 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i3.9483

Intelligent Application of UAV Aerial Photography in Bridge Detection Driven by Deep Learning

Yingbin Huang

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

Abstract

With the continuous increase in the number of highway bridges and culverts in China and their extended service life, these structures are prone to developing issues such as cracks, exposed reinforcement, and surface peeling due to environmental and load factors during operation. Traditional manual inspection methods face challenges including high-altitude hazards, low efficiency, high missed detection rates, and non-standardized data processing. In contrast, drone aerial photography offers significant advantages like non-contact operation, wide coverage, and high resolution. Deep learning for drone aerial imagery serves as the core functional module for intelligent image inspection. This study establishes a technical framework for drone image acquisition and deep learning-based damage detection, improves the fusion model of YOLOv8s-seg and U-Net, and achieves refined identification, classification, and quantitative assessment of bridge defects. By integrating this model with 3D imaging, the system enables precise 3D localization of damages, forming a comprehensive intelligent inspection solution for damage identification.

Keywords

UAV aerial photography; Deep learning; Bridge inspection; Damage identification; 3D modeling

深度学习驱动下无人机航拍影像在桥梁检测中的智能化应用

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

我国公路桥涵数量持续增加、桥梁服役年限较长，在服役过程中，受环境及荷载等因素影响，桥梁易出现裂缝、露筋、脱皮等病害问题。传统人工检测存在高处作业危险性大、检测效率低、漏检率高、数据处理不规范等问题，而无人机航拍具有非接触、覆盖广、分辨率高等显著优势，无人机航摄深度学习则是航摄图像智能检测的核心功能模块。本文构建无人机航摄图像采集与深度学习病害检测技术体系，改进YOLOv8s-seg与U-Net融合模型，实现对桥梁病害的精细化识别、分类与定量检测；并将该模型与三维影像模型融合，实现对病害的精确三维定位，形成病害智能识别全流程检测方案。

关键词

无人机航拍；深度学习；桥梁检测；病害识别；三维建模

1 引言

智能技术的发展已经进入具有深度学习、跨界融合、人机协同、群智开发及自主操控等特性的新阶段，智能技术的快速更迭为铁路行业的发展注入新活力。交通安全是交通基础设施建设的重要组成部分，桥梁结构的安全性将直接影响交通运行及行人通行安全。桥梁在运营过程中，因混凝土老化、钢筋锈蚀、汽车荷载作用等因素，易产生各类病害。传统检测方式中，检测人员借助登高设备，通过目视观察法对桥梁底面、主缆等部位进行检测，该人工主观检测方式的检测结果无法有效留存。而无人机检测结合深度学习的技术手段，可对桥梁全位置、全范围开展检测，充分利用桥梁的检测走行空间，助力桥梁体检工作，秉持安全为先的原则，推动桥梁检修向精细化、高效化、智慧化方向发展。

2 无人机航拍桥梁检测的技术基础与应用痛点

2.1 无人机航拍桥梁影像采集的技术特性

无人机摄影检测也被称为桥梁非接触式检测。搭载高清相机、激光雷达传感器、热成像传感器的工装大翼无人机，可对桥梁开展多视角全方位摄影测量，针对箱梁底面、桥墩顶面、主缆吊索等桥梁复杂部位，采用贴身摄影测量与倾斜摄影测量相结合的方式；针对远距离拍摄受限的区域，可调整拍摄距离完成影像采集，其 0.1mm 级的分辨率能够识别更小的早期裂缝病害，检测结果更直观可视。无人机配备的

【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，本科，副高，从事市政路桥研究。

北斗惯导定位系统精度可达厘米级，可有效规避 GPS 信号失灵、断线等问题，采集的影像具备位置性强、连续性好的特点，为后续深度学习提供优质的影像素材 [1]。相较于传统检测设备，无人机检测可实现无车化作业，避免对路网交通造成影响，单次检测的覆盖范围可达人工检测的 10 倍。

2.2 传统桥梁检测模式的核心局限

传统桥梁检测主要采用目视检测、回弹检测、超声波检测等方式，存在诸多难以克服的弊端。检测过程中搭设高空脚手架、使用桥检车，不仅耗时费力，还存在坠桥的安全隐患，针对大跨径悬索桥、斜拉桥的主缆、桥塔开展检修时，该问题尤为突出 [2]。人工检测的结果依赖检测人员的经验，易对细微裂缝、隐蔽露筋等病害产生漏检、误检；同时，检测结果缺乏统一的记录规范，未形成量化指标，无法明确病害的规模及发展趋势；且检测结果多以文字形式记录，难以开展多期检测结果的对比分析，无法精准把握病害的变化趋势，也无法在检测过程中同步掌握桥梁立体造型并锁定病害位置，进而导致养护施工难以实现精准对应检测，养护效率与养护水平均受到影响。

2.3 深度学习赋能桥梁检测的技术适配性

深度学习算法能够自主学习图像深度特征，适用于无人机航拍的场景需求。桥梁病害图像存在形态不规则、尺度参差不齐的特点，且检测现场的场景复杂，现有图像检测算法多依赖人工提取特征，难以实现复杂场景下的桥梁病害检测。卷积神经网络可针对裂缝、锈蚀、剥落等病害的纹理特征、边界特征进行自主学习，Transformer 网络能够学习全局空间的场景特征，有效提升小目标病害的识别精度。

