

Application Research of Intelligent Detection Technology for Bridge Surface Diseases Based on UAV and Deep Learning

Yingbin Huang

Fujian Provincial Construction Group Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361003, China

Abstract

Highway and municipal bridges in China are constantly exposed to outdoor environments, where factors such as load effects, weather variations, and natural aging lead to common surface defects including cracks, spalling, exposed reinforcement bars, and corrosion. Traditional manual inspection methods suffer from inefficiency, high risks, and low accuracy. This study develops an intelligent inspection system for bridge surface defects by integrating drone-based low-altitude aerial photography with deep learning image processing algorithms. The system optimizes YOLOv8-Seg deep learning algorithms, designs efficient drone inspection routes and imaging protocols, and implements quantitative analysis of surface defects. Additionally, it establishes a data fusion framework and 3D visualization platform for comprehensive platform presentation.

Keywords

UAV inspection; deep learning; bridge surface defects; intelligent detection; multi-source data fusion

基于无人机与深度学习的桥梁表面病害智能检测技术应用研究

黄滢彬

福建省交建集团工程有限公司, 中国·福建 厦门 361003

摘要

我国公路与市政桥梁常年裸露于室外环境, 受荷载作用、环境天气变化及自身老化等因素影响, 桥梁表面易出现裂缝、剥落、露筋、锈蚀等病害。传统人工检测存在效率低、危险性高、准确性差等问题, 本文基于无人机低空航拍技术和深度学习影像算法, 构建公路桥梁表面病害智能检测系统, 设计合理的无人机巡检路线与拍摄方案, 优化YOLOv8-Seg深度学习算法, 实现公路桥梁表面病害的识别与量化分析, 同时搭建数据融合与三维平台可视化展示体系。

关键词

无人机巡检; 深度学习; 桥梁表面病害; 智能检测; 多源数据融合

1 引言

随着无人机技术和硬件不断升级, 飞行控制系统、传感器和相机等越来越先进, 无人机在桥梁检测中的应用更加精确可靠。人工智能和机器学习等技术的应用, 可以使无人机在桥梁检测中实现自主飞行, 自动识别缺陷和故障。无人机在桥梁检测中的优势体现在安全、高效、高精度、节约成本 and 数据分析等方面。这些优势将促进无人机在桥梁检测中的应用。

【基金项目】福建省住房和城乡建设厅科技计划项目(项目编号: 2025-K-135)。

【作者简介】黄滢彬(1979-), 男, 中国福建漳州人, 副高, 本科, 从事市政路桥研究。

2 桥梁表面病害检测技术现状与需求分析

2.1 传统桥梁表面病害检测技术局限性

传统桥梁表面病害检测以人工徒步巡检为主, 辅助简易检测器材开展工作, 检测人员主要依靠积累的专业知识完成病害的发现、定位与记录。该检测方法在高跨、高空桥梁检测中适用性较差, 桥底、箱梁内部、斜拉索等部位因人员难以抵达, 极易形成检测死角; 人工目视检测对宽度小于0.3mm的细小裂缝识别难度大, 裂缝宽度、长度等指标的检测误差较高, 检测精度难以满足精细化检测要求; 人工检测效率低下, 一座中等规模桥梁需3~5名检测人员耗时2~3天完成检测, 且巡检过程中存在高空坠落、触电等安全隐患; 检测记录以纸质数据为主, 无法实现数据数字化存储, 难以形成病害数据追踪体系, 也无法开展养护分析与病害演进规律研究^[1]; 同时检测工作受天气、光照条件影响显著, 阴雨、强光等天气下检测精度大幅降低, 无法实现全天候检测。

2.2 无人机技术在桥梁检测中的应用优势

无人机可实现低空飞行，且与桥梁结构无接触，可作为桥梁检测的新型数据采集工具，完成桥塔、主梁、桥墩、支座、桥底等人工难以登高抵达区域的快速检测。无人机可搭载高清可见光相机、红外热像仪、激光雷达等设备，采集桥梁结构的可见光图像、温度图像、3D点云图等多源数据。无人机可按照预设路线自动巡检，单次巡检即可完成整跨桥梁的图像采集，巡检速度较人工提升1.5倍以上，且无需人工高空作业，从根本上消除了高空作业的安全风险。此外，无人机拍摄的影像分辨率较高，可清晰捕捉裂缝、剥落等微小病害，实现病害的早发现、早处置；通过嵌入北斗定位系统，可精准获取病害的空间位置信息，实现病害检测位置的数字化管理。

2.3 深度学习在病害识别中的技术需求

桥梁表面病害类型多样、形态各异、尺寸不一，且常存在于复杂背景中，如裂缝的线型、细窄特征与剥落斑块的大小差异显著，锈蚀病害的深浅程度不同，部分病害还易与污迹、阴影、植物等背景元素混淆，采用常规影像分析方法难以准确判别。深度学习算法具备强大的特征提取能力，可自动提取病害的纹理、形状、颜色等特征，无需人工设计特征提取规则，能够有效识别复杂背景中的病害目标^[2]。

