

市政道路桥梁裂缝自动识别与评估方法

方 靖

(安徽省建设工程测试研究院有限责任公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 本研究以某市政斜拉桥工程为例, 通过无人机近距离拍摄来获取桥梁结构高清图像, 构建基于掩膜区域卷积神经网络的裂缝自动识别模型, 运用图像二值化、骨架化及法线投影等后处理技术实现裂缝宽度定量提取。实验结果显示, 裂缝识别的准确率与召回率均达到 92.5%, 大部分样本宽度测量的绝对误差小于 0.10 mm, 最大绝对误差为 0.132 mm 且相对误差在 9.8% 以内, 检测精度符合工程要求, 评估结论可为桥梁养护决策提供参考。

关键词 市政桥梁; 裂缝自动识别; 无人机检测; 深度学习; 安全评估

中图分类号: U445.7; TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.007

0 引言

城市道路桥梁是城市交通体系的关键组成部分, 随着运营服役年限持续增长, 混凝土裂缝病害愈发凸显, 直接削弱结构耐久性与承载能力。传统人工检测手段普遍存在结果主观性强、信息处理效率低、高空作业安全风险高等问题, 无法满足城市桥梁批量、高频次的日常维护工作要求。目前, 卷积神经网络在路桥裂缝识别应用方面已取得多项研究成果, 深度学习技术在病害判别准确度与处理速度上表现突出^[1-2]。基于此, 采用无人机拍摄图像并融合掩膜区域卷积神经网络, 构建市政桥梁裂缝的智能识别与评估系统, 对于提高检测效率、降低成本及确保桥梁安全运行具有重大意义。

1 工程概况

某市政斜拉桥为无背索斜塔结构, 主跨 206.0 m, 桥面总宽 33.2 m, 桥塔垂直高度 136.8 m, 加钢壳基座后整体高度超过 150.0 m。桥塔混凝土表面受温度变化、荷载循环及材料老化等多重因素影响, 裂缝病害显著, 涵盖横向、竖向、斜向及网状等多种类型。传统人工检测存在高空作业风险高、覆盖率低及结果主观性强等问题, 难以满足全面准确的病害普查需求, 采用无人机进行影像拍摄来获取数据, 运用深度学习算法开展智能识别与分析, 目的是自动检测并评估桥梁裂缝的状况, 对于准确掌握结构实际损伤程度、科学制定后续养护策略具有重大的工程应用价值。

2 桥梁裂缝自动识别技术的应用

2.1 无人机图像采集与控制

为解决市政斜拉桥桥塔高度大、人工难以检测的问题, 采用多旋翼无人机配备高清相机云台进行近距

离航拍, 维持无人机与桥塔立面间距大概 10.0 m, 确保图像清晰度与检测精度符合裂缝识别标准。在飞行过程中, 无人机实时采集并记录悬停点的三维空间坐标, 通过覆盖桥塔全部立面并保持 50% 的拍摄重叠率, 共采集高清影像 637 张。所采用的相机传感器分辨率为 2000 万像素, 镜头焦距为 35 mm, 拍摄过程中快门速度要保持在 1/500 s, 以有效抵消无人机悬停时产生的细微振动对画面造成的影响。基于相机针孔模型完成像素标定, 以确定每像素对应实际尺寸约 0.494 mm, 采用熵值与锐度双指标开展图像质量评估, 有效过滤模糊影像, 确保数据质量满足模型处理需求。

2.2 裂缝识别模型构建与训练

裂缝识别模型以掩膜区域卷积神经网络为核心算法框架, 该网络在区域生成网络基础上增添了掩膜分支, 能同时达成裂缝目标的定位、分类以及实例分割, 与传统图像处理技术相比具备更出色的特征提取能力与抗干扰性能^[3]。训练样本经过人工标注后, 借助旋转、翻转、亮度调节及噪声添加等数据增强技术扩展到 1 133 张以上, 模型训练运用迁移学习方法, 以预训练残差网络作为骨干网络的初始权重, 迭代次数设定成 40 000 次。网络总损失 L 定义为:

$$L=L_c+L_l+L_m \quad (1)$$

式(1)中, L_c 为分类损失; L_l 为边框回归损失; L_m 为掩膜损失, 损失曲线在迭代 20 000 次后收敛并稳定至 0.15 附近, 模型未出现过拟合, 参数设置合理有效。为全面评估模型的稳定性, 训练完成之后用 127 张独立测试图像进行推理验证, 测试结果与训练集精度数据高度一致, 表明模型具备出色的跨场景泛化能力。