深度学习与无人机检测相结合，可实现对各类病害的自动分类分析，再结合边缘检测技术，能够在无人机端完成病害快速粗检，大幅节省数据处理时间。深度学习与无人机航拍技术的融合，可实现从无人机航摄影像取证到病害检测分析的全程智能化，打破传统病害检测的技术瓶颈，创新桥梁检测的技术思路。

3 深度学习驱动的无人机桥梁检测技术体系构建

3.1 桥梁航拍影像数据集构建与预处理技术

丰富且高质量的数据集是训练高性能深度学习模型的基础。本次研究结合实际检测场景中的桥梁病害情况，构建以裂缝、露筋、混凝土剥落、钢筋锈蚀、支座偏移 5 类常见病害为核心的数据集，影像素材以能够全面代表各类检测场景的无人机遥感影像为主，涵盖山区混凝土梁桥、城区简支梁桥、大跨径斜拉桥等桥型，以及晴天、阴天、逆光、侧光等光照条件，干燥、潮湿、轻微积尘等表面状态。研究共标注样本 12000 余张，按照 7:2:1 的比例切分训练集、验证集、测试集，保障数据集的均衡性与典型性。

对低照度图像进行直方图均衡化处理，滤除桥梁阴影、水渍对图像对比度的影响，消除航拍过程中因大气气流振动产生的椒盐噪声伪影，保留病害细节纹理；同时标注病害区域，生成像素级分割掩码和目标框，实现缺陷部位、缺陷类别、缺陷边界的多方位、多角度精准定位标注 [3]。针对小样本病害数据集，采用旋转、翻转、亮度变换、随机剪裁等数据增强方式，提升数据集的丰富度与模型的泛化能力；建立数据集质检机制，采用算法初检结合人工剔除的方式，删除模糊、重叠、标注错误的影像，为后续模型训练的精度提供可靠的数据基础。

3.2 多任务融合的桥梁病害深度学习检测模型

针对桥梁检测的实际需求，本文设计融合 YOLOv8s-seg 与改进 U-Net 的桥梁病害深度学习模型，实现病害目标检测与语义分割双重任务。以 YOLOv8s 为模型的基础检测框架，拓展颈部特征融合结构，增强尺度特征信息的交互能力；引入坐标注意力机制，提升对微小裂缝、微小露筋等细粒度病害的识别能力；采用融入坐标注意力的损失函数（CEIoU），提升边框回归与分割边界框的精度，减少回归分割误差。针对线槽裂缝病害的精细化分割需求，对 U-Net 模型进行优化，引入残差连接防止深层网络的梯度消失问题，增强模型对细粒度线槽裂缝的连续分割能力；同时引入 IoU 损失函数，提升细粒度线槽边框提取的完整性与连续性。模型训练过程中，采用 Lion 优化器加速模型收敛，选择余弦退火函数调整模型学习率，并通过早停与权值衰减策略，避免模型过拟合。该融合模型对桥梁五类病害的平均识别精度可达 98.8%，裂缝分割的 IoU 值为 0.913，相较于原始 YOLOv8s 模型提升 26% 以上，基本满足工程实际的检测精度要求，能够将病害从桥梁表面的纹理、污渍等背景中有效分割出来。

3.3 病害量化与三维空间定位技术实现

在病害分割检测的基础上，通过像素尺寸换算实现病害量化分析，依据无人机航摄照片的像素比例，计算裂缝的长度、宽度，混凝土剥落的面积，钢筋锈蚀的范围等指标，并结合桥梁养护相关标准，自动判定病害的严重程度。采用无人机倾斜摄影测量模型，通过运动恢复结构算法对桥梁进行高精度三维模型重建，点云坐标精度可达毫米级，能够对桥梁的梁体、桥墩、支座、吊索等部位实现真实三维还原。通过特征点提取与投影反算技术，将二维照片中识别的所有病害映射至三维模型的工程坐标中，对各等级构件级病害进行精准定位，明确病害所在的梁段、墩台及具体坐标。对同一构件的多期检测结果进行对比分析，结合病害发展趋势，通过三维模型测算桥梁结构的沉降、位移等病害指标，为后续桥梁养护检修工作提供数据参考。该技术实现了病害的精准识别、量化分析、三维定位与溯源追踪，通过二维检测结果与三维模型的融合应用，提升了检测精度，为桥梁养护检

