

智能检测技术在地铁车辆维修中的应用研究

许哲浩

杭州中车地铁装备维保有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]针对地铁车辆传统人工检修效率偏低、主观性较强、隐蔽缺陷漏检率相对较高,以及现有巡检设备地形适配性差、无法有限、难以实现立体化检测的行业难题,本文研制一款适配轨交复杂检修工况的四足机器人智能检测系统。该系统以四足机器人为移动载体,集成全景图像采集与轻量化三维重建技术,构建涵盖图像预处理、全景拼接、三维建模与量化缺陷识别的全流程检测体系。通过发挥依托四足机器人多步态越障、狭小空间灵活通行的优势,可在一定程度上实现地铁车辆构件全方位精细化检测。

[关键词]地铁车辆; 轨交检修; 四足机器人; 全景拍摄; 智能检测

DOI: 10.64635/ja.2026.1378

中图分类号: U279.3

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Detection Technology in Metro Vehicle Maintenance

Xu Zhehao

Hangzhou CRRC Metro Equipment Maintenance Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China

Abstract: In response to industry problems such as the low efficiency and strong subjectivity of traditional manual inspection for metro vehicles, the relatively high missed-detection rate of hidden defects, poor terrain adaptability of existing inspection equipment, limited operational capability, and difficulty in realizing three-dimensional detection, this paper develops an intelligent inspection system based on a quadruped robot and adapted to complex maintenance conditions in rail transit. With the quadruped robot as the mobile carrier, the system integrates panoramic image acquisition and lightweight three-dimensional reconstruction technology, and constructs a full-process inspection system covering image preprocessing, panoramic stitching, three-dimensional modeling, and quantitative defect identification. By leveraging the advantages of the quadruped robot in multi-gait obstacle crossing and flexible movement in narrow spaces, the system can, to a certain extent, realize all-round and refined inspection of metro vehicle components.

Keywords: metro vehicle; rail transit maintenance; quadruped robot; panoramic photography; intelligent detection

引言

城市轨道交通规模化运营背景下,地铁车辆长期高负荷运行,各类构件疲劳损伤频发,对检修作业的精细化与智能化水平提出更高要求。地铁检修场地存在空间狭窄、地面崎岖、光照不均、粉尘聚集等复杂工况,极大提升了精细化检修难度。当前地铁检修工作仍受传统人工模式制约,存在检测盲区多、判定标准不统一、作业风险高等问题,难以适配现代化维保需求。同时,固定式、轮式等常规智能巡检设备行走能力有限,越障性能薄弱,无法适配车底低矮崎岖作业场景,难以实现隐蔽区域全覆盖检测^[1]。为突破现有技术与设备瓶颈,本文依托四足机器人优异的场景适配能力,融合全景拍摄与三维重建技术研制一体化智能检测系统,详细阐述系统架构、硬件适配方案与核心

检测技术,旨在为地铁车辆智能化、精准化检修提供新的技术方案,助力轨交运维体系智能化升级。

1 地铁车辆维修检测现状与痛点分析

1.1 地铁车辆核心维保内容与现场工况特点

地铁车辆常态化维保是保障路网安全稳定运营的核心工作,主要针对车体外观、转向架、轮对制动组件、车底管线等关键部件开展状态检测与维护。地铁检修现场工况特殊,普遍存在作业空间狭小、构件排布密集、地面凹凸不平、光照不均、粉尘积聚等特点,给精细化检修作业带来极大阻碍。车辆核心构件长期承受行驶震动与路面冲击荷载,极易产生磨损、细微裂纹、线路松动等隐性缺陷,且此类故障多分布于车底、构件衔接等视觉受限区域,依靠常规目视排查难以有效识别,传统检修模式已无法适配