作者简介: 方靖(1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 土木工程。

2.3 裂缝宽度提取与量化

完成裂缝识别与定位后,对掩膜区域内裂缝图像依次执行图像二值化、连通域去噪、骨架化提取及宽度计算等后处理流程。二值化采用最大类间方差法突出裂缝轮廓,连通域去噪剔除孤立噪点并连接断裂区域,骨架化通过形态学腐蚀提取裂缝中心轴线^[4]。裂缝宽度基于法线投影原理计算,在骨架切线方向作法线,寻找法线与裂缝边缘两个交点后结合像素标定结果换算为实际宽度,计算公式为:

$$W_c = P_{cw} \cdot L_{pp} = \frac{10 P_{cw} L_d}{L_f P_C} \quad (2)$$

式(2)中, W_c 为裂缝实际宽度; P_{cw} 为裂缝宽度方向的像素数量; L_d 为无人机至桥塔表面的拍摄距离; L_f 为相机焦距; P_C 为感光元件每厘米对应的像素数量,针对裂缝走向和图像坐标轴不平行的情况,实际计算时以骨架点处的切线向量为参考来自适应调整法线方向,提高了斜向及网状裂缝的检测精度,该方法能够实现裂缝宽度的非接触式精确测量,全过程自动完成可显著降低人工测量带来的主观误差影响。

2.4 识别结果输出与校验

裂缝识别完成后,对12处典型裂缝的无人机自动测量结果与裂缝宽度测试仪人工测量数据进行逐项对比,校验过程中,客观评估无人机自动检测方法的工程应用精度,具体的对比情况如表1所示。

表1 无人机识别与人工测量裂缝宽度对比表

编号	像素数	无人机测量宽度/mm	人工测量宽度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
C1	3.000	1.482	1.500	0.018	1.2
C2	3.000	1.482	1.350	0.132	9.8
C3	1.000	0.494	0.500	0.006	1.2
C4	1.414	0.699	0.750	0.051	6.8
C5	2.828	1.397	1.300	0.097	7.5
C6	1.414	0.699	0.650	0.049	7.5
C7	1.414	0.699	0.750	0.051	6.8
C8	1.000	0.494	0.450	0.044	8.9
C9	1.414	0.699	0.700	0.001	2.0
C10	2.000	0.988	0.950	0.033	3.5
C11	2.236	1.105	1.150	0.045	4.1
C12	2.000	0.988	0.900	0.088	9.8

(注:每像素对应物理尺寸标定值为0.494 mm。)

由表1可知,12条裂缝的无人机测量宽度与人工测量的结果基本保持一致,多数样本的绝对误差小于0.10 mm,最大绝对误差为0.132 mm(C2号裂缝),所有样本的相对误差都没有超过9.8%,表明该方法在裂缝宽度测量方面精度较高且工程适用性较强,其测得的数据能够作为后续病害等级划分与安全评价的有效依据。C2号裂缝误差较为显著,主要原因在于该区域混凝土局部出现剥落情况,致使图像纹理紊乱,造成二值化阈值分割过程中裂缝边界定位产生偏差,后续可通过采用自适应局部阈值分割算法进行优化处理。

3 桥梁裂缝检测评估分析

3.1 裂缝识别精度验证

以交并比作为判定依据,当模型预测掩膜与实际裂缝区域交并比超过0.5时判定为真阳性,分别对横向、竖向、斜向以及网状四类裂缝的识别准确率与召回率进行了计算,其中竖向裂缝的准确率与召回率分别达到91.5%与97.7%,斜向裂缝准确率是94.3%,网状裂缝准确率为94.1%,横向裂缝因受施工缝干扰,其准确率相对较低,为86.4%,所有裂缝类型的整体准确率与召回率均达到92.5%,各类裂缝的识别性能对比可查看图1。针对横向裂缝识别准确率不足的问题,建议在后续数据扩充环节着重增加施工缝与横向裂缝共存场景的标注样本,并且在损失函数中对该类别赋予更高权重,从而提升模型对横向裂缝的判别能力。

3.2 裂缝分布规律与病害分级

根据精度校验后的裂缝识别成果,对桥塔整体立面裂缝的空间分布规律与宽度规模做全面统计,竖向裂隙占比最高且密集分布在桥塔中上部区域,斜向裂隙多在截面变化位置出现,网状裂隙主要集中于长期受风雨侵蚀的迎风一侧,横向裂隙数量较少且多与施工缝位置重合,其分布特性与结构受力模式及环境劣化机理高度一致^[5]。在病害等级划分方面,参照现行公路桥梁技术状况评价规范,依据裂缝宽度实测值将损伤程度划分为三个等级,宽度小于0.2 mm定为轻微病害,宽度介于0.2 mm~0.5 mm之间定为中度病害,宽度超过0.5 mm定为严重病害。据此构建覆盖全塔面的裂缝病害分布图,为后续结构安全状况综合评估提供分区化的量化参考依据。

3.3 结构安全状态综合评估

依据裂缝分布统计数据并参照现行桥梁技术状况评价规范,对桥塔各部位裂缝按宽度分级做了病害程度划分,评估过程中同步记录各级裂缝空间坐标,方便与桥塔结构分区图叠加对比,直观显示病害集中区

