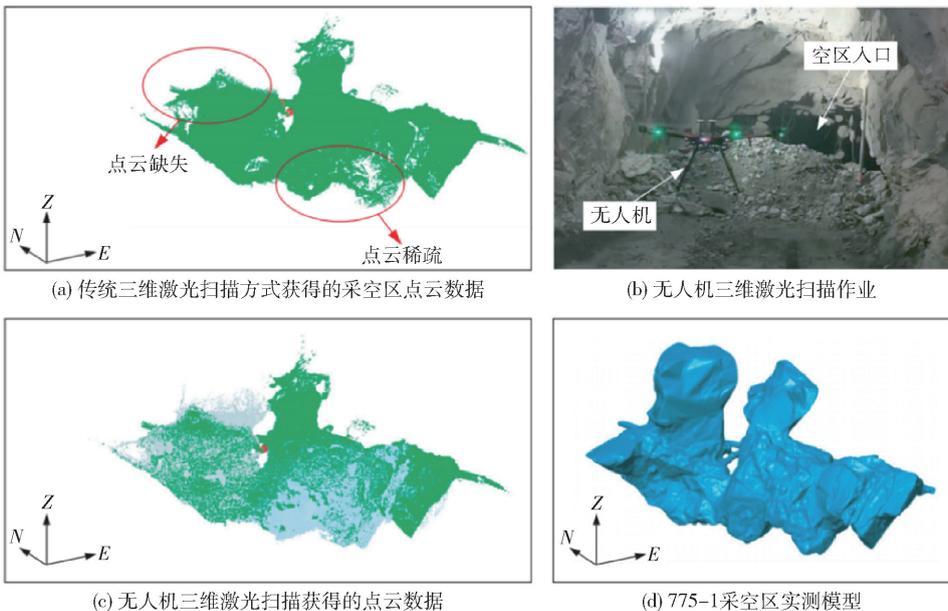


图3 无人机采空区域三维激光

2.2 高温环境下智能机器人巡检应用

如图4所示为高炉巡检机器人,用以代替人工进行高炉作业区炉前送风区域的设备巡检。该巡检机器人搭载了云台和多种传感器,模拟巡检员作业时的耳听、手摸、眼看、鼻闻,将传统无法复现记录和不能准确量化的人工感官信息以数字化的图像或数据进行归类存储,有效降低了因炉前送风区风口温度高、粉尘浓度高、噪音大造成的职业健康伤害,降低了岗位人员工作负荷,并取得了更高的巡检质量。



图4 高炉炉前巡检机器人

2.3 高噪声环境下的矿石开采及运输巡检机器人应用

在矿山领域,基于工业互联网操作系统的巡检机器人的应用,可实现井下开采工作面和运输系统的巡检。基于矿鸿操作系统的巡检机器人融合了多种智能化采矿装备和巡检功能^[13],通过近场设备感知与互联、分布式数据库以及统一数据协议等关键技术,实现设备交互方式的全面升级,实现矿山设备集合为“超级终端”,进而带来生产力的飞跃提升。如图5所示为恶劣环境下的矿石开采巡检机器人和皮带输送机巡检机器人。

2.4 高浓度药剂环境下的摇床巡检机器人应用

在选矿车间应用的摇床巡检机器人如图6所示,实现了对摇床精矿带、混合精矿带和次精矿带位置信息、颜色、宽度特征的实时检测和数字化解析,自动调节接矿板位置,实现“摇床设备无人值守模式”,减少现场操作人数。机器人采用了磁性胶条导航方式、图像颜色状态精准识别和自动定位接矿技术,使矿石精选比例大大提高,同时解放了大量人力,节约了生产成本。

3 自主研发的智能巡检机器人的应用实践

矿冶领域巡检环境相对复杂,智能巡检机器人主要应用于典型应用场景,且仍存在很多问题,如厂



(a) 矿石开采巡检机器人



(b) 皮带输送机巡检机器人

图5 工业互联网系统的巡检机器人

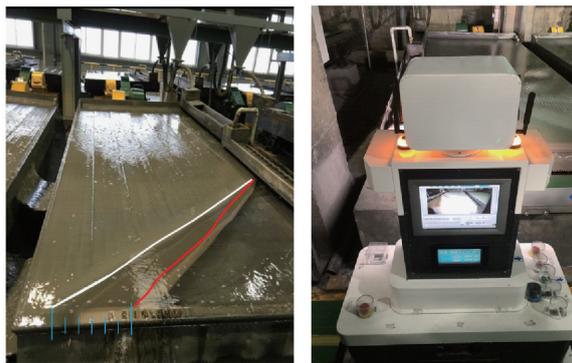


图6 摇床巡检机器人

房结构复杂加之设备、管道繁杂,造成的导航空间狭窄问题,多源异构数据采集及识别问题等。中国恩菲作为有色矿冶领域的排头兵,可以从源头设计开始推进智能巡检机器人的应用,并尝试更为广泛的应用,主要的突破方向如下:

(1)将巡检设计与工程设计同步进行,考虑适应巡检机器人工作机制的工程配置方案,如适应多层结构的巡检路面设计、表计安装高度和角度设计、巡检平台设置、充电站设置、导轨设置等;

(2)采用恩菲工业互联网平台实现非开放式生产车间中的设备定位及通讯网络的统一部署,从而实现设备本体传感器数据采集和巡检监控数据的融合分析监控;

(3)基于对运行环境及工艺环境的深入理解,进行参数识别装置及智能化诊断算法的深度协同,实现工业场景内设备状态的精准识别等。

考虑到矿冶领域高温、高噪声、高药剂和复杂多变的环境地形条件,并综合考虑各类巡检机器人的

特点,选择了四足机器人作为移动执行机构,开发适应跃层巡检的智能机器人,在巡检监控系统中实时显示记录设备正常运行和典型事故的现场数据,通过数据融合分析,查找异常数据并及时预警,根据预警等级启动应急疏散模块,引导人群按最佳避险路线进行疏散,并深入挖掘数值价值,逐步实现设备的运行诊断及生产工艺优化。

3.1 四足巡检机器人组成

四足巡检机器人采用四足机械狗作为移动执行机构,配备有激光雷达、IMU 和深度相机作为定位模块,采用 SLAM 导航控制算法,使机器人能够按既定巡检路线和关键巡检点位进行移动和巡检。该巡检机器人配置了声音传感器、气体传感器、可见光和红外摄像的双光云台、喊话器和探照灯等模块,采用工控机大脑作为机器人的传感器智能核心大脑,进行传感器数据的实时采集和上传。巡检机器人系统架构如图 7 所示。

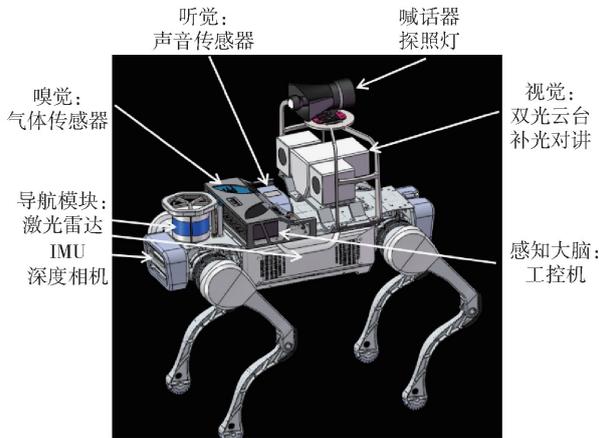


图 7 中国恩菲自主研发的智能巡检机器人

3.2 巡检机器人精准识别模块

巡检机器人精准识别模块,将传感器数据进行精准识别,如数字、指针图像识别,颜色识别,基于多维信息的设备健康状态识别等。本项目使用 Pytorch 和 Anaconda 部署开发环境,采用 uNet 的图像分割模型和 MobileNetV3 的骨架网络,实现了移动终端上数字图像的精准识别;采用 Yolo-V7 的图像分割模型和 Mobilevit-XXS 的骨架网络,实现了移动终端上指针图像的精准识别。处理结果如图 8 所示。