现阶段地铁高精度运维的发展需求。

1.2 传统人工检修模式存在的实际问题

传统人工检修模式存在诸多固有短板,严重制约维保工作提质增效。受车底狭小密闭空间限制,人工排查存在大量视野盲区,微小缺陷漏检率高,隐患长期堆积易诱发运营安全事故。同时,故障研判完全依托从业人员实操经验,缺乏统一标准化判定体系,主观偏差较大,不利于运维工作规范化开展。人工检修仅能粗略定位故障范围,无法获取构件磨损、结构形变等量化数据,维修方案缺乏精准数据支撑,检修精度难以保障。此外,人工检修效率低、人力成本高,难以适配车辆规模化集中检修场景,且复杂受限的作业环境大幅增加了一线人员的作业安全风险。

1.3 现有智能检测相关设备应用局限

为弥补人工检修短板,轨道交通行业逐步引入智能检测设备辅助运维,但现有装备场景适配性普遍不足。固定式检测设备无法移动,仅可检测车辆外部可视区域,车底隐蔽部位存在大量检测盲区。常规轮式巡检机器人越障能力薄弱,仅适用于平整地面,无法适配检修场地凹凸路面与轨道缝隙,且拍摄角度单一,难以实现全方位精细化检测。空中巡检设备易受气流、遮挡物干扰,成像稳定性差,无法满足长时间高精度检修需求。综上,现有智能装备难以适配轨交复杂作业场景,研制高适配、高灵活、全覆盖的四足智能巡检装备,是解决当前轨交检修痛点的关键所在。

2 地铁车辆智能检测系统总体方案设计

2.1 智能检测技术整体应用思路

基于前文梳理的人工检修短板与现有巡检设备的地形适配缺陷,本文针对性研制基于四足机器人的轨交智能检测系统,依托四足机器人多步态、强越障、姿态灵活的通行优势,适配地铁检修空间狭小、地面崎岖、点位分散的复杂工况^[2]。系统以四足机器人为移动载体,集成全景拍摄采集、环境感知、数据处理与三维重建功能,构建一体化、全流程的智能检修作业体系。整套方案聚焦轨交检修实操痛点,以解决传统设备盲区大、越障弱、精度低、适配性差等核心问题为目标,贴合地铁常态化维保流程设计机器人作业逻辑,使机器人行走节奏、检测姿态与现场运维节奏高度匹配,同时预留功能迭代空间,可根据后续运维需求持续优化,推动地铁检修装备向智能化、适配化、精准化方向升级。

2.2 机器人搭载式智能检测系统整体架构

为落地四足机器人智能检测研制方案,本文构建模块

化、协同化的闭环系统架构,整体分为四足移动载体、全景信息采集、数据处理与终端操控四大功能板块,各模块深度联动、协同作业,覆盖智能化巡检全流程。其中,自研四足机器人作为核心移动载体,依托多步态行走结构,可完成直行、转向、匍匐、越障等动作,灵活抵达车底各类狭小复杂区域,为检测作业提供稳定场地支撑。信息采集模块搭载全景高清拍摄与深度感知设备,可在机器人移动过程中同步完成全域图像与空间数据采集,全面覆盖车辆核心检修部位。采集的原始数据经数据处理模块完成降噪、筛选、优化与整合,剔除场地环境干扰,提炼构件真实运行状态信息。最终由终端模块可视化展示全景画面与三维检测成果,为运维人员工况研判、方案制定提供精准数据支撑,整体架构简洁高效、贴合轨交现场实操需求。

2.3 检测设备硬件选型与场景适配设计

本次四足机器人硬件研制与适配设计,全程围绕地铁低矮崎岖、多粉尘、光照不均的检修工况展开。机器人整体采用小型化、轻量化紧凑结构,降低机身高度,可顺利驶入车底受限区域;优化四足肢体结构与步态算法,支持匍匐行进、原地转向、姿态微调等多模式作业,具备良好的越障与凹凸路面通行能力,解决传统轮式设备地形适配差的问题。全景采集硬件选用高抗干扰高清镜头,适配复杂光照与粉尘环境,可稳定输出高清晰度、广视角的实景画面。设备搭载红外感应与深度感知组件,可实时识别障碍物、自主规划最优巡检路径,提升作业安全性与稳定性。结合地铁车辆构件分布特征优化全景模组安装角度,消除检测盲区,同时简化硬件装配结构,降低设备故障概率,有效提升自研四足机器人系统长期运行的可靠性与工况适配性。