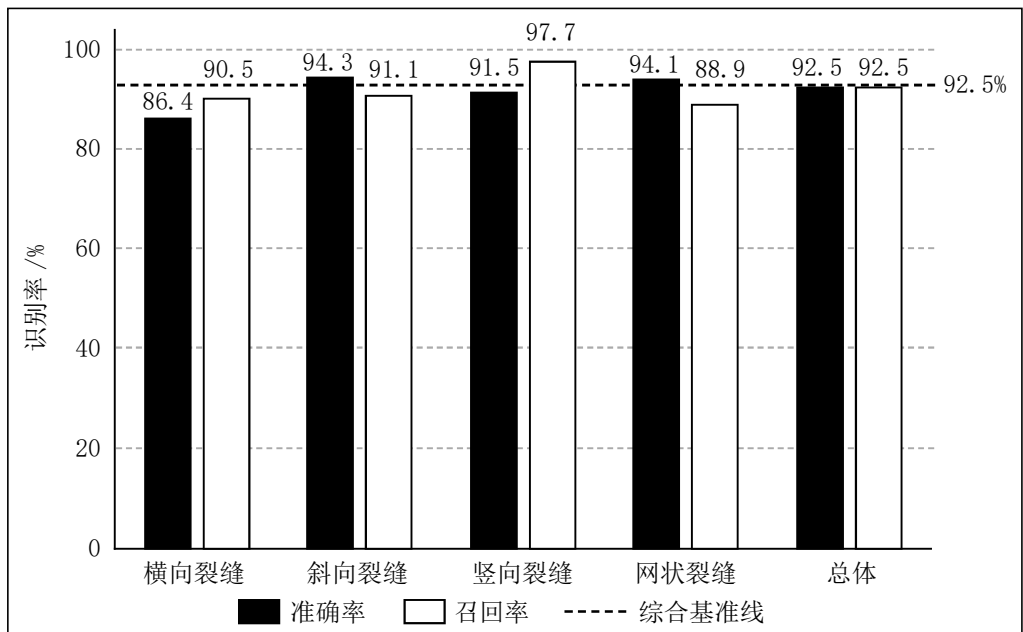


图 1 四类裂缝识别准确率与召回率对比

域,为制定针对性养护方案提供精确位置参考,汇总结果见表 2。

由表 2 可知,桥塔裂缝共 173 条,轻微病害占比 56.6%,中度病害占比 32.9%,严重病害占比 10.4%,中度以上病害合计超过 43%,大多集中在桥塔中上部的

迎风面。综合评估表明,该桥塔结构整体处于可控服役状态,尚未发现会影响结构整体承载能力的贯穿性裂缝,但建议优先对严重病害区域开展裂缝封闭修补,对中度损伤区域制定周期性复查方案,确保市政桥梁长期使用安全。

表 2 裂缝病害等级划分与分布统计

病害等级	裂缝宽度范围/mm	病害描述	裂缝数量/条	占比/%
轻微病害	< 0.2	表面微裂,不影响结构承载	98	56.6
中度病害	0.2 ~ 0.5	裂缝明显,耐久性存在隐患	57	32.9
严重病害	> 0.5	裂缝宽张,承载能力受损风险较高	18	10.4
合计	—	—	173	100.0

4 结束语

本研究以某市政斜拉桥工程为例,将无人机图像采集、掩膜区域卷积神经网络与数字图像后处理技术有机融合,形成覆盖采集、识别、量化、评估全流程的技术体系,极大地弥补了人工检测存在的固有缺陷,同时具备显著的应用价值与创新特点。四种裂缝类型的识别准确率与召回率都达到了 92.5%,宽度测量偏差符合工程规范的相关要求,裂缝分布特征与病害等级划分能够为结构安全状况的客观评价提供量化支撑。未来可进一步研究三维点云模型与裂缝信息的空间关联方法,推动市政桥梁检测朝着智能化、可视化的方向不断迈进。

参考文献:

- [1] 张徐杏.基于卷积神经网络的路桥设施缺陷检测研究[J].科技创新与应用,2022,12(17):76-79.
- [2] 洪卫星,吴美,陈贵海,等.基于机器视觉的路桥裂缝病害自动检测技术[J].交通运输研究,2021,07(04):114-122.
- [3] 李文举,何茂贤,张耀星,等.基于卷积神经网络和投票机制的轨道板裂缝检测[J].应用科学学报,2021,39(04):627-640.
- [4] 应俊杰,夏峰,卢国庆,等.基于深度学习的桥梁裂缝识别方法研究[J].水利规划与设计,2021(01):75-80.
- [5] 王超,贾贺,张社荣,等.基于图像的混凝土表面裂缝量化高效识别方法[J].水力发电学报,2021,40(03):134-144.