3.3 巡检机器人巡检监控模块

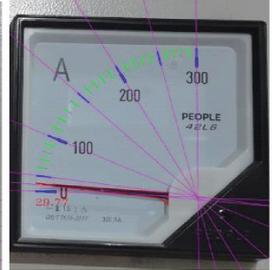
传感器采集的数据和精准识别后的数据最终通



(a) 数字识别



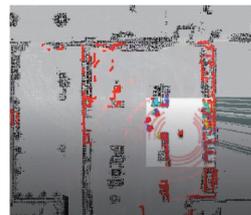
(b) 电压表识别



(c) 电流表识别

图 8 表计识别示意图

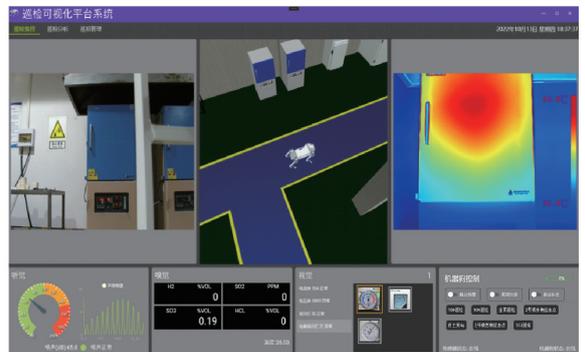
过客户端的巡检监控模块进行显示。巡检监控模块可实现巡检任务的下发,实时显示巡检机器人的巡检路线和实时位置,上传实时采集的传感器数据,并对设备状态进行预测。客户端电脑可以通过远程访问,实现巡检信息的远程监控。如图 9 所示,巡检监控页面上半部分为可见光摄像头显示结果、三维可视化图及机器人的实时位置和红外摄像头显示结果,并可以实现自主导航地图和巡检机器人的实际



(a) 自主导航地图



(b) 巡检机器人的实际位置



(c) 巡检监控模块

图 9 巡检监控模块示意图

位置的空间对应;下部分为听觉声音传感器的采集数据、嗅觉气体传感器的采集数据、图像处理后的表计识别结果,以及机械狗任务控制面板。

除现场巡检监控功能外,巡检监控模块机器狗控制中还包含启用预警、双向对讲、启动补光和应急疏散功能。预警功能可以打开警报灯,提醒人员快速疏散;双向对讲可以实现事故现场人员和外部救援人员的实时通话,获得最新的事故信息;应急疏散功能使机器人引导人群按最佳路线快速到达安全区域,减少人员伤亡。

4 结论

机器人巡检较人工巡检更加安全高效,且不受恶劣环境条件限制,是我国矿冶领域智慧化发展的必然趋势。四足巡检机器人因其良好的环境适应能力,已获得了良好的应用效果。随着机器人自身技术的发展完善,以及行业内用户、咨询设计单位、供应商等各参与方协同努力,实现其在矿冶领域的广泛应用将值得期待。

[参考文献]

- [1] 有色金属行业智能工厂(矿山)建设指南(试行)[N]. 中国有色金属报,2020-05-09(002).
- [2] 陈丹. 我国机器人产业迈向高质量发展阶段[J]. 电气时

代,2022(07):31-33.

- [3] 蔡鹤皋. 创造多彩的机器人世界——大发展时代之我见[J]. 前沿科学,2020,14(3):2.
- [4] 严正罡,甄军平. 巡检机器人应用综述及在机场应用前景展望[J]. 现代计算机,2022,28(2):50-55.
- [5] 文宗林. 智能巡检机器人应用现状及问题[J]. 低碳世界,2018(11):43-44.
- [6] 曾骥,韩巍,翁芳. 机房智能巡检机器人应用研究[J]. 科学技术创新,2020(4):77-78.
- [7] 皇甫淑云. 矿井救灾机器人障碍物识别与路径规划研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [8] 高东. 基于证据的全方位风险防控体系及其集成实现[D]. 北京:北京科技大学,2021.
- [9] 於华,罗红云. 大藤峡电厂高压电缆廊道智能巡检机器人应用的探讨与研究[J]. 小水电,2020(3):44-46,49.
- [10] 蔡焕青,邵瑰玮,胡霖,等. 变电站巡检机器人应用现状和主要性能指标分析[J]. 电测与仪表,2017,54(14):117-123.
- [11] 潘祥生,陈晓晶. 矿用智能巡检机器人关键技术研究[J]. 工矿自动化,2020,46(10):43-48.
- [12] 李杰林,杨承业,胡远,等. 无人机三维激光扫描技术在地下采空区探测中的应用研究[J]. 金属矿山,2020(12):168-172.
- [13] 李新华,贺海涛. “矿鸿”操作系统在神东矿区智能化建设中的探索[J]. 中国煤炭,2021,47(S1):7-13.

Development and Research on Quadruped Robots in the Field of Mining and Metallurgy Based on the Robot Inspection System

GUO Li-min, ZHANG Wei-guo, GU Jian, LI Jian-zhou, HAO Peng-yue, LIU Jun

Abstract: With the promotion of the Internet of Things, digital transformation and intelligent upgrading have been an inevitable trend for all industries. To realize unattended operation for a large number of infrastructure and equipment, robot inspection and maintenance become a crucial part. There are many features of mining and metallurgy, such as the complex structure, diverse equipment, numerous process valves and high risks, etc. Robot inspection only has achieved some application results in certain typical scenarios. This paper provides an overview of the features and application cases of several types of mainstream intelligent inspection robots.

Key words: inspection robot; field of mining and metallurgy; navigation control; environmental perception