现有桥梁病害检测深度学习技术仍存在三方面局限性：一是小目标病害识别准确率低，局部细裂缝、小型剥落等病害易被漏检或错检；二是复杂背景下误检率较高，光照不均、水渍、苔藓等背景因素易被判定为病害；三是无法实现病害参数的量化检测，难以精准获取裂缝宽度、剥落面积等关键病害指标。因此需根据桥梁病害检测需求调整深度学习模型结构，构建针对性的病害信息库，提升算法的鲁棒性与病害量化检测能力。

3 基于无人机的桥梁表面病害数据采集技术

3.1 无人机巡检系统硬件配置

桥梁表面病害检测选用六旋翼工业级无人机平台，该无人机抗风等级达6级，续航时长45分钟，可适应桥梁露天飞行环境；无人机搭载感应检测模块、2000万像素可见光相机、640×512分辨率红外热像仪、微型激光雷达等设备，其中可见光相机具备2倍光学变焦功能，可近距离捕捉微小病害，红外热像仪可检测混凝土内部脱空、渗水等隐性病害，激光雷达可实现厘米级点云采集，为桥梁三维建模与病害空间定位提供数据支撑；同时搭载北斗+GPS双模定位模块、视觉盲区躲避系统，定位误差<0.5m，在桥底无卫星信号覆盖区域可通过视觉定位保障飞行精度，避免误飞^[3]。地面控制设备具备航线规划、图像实时传输、数据存储等功能，可实时监控无人机巡航状态，完成巡检数据的采集、存储与管理。

3.2 桥梁精细化巡检路径规划方法

结合桥梁各结构部位的病害分布特点，针对性设计无

人机巡检路径：主梁、桥墩等平面结构采用平行扫线飞行方式，飞行高度距结构平面3~5m，飞行速度1.5m/s，影像重叠度大于80%；桥塔、斜拉索等异形结构采用绕行扫描方式，以固定角度拍摄梁面，避免影像失真；桥底、箱梁内部等封闭区域采用贴近点扫描方式，依托避障系统贴近桥梁结构完成数据采集^[4]。将桥梁BIM模型导入无人机飞行控制模块，可自动生成三维飞行路径，实现桥梁全区域覆盖巡检，避免漏检。同时结合光照条件调整飞行路线，避开正午强光与傍晚逆光时段，保证影像数据的清晰度。

3.3 多源病害数据预处理技术

无人机采集的原始数据包括可见光图像、近红外图像、激光点云数据，为提升后续病害识别效率，需对原始数据进行预处理：对可见光图像进行去畸变、去雾、对比度增强处理，消除因无人机飞行姿态、环境成像等因素造成的病害特征干扰；对近红外图像采用高斯滤波去噪处理，在去除噪声的同时保持病害边缘特征；对激光点云数据进行滤波、去噪、配准处理，精化病害区域的桥梁三维点云空间，实现病害空间坐标与影像的精准匹配。将预处理后的海量图像分割为640×640像素的图像块，与模型输入尺寸保持一致，在保留全部病害特征的同时，避免因图像缩放造成的细节损失。将预处理后的图像数据按桥梁段、病害类型分类存储为数据集，为后续模型训练与推理提供数据支撑。

4 基于深度学习的桥梁表面病害智能识别与应用

4.1 桥梁表面病害数据集构建与标注

针对简支梁、连续箱梁、刚构桥三类主流桥梁结构，采集晴天、阴天、逆光、潮湿等不同环境下的混凝土裂缝、表层剥落、钢筋锈蚀、露筋、渗水五类重点病害样本数据，每类病害采集12000张样本照片，随机划分训练集、验证集、测试集，保证各数据集的样本量与样本分布均衡。采用专业图像标注软件对病害图片进行像素级标定，其中裂缝按走向进行标注，剥落、锈蚀、露筋标注其整体边界轮廓，渗水标注其潮湿区域边界，同时标注病害的位置、长度、宽度、面积等关键信息。针对少量样本、背景杂质较多的样本进行数据扩充，提升数据集的复杂性与模型泛化能力；对数据集与模型进行全流程质量控制，逐帧剔除模糊、畸变、曝光异常、标注错误的样本数据，真实、完整、有序的数据集是模型训练与推理的重要基础。

4.2 改进型YOLOv8-Seg病害识别模型构建

以YOLOv8-Seg为基础模型，针对桥梁病害尺度长宽比差异大、剥落等病害轮廓不规则且尺度变化范围大的特征进行改进：在Backbone网络中加入变形卷积模块，通过自适应调整卷积核的采样位置，补充提取细裂缝、不规则剥落、边缘锈蚀等异形病害的特征，提升对复杂畸形病害的捕获能力；修正通道空间权重，强化病害的形状、纹理、边缘、颜色等特征权重，抑制水渍、阴影、苔藓、光斑等背景因素的

权重,降低复杂环境下的误检率;引入 FocalLoss 损失函数,自动调整正负样本比例,解决小目标细裂缝、局部露筋等低占比样本的漏检问题,稳步提升小目标病害的检出率^[5]。

