基于无人机与增强现实 (AR) 的动车组转向架智能检测系统研究

卢俊安 盛弘嘉 孙彦祖 蒋政均 马发帅

吉林铁道职业技术学院, 中国·吉林 吉林 132299

摘要: 在现代高速发展的铁路运输体系中, 动车组作为核心运载工具, 其运行安全至关重要。转向架作为动车组的关键部件, 承受着车辆的重量并引导车辆沿着轨道行驶, 其性能状态直接关乎列车的运行稳定性、安全性以及舒适性。论文聚焦于动车组转向架检测难题, 构建了融合无人机、增强现实 (AR) 及智能检测技术的创新系统, 旨在深入探索基于无人机与 AR 的动车组转向架智能检测系统的构建与应用, 为保障动车组安全可靠运行提供创新解决方案。

关键词: 无人机; 增强现实 (AR); 动车组; 转向架; 智能检测系统

Research on the Intelligent Detection System of the EMU Bogie Based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Augmented Reality (AR)

Jun'an Lu Hongjia Sheng Yanzu sun Zhengjun Jiang Fashuai Ma

Jilin Railway Technology College, Jilin, Jilin, 132299, China

Abstract: In the modern high-speed railway transportation system, as the core transportation vehicle, the operation safety of the EMU (Electric Multiple Unit) is of great significance. The bogie, as a key component of the EMU, bears the weight of the vehicle and guides it to run along the track. Its performance status directly affects the running stability, safety and comfort of the train. This paper focuses on the detection problems of the EMU bogie and constructs an innovative system that integrates UAV, Augmented Reality (AR) and intelligent detection technologies. The aim is to deeply explore the construction and application of the intelligent detection system of the EMU bogie based on UAV and AR, so as to provide innovative solutions for ensuring the safe and reliable operation of the EMU.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Augmented Reality (AR); electric multiple unit (emu); bogie; intelligent detection system

0 前言

随着动车组运行速度的不断提升和运营里程的持续增加, 转向架面临着更为复杂严苛的工作环境, 如高速运行时的强振动、重载条件下的高应力以及恶劣气候影响等, 这使得转向架部件更容易出现裂纹、锈蚀、螺栓松动等缺陷, 对其检测工作提出了更高要求。

传统的动车组转向架检测方式主要依赖人工巡检以及部分固定式检测设备。人工巡检存在劳动强度大、检测效率低、主观性强等问题, 检测人员长时间工作易产生疲劳, 导致缺陷漏检风险增加。而固定式检测设备虽然能在一定程度上提高检测效率, 但检测范围有限, 难以对转向架的复杂结构进行全面细致的检测。因此, 研发一种高效、精准、智能的动车组转向架检测系统迫在眉睫^[1]。

无人机与增强现实 (AR) 技术的飞速发展为解决这一难题提供了新的契机。无人机具有灵活机动、可在复杂环境下作业的特点, 能够实现转向架全方位、多角度的数据采集。增强现实技术则可以将虚拟的检测信息与现实场景实时融合, 为检测人员提供直观、便捷的交互体验, 极大地提升

检测的准确性与效率。

1 相关技术基础

1.1 无人机技术概述

无人机, 即无人驾驶飞行器, 根据其飞行原理与构造, 主要分为固定翼无人机、多旋翼无人机和直升机无人机。固定翼无人机飞行速度快、航程远, 依靠机翼产生升力; 多旋翼无人机则凭借多个旋翼的转速调整实现升降、悬停与转向, 具有出色的灵活性和稳定性; 直升机无人机通过主旋翼和尾桨协同运作, 能够实现垂直起降与精准悬停。当下, 无人机技术迅猛发展, 在影视拍摄、农业植保、测绘勘探等诸多领域广泛应用^[2]。

针对动车组检测, 无人机须具备特定关键性能指标。续航能力是保证其完成复杂检测任务的基础, 充足的续航可确保无人机在铁路沿线长时间作业, 减少充电频次, 提高检测效率。飞行稳定性至关重要, 在铁路周边复杂的电磁环境与气流条件下, 稳定飞行才能保证采集数据的准确性。负载能力决定了无人机可搭载的检测设备种类与数量, 如多光谱相机、激光雷达等, 满足多维度数据采集需求。

1.2 增强现实 (AR) 技术原理与特点

AR 技术的核心原理是通过计算机技术将虚拟的信息叠加到真实世界中,利用摄像头、传感器等设备获取真实场景信息,经过处理后与虚拟信息融合并呈现给用户。其实现方式主要有基于光学投影、基于视频透视以及基于移动设备的实现。在工业检测领域,AR 技术优势显著。实时信息交互功能让检测人员在查看实际设备时,能即时获取设备的相关参数、维护记录以及缺陷提示等信息,快速做出判断。直观可视化特点将复杂的技术信息以直观的图形、文字等形式展示,如在动车组转向架检测中,可将潜在缺陷位置用醒目的颜色标注,维修步骤以动画形式动态演示,极大降低检测人员的认知难度,提高检测准确性^[3]。

