

基于无人机巡检的高速公路路面病害快速识别与养护决策

赵焕杰 胡世栋

宁波交投公路营运管理有限公司 浙江宁波 315000

摘要: 随着高速公路建设规模扩大,路面病害高效检测与科学养护成为保障道路安全的关键。针对传统检测效率低、人工依赖强等问题,研究基于无人机巡检的高速公路路面病害快速识别与养护决策支持技术。通过构建多源数据采集体系,运用深度学习算法实现裂缝、坑槽等病害的精准识别;建立包含病害评估、优先级划分及成本效益分析的养护决策模型,并完成软硬件集成系统开发。经测试验证,该技术显著提升病害识别准确率与养护决策科学性,有效降低人工成本与养护周期,为高速公路智能化养护提供可靠解决方案,推动养护管理从经验驱动向数据驱动转型。

关键词: 无人机巡检;路面病害识别;深度学习;养护决策模型;智能化养护

引言

高速公路作为国家交通网络的重要组成部分,其路面状况直接影响交通运输效率与行车安全。传统人工巡检方式存在效率低、成本高、检测精度不足及安全隐患大等问题,难以满足现代交通养护需求。无人机凭借灵活机动、视角多样、数据采集效率高等优势,为路面病害检测提供了新途径。通过搭载高清摄像、激光雷达等传感器,无人机可快速获取路面高分辨率图像与三维点云数据,结合深度学习、计算机视觉等技术,实现病害的精准识别与量化分析。同时,构建科学的养护决策支持模型,将病害检测结果与养护策略深度融合,能有效提升养护资源配置的合理性与经济性。研究基于无人机巡检的路面病害快速识别与养护决策支持技术,对推动高速公路养护智能化发展具有重要的理论与实践意义。

一、无人机巡检技术与数据采集

(一) 无人机巡检系统选型与配置

高速公路路面病害巡检需兼顾数据采集效率与精度,无人机系统选型需综合考量飞行性能、载荷适配性及环境适应性。在机型选择方面,多旋翼无人机具备垂直起降、低空悬停优势,适用于复杂地形与短距离精细巡检;

固定翼无人机续航时间长、覆盖范围广,更适合长里程高速公路的快速初检。载荷配置上,高分辨率光学相机可捕捉路面裂缝、坑槽等二维纹理信息,而激光雷达(LiDAR)设备则能获取高精度三维点云数据,实现病害深度与体积的量化分析。此外,为应对高速公路复杂环境,无人机需具备抗风、防尘、防水等防护性能,并搭载实时数据传输模块,确保巡检数据高效回传,为后续病害识别与养护决策提供可靠的数据基础^[1]。

(二) 高速公路巡检数据采集方法

科学的数据采集方法是保障路面病害识别准确性的前提。在巡检航线规划上,需结合高速公路线性特征,采用平行航线或网格扫描模式,确保路面全覆盖且数据无遗漏;同时通过设定合理的飞行高度与速度,在兼顾采集效率的情况下,保障图像分辨率满足病害识别需求。为实现数据的时空一致性,采集过程需同步记录无人机飞行轨迹、姿态信息及时间戳,并利用高精度定位系统(如RTK、PPK)进行坐标校准。针对不同病害类型的检测需求,可采用多时段、多角度的数据采集策略,例如在清晨或傍晚光线条件下采集阴影特征明显的图像,以增强裂缝、沉陷等病害的视觉对比度,为后续数据处理与特征提取提供高质量数据源。

(三) 多源数据预处理技术

原始采集的多源数据存在噪声干扰、几何畸变、数据冗余等问题,需通过预处理提升数据质量。在图像数据处理方面,采用中值滤波、高斯滤波等算法去除随机噪声,利用图像增强技术(如直方图均衡化、同态滤波)提升病害特征的清晰度;同时基于几何校正算法消

作者简介:

赵焕杰(1994.09-今),性别:男,民族:汉族,浙江余姚人,本科,助理工程师,研究方向:公路养护;

胡世栋(2001.10-今),性别:男,民族:汉族,浙江宁波人,本科,研究方向:公路养护。

除因无人机姿态变化导致的图像畸变。对于激光雷达点云数据,需通过离群点剔除、平滑滤波等操作优化点云密度,并利用点云分割算法提取路面点云,去除植被、护栏等冗余信息。此外,为实现多源数据的协同分析,需将图像与点云数据进行空间配准,通过特征匹配与坐标转换,构建统一坐标系下的融合数据集,为后续病害识别与定量分析奠定基础^[2]。