修、病害治理提供了科学依据。

4 智能化检测体系的工程应用与性能验证

4.1 典型桥梁智能化检测的全流程实施

本次研究以山区大跨径混凝土连续梁桥、城市小跨径简支梁桥为检测对象，以桥梁下箱梁底面、桥墩立面、支座节点、桥面铺装、伸缩缝为关键检测位置，进行无人机航线的自动规划与生成。无人机飞行高度设置在 5-15m 的合理范围内，航向重叠度＞ 80%，旁向重叠度＞ 70%，规避桥梁附属物对航摄的影响。无人机可自动记录桥梁全息影像数据集，通过高清相机、激光雷达完成全桥梁、全过程的扫描采集，采集的数据通过 5G 技术自动传输至云端平台进行转化处理。云端平台通过前端预处理模块对原始数据集进行数据增强、降噪、制式标准化等操作，剔除模糊、过曝、低像素的无效数据，以及桥梁附属物相关的无关数据。系统可根据检测结果自动生成规范性检测报告，对病害的位置、类别、尺寸、严重等级进行精准标记，并将病害信息与属性数据耦合至桥梁三维场景中，形成可视化、可交互的检测结果 [4]。整个检测过程无需人工干预，单座中型桥梁的一次完整检测周期仅为 7 天，相较于传统人工检测大幅缩短了检测时间，既提升了检测效率，又有效规避了高空作业的安全风险。

4.2 检测模型的性能指标与工程适应性验证

以多座桥梁的实际检测结果为依据，选取准确率、召回率、F1 值、平均准确率和推理时长为评价指标，对模型综合性能进行验证。结果表明，模型对裂缝、露筋等细小病害的召回率为 0.914，F1 值为 0.913；对混凝土剥落、钢筋锈蚀、支座错位等病害的平均准确率可达 97% 以上；对桥梁表面阴影、水渍、油渍、青苔等背景区域的错检率低于 1.2%。在不同光照条件下，模型对晴天、阴天、逆光拍摄图像的识别精度均保持稳定，仅在阴天弱光照、逆光拍摄场景下，识别精度的降幅低于 3%，具备良好的环境适应性。同时，采用通道剪枝、量化压缩的方式对病害识别模型进行轻量化处理，轻量化后模型参数量为原模型的 60%，部署在无人机机载边缘计算模块后，单张图像的推理时长小于 50ms，满足现场实时检测、快速处置的需求。与人工检测相比，智能化检测方法的人工成本降低 92%，病害量化精度控制在 0.2mm 左右，结构位置定位精度控制在 5cm 左右，满足《公路桥梁技术状况评定标准》的相应工程指标要求，可替代人工开展桥梁日常检测与病害专项检测工作。

4.3 智能化检测对桥梁养护决策的支撑作用

基于深度学习的无人机桥梁检测平台，能够为桥梁养护工作提供更完整、更具针对性的养护信息，推动桥梁养护模式从“修后养护”向“养修结合、精细化养护”转变。该平台可构建桥梁全寿命周期病害数据库，将多周期检测照片、检测数据、三维模型统一入库，通过纵向病害数据分析，掌握病害的发展速率与演化等级，提前预测桥梁裂缝扩展、钢筋有害腐蚀等问题，实现主动养护；并针对不同等级的病害提出精细化养护建议，对轻度病害区域制定周期性主动养护方案，对中度病害区域采取注浆、除锈、封缝等主动处置措施，对重度病害区域实施主动检查、结构加固等应急养护方案，实现养护资金的靶向使用 [5]。

平台可接入当地交管部门的桥梁养护管理系统，实现病害信息的实时共享与分级推送，形成养护工作的闭环管理；养护人员可在三维模型上快速定位病害位置、查看病害数据，进而开展现场精准维修，大幅提升养护工作效率。工程实践表明，该智能化检测体系可使桥梁维护费用节省 30% 以上，有效降低病害对桥梁结构的影响，延长桥梁使用寿命，为交通安全稳定运行提供坚实的技术保障。

5 结语

无人机航拍与深度学习的融合应用，重构了桥梁检测技术体系，打破了传统桥梁检测在便捷性、安全性、准确性方面的局限。本研究通过自制专属数据集、构建并优化多任务融合深度模型、实现病害数据化与三维定位，形成了涵盖图像智能采集、数据智能处理、病害智能检测的全流程技术方案，经工程验证成效显著，具备广泛的应用价值，能够为更多桥梁工程的检测工作提供技术支撑，为桥梁预防性养护、健康状况评估奠定数据基础，为交通基础设施建设与养护工作提供数智化服务保障。在后续研究中，需进一步优化轻量化、小样本学习模型，拓展多模态数据的应用范围，持续提升模型在复杂场景下的检测稳定性，使其更好地支撑桥梁全生命周期的安全保障工作。

参考文献

[1] 甘君,张崇斌,刘诗洋,等.基于无人机航拍的高铁长大桥梁施工场景小目标智能检测方法[J].中国铁路,2025,(08):15-29.

[2] 王桔.无人机航拍技术在高速公路病害检测中的应用研究[J].运输经理世界,2025,(23):104-106.

[3] 罗旭东,吴一全,陈金林.无人机航拍影像目标检测与语义分割的深度学习方法研究进展[J].航空学报,2024,45(06):241-270.

[4] 付振宇,郭宇鹏,郑晓林.无人机在公路桥梁养护检测中的应用[J].中国设备工程,2023,(20):168-170.

[5] 朱云飞.无人机影像在公路桥梁检测中的应用分析[J].建筑技术开发,2019,46(01):129-130.