3 地铁车辆智能检测核心关键技术

3.1 复杂环境下图像采集与预处理技术

在自研四足机器人稳定通行作业的基础上,全景图像采集与预处理是保障检测数据精准有效的首要核心环节,直接决定后续三维重建与故障识别精度。本文依托四足机器人灵活的多姿态行走能力,完成地铁车辆关键部位的全域图像采集,通过多角度、广视角全景拍摄,补齐传统设备与人工检修的视野短板,实现车体、转向架、制动组件及车底管线等区域的无死角采样。针对地铁检修场地粉尘聚集、光照不均、阴影遮挡等复杂干扰因素,机器人采集的原始图像易出现噪点过多、亮度失衡、细节模糊等问题,无法直接用于缺陷研判^[3]。对此,本文通过对比度调节、清晰度优化、细节增强等预处理手段,有效弱化环境干扰,

重点凸显构件细微裂纹、表层磨损、局部脱落等隐性故障特征,同时统一同区域图像参数标准,规整数据结构,为后续全景融合、三维模型重构与精细化缺陷分析筑牢基础。

3.2 车辆部件全景图像拼接融合技术

经过预处理的单帧图像画质清晰、细节完整,但单视角画面覆盖范围有限,难以完整呈现大型车辆构件的整体结构与全域工况。依托四足机器人多点位、多角度的全景采集优势,本文引入图像拼接融合技术,实现多视角局部图像的一体化整合。技术通过精准提取不同位置图像的共性特征点位,完成多组画面的匹配对齐与有序拼接,结合色差调和、边缘过渡优化、拼接断层修复等后置处理,有效解决拼接过程中常见的位置偏移、色彩割裂、画面错位等问题。最终生成的全景图像连贯完整、视觉统一,能够直观展现车辆大型构件的整体布局、表面状态与缺陷分布,充分发挥四足机器人灵活巡检的覆盖优势,大幅提升车辆外观检测的全面性与直观性。

3.3 轻量化设备部件三维重建技术

二维全景图像仅能展示构件平面状态,无法呈现构件空间结构、立体形变与缝隙偏差,难以满足精细化故障检测要求。基于该技术短板,本文依托四足机器人采集的高清全景图像与现场深度空间数据,构建车辆核心构件轻量化三维仿真模型,实现二维平面检测向立体精细化检测的升级。为适配现场快速检测需求,建模过程主动简化非核心附属结构,重点保留构件外形轮廓、关键连接结构与核心尺寸参数,在保障建模精度的前提下有效压缩数据体量,提升模型生成效率。同时严格参照实体构件尺寸比例校准模型参数,将优化后的实景图像贴合模型表面,提升模型还原度与可视化效果,可全方位展示构件立体形态与空间偏差,为后续精准化缺陷检测提供完备的三维数据支撑。

3.4 基于三维模型的故障缺陷检测技术

依托轻量化三维重建技术搭建的数字化模型,可开展标准化、量化式故障缺陷检测,彻底解决传统人工经验判定模糊、主观性强的问题。本文以全新标准构件三维模型为参照基准,将现场实测重构模型与标准模型进行全方位结构比对,通过立体化数据差值分析,精准识别构件形变、位置偏移、尺寸偏差等各类异常缺陷,快速锁定故障具体位置与影响范围。借助三维模型精准尺寸参数,可量化测算构件磨损幅度、缝隙宽度、结构形变程度,实现故障缺陷的数字化精准判定。结合轨道交通行业既定检修评判标准,可清晰区分常规自然损耗与威胁运营安全的高危故障,明确故障危害等级,帮助运维人员精准定位维修重点、科