二、路面病害智能识别算法

(一) 病害特征提取与分类体系

高速公路路面病害类型多样,常见的裂缝、坑槽、车辙等病害形态差异显著,其特征提取是实现精准识别的基础。针对不同病害的几何形态、纹理分布和空间结构,需建立多维度特征提取框架。对于裂缝类病害,可利用图像灰度变化与边缘连续性特征,通过Canny算子、形态学处理等方法提取其走向与宽度信息;针对坑槽病害,则结合深度信息与轮廓特征,采用点云数据处理技术获取坑槽的体积与深度参数。同时,构建统一的病害分类体系,从形态学、成因学和危害程度三个维度对病害进行分级归类,为后续算法训练与识别提供标准化数据基础,确保不同场景下病害识别的一致性与准确性。

(二) 深度学习模型构建与优化

深度学习在图像识别领域展现出强大性能,为实现路面病害快速识别,需构建适配的神经网络模型。选用卷积神经网络(CNN)作为基础架构,通过优化网络层数、卷积核大小及池化策略,平衡模型识别精度与运算效率。针对无人机巡检图像背景复杂、病害目标尺度多变的特点,引入特征金字塔网络(FPN)与注意力机制,增强模型对小目标和模糊区域的检测能力。在训练过程中,采用迁移学习策略,利用公开数据集预训练模型参数,结合实际采集的高速公路病害数据进行微调,减少训练数据不足带来的过拟合风险。同时,通过超参数优化、数据增强等技术,进一步提升模型泛化能力与识别准确率。

(三) 识别算法精度验证方法

为确保病害识别算法的可靠性,需建立全面的精度验证体系。首先,构建包含不同路段、不同天气条件下的多场景测试数据集,涵盖各类路面病害样本,确保验证数据的代表性。采用混淆矩阵、精确率、召回率、F1值等多指标评估模型性能,从识别准确率、漏检率和误检率等维度进行量化分析。通过与人工标注结果对比,计算算法识别误差,评估其在实际应用中的有效性。此外,开展算法稳定性测试,在不同硬件平台和数据规模

下进行重复实验,分析模型性能波动情况,验证算法对数据量变化和计算环境差异的适应性,为算法在实际工程中的部署与应用提供科学依据^[3]。

三、养护决策支持模型构建

(一) 病害严重程度评估指标体系

高速公路路面病害严重程度直接影响养护决策的紧迫性与方案选择。构建病害严重程度评估指标体系,需综合考虑病害类型、尺寸、数量及空间分布特征。对于裂缝类病害,通过测量裂缝长度、宽度及密度,结合其走向与路面结构关系,划分轻微、中度、严重等级;针对坑槽病害,依据坑槽深度、面积及周边破损情况制定分级标准。此外,引入路面平整度、车辙深度等功能性指标,与结构性病害指标形成互补,从多角度量化路面技术状况。该评估体系通过制定标准化的数据采集流程与严谨的计算规则,将路面病害的类型、面积、深度等特征精准转化为可量化的评分指标。通过这种方式,为养护决策提供客观、科学的依据,有效避免了因人工主观判断导致的决策偏差,确保有限的养护资源能够优先投入到病害严重、风险等级高、亟需处理的路段,提升养护资源利用效率^[4]。

(二) 养护优先级划分模型

养护优先级划分是实现养护资源高效配置的核心。基于病害严重程度评估,融合交通流量、道路等级、社会经济价值等要素,构建多维度优先级划分模型。采用层次分析法或熵权法确定各因素权重,通过综合评价函数将路段养护需求量化为优先级指数。例如,交通流量大的主干道在同等病害程度下,优先级高于支线道路,以保障交通枢纽畅通;针对恶劣气候区域、病害发展快的路段,依据病害扩展速率提高优先级,提前养护。模型嵌入动态调整机制,可根据季节性变化及突发灾害实时更新优先级,确保养护资源精准投放,降低安全风险与经济损失,提升路网服务水平。

(三) 成本效益分析与方案推荐

科学的成本效益分析是制定最优养护方案的关键。针对不同类型与严重程度的路面病害,建立涵盖材料、人工、设备及交通延误等成本的量化模型,同时预估养护措施实施后的路面性能提升效果,如使用寿命延长、事故率降低等效益指标。通过成本效益比(BCR)计算,对比多种养护方案(如预防性养护、矫正性养护)的经济性,推荐投入产出比最优的方案。例如,对早期轻微病害采用微表处、灌缝等预防性养护措施,虽短期成本较低,但可显著延缓病害发展,长期效益显著;而对严