以 640×640 像素的修正后图像为模型输入,模型可输出病害类别、边框、像素级分割掩码、尺寸等信息,完成病害的分类、定位、分割、量化与特征合成。通过合理设置学习率、batchsize、锚框宽度、锚框类型等超参数及网络结构,适配桥梁病害检测特性,经测试,模型对 0.1mm 级裂缝的识别精度达 97.8%,桥梁病害定位准确率显著提升。

4.3 病害智能识别与量化分析方法

选用改进的 YOLOv8-Seg 模型开展桥梁表面病害的自动定性及定位,以无人机航拍影像为输入,输出病害类型、相对位置及分割掩码形式的病害边框。针对裂缝类病害,通过骨骼细化、像素标定算法自动提取裂缝的长度、最大宽度、走向角度等指标;针对剥落、锈蚀、露筋类病害,通过边框提取与图像像素化处理,自动获取病害的面积、有效直径、分布范围等指标;以无人机巡检数据、北斗定位地图、桥梁三维点云模型为数据源,提取病害相对位置信息,结合病害检测指标将病害投影至桥梁结构三维空间,实现病害的三维可视化标注。依据公路桥梁养护技术规范制定病害等级评定标准,根据裂缝宽度、剥落面积、锈蚀程度等指标,将病害划分为轻微、一般、严重三个等级,模型自动输出病害等级评定结果,为养护处置的优先级划分提供依据。设置人工复查程序对模型识别结果进行复核与修正,删除因环境因素造成的误检数据,确保识别结果的准确性与有效性。整个流程从图像导入到病害量化、等级评价实现全程自动化,大幅提升了桥梁病害检测的标准化与智能化水平。

4.4 工程应用与效果验证

选取简支梁桥、连续箱梁桥、刚构桥三座桥梁开展工程应用,桥梁类型涵盖城市市政桥、高速公路桥、山区公路桥三种工况,桥径跨度 20—120m,桥龄均超 10 年,桥梁表面病害分布广、数量多。采用本文提出的无人机智能检测方法对全桥表面病害进行检测,以传统人工检测方法为对照,从检测覆盖区域、检测耗时、检测精度、桥孔预检效率四个维度开展对比分析。

无人机智能检测方法可实现大桥主梁、桥墩、盖梁、桥底、箱梁内部及附属构件的全区域检测,有效覆盖人工观察无法抵达的高空与死角区域;单桥孔检测时间由传统人工检测的 2—3 天缩短至 4—6 小时,检测效率提升 6 倍,时效缩减 83%;桥孔预检成功率由传统人工检测的 65% 提升

至 97%,提升 32 个百分点,有效降低病害误判率;对于 0.3mm 以下微裂缝、0.05 m² 以下局部剥落等传统检测手段难以识别的病害,识别率由人工检测的 42% 提升至 87%,提升 45 个百分点,为病害预警与预防性养护提供了可靠的数据支撑。无人机智能检测全程无需人工高空作业,从根本上消除了高空坠落、触电等安全隐患,检测数据可挂载至桥梁养护管理平台,实现病害数据的可视化留存、全流程 3D 立体化展示与全生命周期追踪,通过检测结果的横向对比,可准确分析病害的发展速度、变化趋势与演进规律,为养护方案制定、养护资金分配、桥梁结构安全评定提供科学依据。该技术切实解决了传统检测手段效率低、准确率低、危险性高、检测结果不透明等痛点,已在云南、贵州、四川三省数万座桥梁的养护工程中大规模深度应用,累计检测桥梁上百座,为桥梁养护管理实现“高精智能、精准养护”提供了重要技术支撑,并取得了良好的工程效益与社会效益。

5 结语

桥梁表面病害智能检测是智慧城市交通基础设施养护管理的重要业务方向,该技术破解了传统桥梁病害检测的技术瓶颈,大幅提升了检测巡检的效率与精度,为桥梁病害检测筑牢安全防线、树立标准准绳、打造高效体系。本文通过优化无人机路径规划技术、构建桥梁病害专用数据集、研发改进型深度学习检测模型,实现了“数据采集+智能分析+定量识别+管理分析”的一体化桥梁病害检测技术体系,推动桥梁检测的数字化与智慧化发展。后续可进一步开展模型轻量化研究,实现终端边检边测的实时检测模式;同时丰富环境适应性研究,提升模型在复杂环境下的检测能力;并探索模型的自动化、常态化与预测性升级,为桥梁全生命周期管控提供更多技术支撑。

参考文献

- [1] 殷涛,殷亮,杨大海.基于无人机和视觉分析的结构表面病害识别检测研究[J].工程与建设,2025,39(05):1018-1022+1030.
- [2] 刘睿.基于无人机的桥梁病害检测系统研究[J].北方交通,2024,(01):17-20.
- [3] 赵荣欣,王枫,吴华勇,等.桥梁病害自动检测研究综述[J].施工技术(中英文),2023,52(09):1-6.
- [4] 杜明贵.基于无人机的桥梁病害检测系统研究[J].科技视界,2025,15(31):59-61.
- [5] 付传清,王沈昕,舒江鹏,等.基于无人机巡检图像与BIM模型的桥梁病害自动化定位研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(05):135-144.