学排布作业顺序,有效提升地铁车辆维保工作的专业性与规范性。

4 智能检测技术应用优势与优化实施策略

4.1 智能检测相较于传统检修的突出优势

相较于传统人工检修与常规智能设备,本文自研的四足机器人全景三维检测系统,在轨交复杂工况适配、检测精度与运维效率等方面具备显著优势。在场景适配层面,四足机器人依托多步态行走结构,突破轮式设备通行局限,可适应凹凸不平的检修地面、狭窄车底空间,具备良好的越障与姿态调整能力,能够抵达各类人工与传统设备无法触及的隐蔽区域,彻底消除检修盲区。在检测精度层面,系统依托全景拍摄与三维重建技术,摆脱人工目视判定的主观性,以标准化算法与量化数据为支撑,可精准识别细微隐性缺陷,实现故障数字化、客观化判定,大幅提升检修精度。在运维效率层面,四足机器人可自主规划路径、连续作业,无需人工全程介入,有效降低人力成本,缓解人员高强度作业压力,可快速完成车辆批量检修任务,适配规模化运维需求。整体而言,该自研系统针对性解决了轨交检修设备适配性差、检测不全面、精度不足等核心痛点,应用价值突出^[4]。

4.2 智能检测技术现场落地优化策略

尽管自研四足机器人检测系统优势显著,但受场地差异、人员操作、技术迭代等因素影响,现场落地仍存在优化空间,需结合轨交检修实际工况完善应用体系。运维单位需根据不同检修场地的空间布局、地面工况与光照条件,针对性调试机器人行走步态、巡检路径与全景拍摄角度,最大化适配复杂作业场景。同时需常态化开展人员专项培训,帮助运维人员熟练掌握机器人启停操控、全景数据调取、三维模型分析及故障研判等技能,充分发挥设备智能化检测效能。技术层面需持续优化图像拼接算法与三维重建模型,缩短数据处理时长,提升检测实时性,依托现场实测故障案例持续扩充识别数据库,提升细微缺陷识别精度。此外,需建立机器人常态化运维机制,定期检查肢体结构、拍摄模组与传感设备状态,及时维护老化部件,保障四足机器人系统长期稳定、高效投入轨交检修作业^[5]。

5 结论

本文结合轨交检修复杂工况,研制了集成全景拍摄与三维重建功能的四足机器人智能检测系统,搭建了涵盖图像采集、数据优化、三维重构与故障量化识别的智能化检修技术体系。依托四足机器人多步态、强越障、高适配的作业特性,可在一定程度上改善传统检修及常规巡检设备

盲区较大、主观研判偏差、场景适配性不足等问题,有助于实现地铁构件故障的立体化、数字化精准检测,对提升轨交维保规范性与作业效率具有积极作用。目前该系统在细微缺陷识别精度、长时间作业稳定性方面仍存在一定提升空间,后续可通过优化步态控制与三维建模算法持续完善设备性能,有望为地铁维保逐步向主动预判式智慧运维转型提供一定技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘涛,林瑞光.智能巡检机器人在轨道交通车辆检修中的研究与应用[J].智能制造,2025,(5)44-50.
- [2]王晓峻.基于深度学习的轨道交通车辆巡检系统设计与

应用[J].数字技术与应用,2025,43(8)84-86.

[3]王将.用于隧道管片结构检测的2D-3D多模态数据融合技术研究[J].铁道建筑技术,2025,(7)40-43+50.

[4]王天昱,胡玲军,谢浩男,等.城市轨道交通车辆检修策略发展探讨[J].甘肃科技,2022,38(22)40-43.

[5]刘佳,李瑞荣.城市轨道交通车辆均衡检修模式分析研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(3)111-115.

作者简介:许哲浩(1991.08—),毕业院校:合肥工业大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:杭州中车地铁装备维保有限公司,职务:工艺工程师,职称级别:中级。