2 系统总体设计

2.1 系统设计需求分析

2.1.1 功能需求

基于无人机与增强现实 (AR) 的动车组转向架智能检测系统需要满足以下核心功能需求:

高精度缺陷识别: 系统需能够准确识别转向架的关键缺陷类型,如裂纹、锈蚀、螺栓松动等,识别精度需达到 95% 以上,以满足铁路行业的高标准要求。

实时数据传输: 无人机采集的多模态数据(如图像、点云、振动信号)需通过低延迟网络传输至 AR 终端与智能分析平台,确保检测结果的实时性与可靠性。

AR 可视化交互: 通过 AR 设备(如 Hololens 或移动终端)实时标注缺陷位置,并提供维修指引,帮助检修人员快速定位问题并完成修复操作。

2.1.2 性能需求

为适应复杂的工业环境与高强度的检测任务,系统需满足以下性能需求:

轻量化: 无人机与 AR 终端须具备轻量化设计,便于携带与操作,同时降低能耗。

低延迟: 从数据采集到 AR 显示的端到端延迟需控制在 200ms 以内,以确保实时交互的流畅性。

抗干扰性: 系统需能够在复杂光照、电磁干扰及振动环境下稳定运行,确保检测结果的准确性与可靠性。

2.2 系统架构设计

本系统采用“端—边—云”协同架构,将 AR 交互模块与智能分析平台有机结合,实现数据采集、处理与交互的全流程智能化。

AR 交互模块: 依托于 Hololens 或移动终端,运用先进的计算机视觉与空间计算技术搭建 AR 交互界面。检测人员靠近转向架时,AR 设备摄像头利用特征点匹配算法,识别转向架独特轮廓与关键特征点,通过即时定位与地图构建 (SLAM) 技术,将虚拟检测信息与现实场景精确对准。检测期间,借助增强现实渲染技术,以高对比度色彩实时标注

缺陷位置;基于动画引擎,生动展示维修步骤^[4]。

智能分析平台: 采用云端分布式架构,运用大数据融合技术实现数据融合,利用深度神经网络模型完成缺陷分类评估。以 YOLOv7 目标检测算法为基础,结合高效的特征提取网络,快速精准识别图像中的缺陷目标;引入 Transformer 架构,凭借其自注意力机制,对缺陷特征进行深度挖掘与分类,依据缺陷特征量化评估严重程度。平台运用分布式存储技术存储数据,基于数据管理系统进行管理,并通过数据可视化技术,以直观图表展示,方便检测人员查询历史数据,掌握转向架长期运行状态。

“端—边—云”协同架构: 本系统开创性地提出“端—边—云”协同架构。“端”侧的无人机与 AR 交互终端,运用多传感器融合技术采集数据,通过人机交互技术实现用户交互;“边”侧的边缘计算设备,采用边缘计算卸载算法,对采集数据进行初步处理与筛选,减轻云端计算负载,利用本地缓存与快速处理机制,满足低延迟需求;“云”端的智能分析平台,运用分布式计算框架,进行复杂数据融合与深度分析。通过这种协同架构,基于负载均衡算法优化算力分配,提升系统实时性与整体性能,为动车组转向架智能检测提供高效、可靠的解决方案。

3 系统关键技术实现

3.1 无人机自主导航与路径规划

在动车组转向架智能检测系统里,无人机自主导航与路径规划技术起着极为关键的支撑作用。无人机作为灵活且高效的检测载体,其精准的自主导航能力确保了在复杂的动车组检修环境中能稳定飞行,抵达转向架的各个检测部位。

利用先进的传感器融合技术,无人机可实时感知自身位置、姿态以及周围环境信息。通过内置的全球卫星导航系统 (GNSS) 获取初步的位置信息,结合惯性测量单元 (IMU) 精确测量加速度和角速度,以实现对自身姿态的精准把控。同时,搭载的激光雷达、视觉摄像头等环境感知设备,能够快速构建周围环境的三维模型,为路径规划提供翔实的数据基础。路径规划算法依据获取的环境信息,按照检测需求规划出最优飞行路径。例如,在对转向架进行全面检测时,算法会综合考虑转向架的结构特点、关键检测部位的分布以及无人机飞行的安全限制等因素,规划出一条既能覆盖所有检测点,又能保证无人机安全飞行的高效路径。在检测过程中,若遇到临时障碍物或环境变化,无人机的自主导航系统能迅速做出反应,基于实时环境数据重新规划路径,确保检测工作的连续性和完整性。这一技术极大地提高了动车组转向架检测的效率与准确性,为保障动车组的安全运行提供了有力支持。