重破损路段，需综合评估铣刨重铺与局部修复的成本效益，选择兼顾技术可行性与经济性的方案。该分析过程为养护决策提供数据支撑，助力管理部门实现养护资金的合理分配与高效利用。

四、系统集成与应用验证

(一) 软硬件协同平台设计

软硬件协同平台作为技术落地的核心载体，整合无人机数据采集硬件、病害识别算法及养护决策系统。硬件层面，集成高性能无人机飞行控制系统、多光谱成像设备及边缘计算终端，确保巡检数据实时传输与初步处理；部署边缘服务器，实现数据的本地化存储与快速分析，减少云端传输压力。软件层面，开发适配多源数据的处理模块，包括图像增强、三维重建及病害特征提取工具；搭建可视化决策平台，通过GIS地图直观展示病害分布、严重程度及养护建议。系统采用微服务架构设计，支持各功能模块的灵活扩展与动态调用，实现无人机巡检、病害识别、养护决策全流程的无缝衔接，为高速公路养护人员提供一体化操作界面与智能决策支持^[5]。

(二) 多部门数据共享机制

多部门数据共享机制旨在打破信息壁垒，提升养护决策效率。构建以高速公路管理单位为核心，涵盖交通规划、路政执法、养护施工等部门的数据共享平台，制定统一的数据标准与接口规范，确保路面病害数据、交通流量数据、养护历史记录等信息的互通互联。通过建立数据权限管理体系，根据部门职责分配数据访问与操作权限，保障数据安全与隐私。引入区块链技术构建去中心化的数据存储架构，通过分布式账本与哈希加密机制，实现路面病害数据、养护记录等关键信息的不可篡改与全程追溯，显著增强数据可信度与安全性。同时，设计数据实时更新与智能协同分析功能，基于智能合约自动同步各部门数据变动，支持路政、养护、规划等多部门基于共享数据联合制定养护计划，有效避免重复作业与资源浪费，推动高速公路养护从单一部门管理向多部门协同治理的高效模式转变。

(三) 系统运行稳定性测试

系统运行稳定性测试是保障技术可靠应用的关键环节。采用模拟场景与实际路测相结合的方式，在不同气候条件（如雨天、雾天、强光）及复杂路况下，对无人机巡检系统的飞行稳定性、数据采集精度进行测试，验

证设备在极端环境下的适应性。针对病害识别算法与养护决策模型，通过大量历史数据与实时采集数据进行交叉验证，评估算法准确率、模型响应速度及决策方案的可行性。对软硬件协同平台开展全面压力测试，通过模拟极端高并发数据处理场景，如高峰时段多架无人机同时传输海量巡检数据，实时监测CPU、内存等系统资源占用率、数据处理延迟及吞吐量等核心指标，针对性优化算法架构与资源调度策略，提升系统性能。构建多层次应急响应机制，针对潜在风险制定预案，结合冗余备份，保障系统稳定运行。

结语

基于无人机巡检的高速公路路面病害快速识别与养护决策支持技术，通过整合无人机数据采集、深度学习算法及智能决策模型，实现了病害检测从人工到智能、养护决策从经验到数据的转变。研究成果有效提升了路面病害识别效率与精度，降低了养护成本，缩短了决策周期，为高速公路养护管理提供了科学、高效的技术方案。然而，技术应用仍存在部分局限性，如复杂环境下算法鲁棒性不足、多源数据融合深度有待加强等。未来，需进一步探索无人机巡检与卫星遥感、物联网等技术的协同应用，深化人工智能算法在病害预测与养护动态优化中的研究，推动高速公路养护向全周期、智能化方向迈进，助力交通基础设施管理的数字化转型与高质量发展。

参考文献

- [1] 苏建功. 面向道路巡检无人机的路面病害视觉检测方法研究[D]. 长安大学, 2023.
- [2] 赵池航, 李昊, 袁守国, 等. 一种基于无人机的公路路面病害的定位方法: CN201911120174.0[P]. CN110894704A[2025-07-03].
- [3] 冀宁. 基于无人机遥感图像的公路路面裂缝识别技术研究[J]. 工程机械与维修, 2024(6): 141-143.
- [4] 顾铮鸣, 金晓斌, 杨晓艳, et al. 基于无人机遥感影像监测土地整治项目道路沟渠利用情况[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23):85-93.
- [5] 贾根选. 高速公路路基路面病害检测技术的合理选择[J]. 2024.