3.2 AR 驱动的缺陷可视化与交互

在基于无人机与 AR 的动车组转向架智能检测系统中,AR 驱动的缺陷可视化与交互是提升检测效率与精准度的关

键环节。基于 Unity3D 这一强大的游戏开发引擎进行 AR 界面开发,能够实现高度定制化与沉浸式的交互体验。通过对无人机采集的检测数据进行分析处理,在 Unity3D 环境中构建起与实际转向架对应的虚拟模型。一旦检测到缺陷,系统自动在虚拟模型上对缺陷热区进行醒目标注,采用鲜艳色彩或闪烁效果,让检测人员能快速定位问题区域。同时,针对维修需求,利用 Unity3D 的动画制作功能,将维修步骤以动态演示的形式呈现,从工具准备到具体操作流程,都能清晰展示,方便检测人员理解与执行。

然而,在实际应用中,视角偏移与光照干扰常影响 AR 呈现效果。为此,系统运用虚实融合校准技术来解决这些问题。通过先进的传感器数据融合算法,实时监测设备姿态与位置变化,动态调整虚拟模型的显示视角,确保与检测人员实际观察角度精准匹配,消除视角偏移。对于光照干扰,采用光照估计与补偿算法,分析环境光照强度与方向,对虚拟模型的光照效果进行实时调整,使其与现实环境光照相协调,保障缺陷标注与维修演示在不同光照条件下都清晰可见,提升 AR 交互的可靠性与实用性。

3.3 智能诊断算法设计

在动车组转向架智能检测系统中,智能诊断算法是实现精准缺陷判定的核心。基于深度学习构建转向架缺陷检测模型,针对裂纹、锈蚀、螺栓松动等常见问题,利用大量标注样本数据对模型进行训练。卷积神经网络(CNN)凭借其强大的特征提取能力,能够有效识别图像中细微的裂纹特征,通过对不同尺度、方向的卷积核组合运用,精准定位裂纹位置与走向。对于锈蚀检测,模型学习锈蚀区域独特的颜色、纹理特征,实现快速准确的判别。在螺栓松动检测方面,模型关注螺栓位置变化及周边图像特征差异,做出可靠判断。

为使模型能在资源受限的边缘计算设备上高效运行,采用轻量化模型部署策略。模型剪枝技术通过去除模型中冗余的连接与神经元,在不显著影响性能的前提下,大幅减少模型参数数量,降低计算复杂度。结合 TensorRT 加速技术,对模型进行优化编译,利用 GPU 并行计算能力,进一步提升模型推理速度。经过这些处理,模型能够适配边缘计算设备。

3.4 多模态数据融合与实时同步

在动车组转向架智能检测系统里,激光雷达点云可精确呈现转向架的三维结构,可见光图像则能提供丰富的表面

纹理细节。通过 ICP(迭代最近点)+特征匹配的配准算法,能将两者有机结合。ICP 算法基于点云的几何特征,迭代计算使点云间达到最佳对齐状态,初步实现粗配准。在此基础上,利用 SIFT 等特征匹配算法,提取点云与图像中的独特特征点,进一步优化配准精度,为后续检测分析提供全面且精准的数据基础。

为确保无人机采集的海量检测数据能够实时、稳定地传输至 AR 端,本研究创新性地设计了基于 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport,消息队列遥测传输)与 5G 融合的低时延数据传输协议。MQTT 作为一种轻量级的发布/订阅式消息传输协议,具备极低的网络开销与卓越的可靠性,尤其适用于在铁路沿线复杂多变、信号易受干扰的不稳定网络环境中传输数据。其基于 TCP/IP 协议栈构建,采用简洁的二进制消息格式,通过 QoS(Quality of Service,服务质量)机制保障消息传输的准确性与完整性。将 MQTT 协议与 5G 网络的超低时延、高带宽特性相结合,无人机采集的数据经 MQTT 协议封装后,能够在 5G 网络的高速通道中实现毫秒级传输,快速抵达 AR 端。

4 结语

本研究对基于无人机与增强现实(AR)的动车组转向架智能检测系统进行了简要分析,在关键技术上,运用 SLAM 算法、ICP 与特征匹配、模型轻量化等,攻克无人机自主导航、多模态数据融合及模型适配难题。实践证明,该系统显著提升检测效率与精度,降低人力成本与安全风险。未来,系统将深化与 5G 等技术融合,拓展应用范围,为铁路行业智能化发展持续赋能,在保障行车安全、推动技术创新方面发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 常宇佳.基于关键点的高铁动车组智能检测方法研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2024.
- [2] 王鹏,章阳,王涤非,等.动车组制动系统PHM人机界面设计方法研究[J].铁道机车车辆,2024,44(3):56-62.
- [3] 陈然诺.动车组异常图像智能检测系统研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [4] 李亮亮,李文正,孙晓涛.基于ARM与FPGA架构的动车组失稳检测技术研究[J].铁道车辆,2022,60(5):53-56+100.

作者简介:卢俊安(2004-),男,中国山西朔州人,从事动车组检修技术研究。