

机器视觉+AI算法的桥梁混凝土表观裂缝智能检测施工技术

杨锦鹏

文山州路桥有限责任公司, 中国·云南 文山州 663000

摘要: 在桥梁工程施工及后期运维阶段, 混凝土墩柱、箱梁、盖梁等构件极易受温度应力、荷载作用、干湿交替影响产生表观裂缝。传统人工巡检依靠脚手架、高空作业车开展裂缝排查, 存在作业风险大、检测效率低、细小裂缝漏检率高、测量结果主观性强等缺陷, 已经难以满足现代化桥梁大规模、常态化检测需求。将机器视觉成像技术与深度学习 AI 算法相结合, 搭建一套混凝土表观裂缝智能检测施工体系, 利用高清成像设备采集混凝土表面图像, 依托 YOLO-v8、U-Net 神经网络完成裂缝识别、轮廓分割、裂缝长度宽度量化计算, 在施工期质量验收、运营期病害巡检中实现非接触式、自动化检测。本文从技术研究背景、技术原理、整体施工工艺流程、AI 算法模型优化、现场施工应用要点、质量控制、工程效益、现存问题与优化方向展开论述, 为桥梁混凝土裂缝智能化检测提供施工技术参考。

关键词: 桥梁工程; 混凝土表观裂缝; 机器视觉; AI 深度学习; 智能检测; 施工技术

Intelligent detection construction technology for visible cracks in bridge concrete using machine vision and AI algorithms

Yang Jinpeng

Wenshan Prefecture Road & Bridge Co., Ltd., China Yunnan Wenshan Prefecture 663000

Abstract: During the construction and later maintenance phases of bridge engineering, concrete components like piers, box girders, and cap beams are very prone to visible cracks caused by temperature stress, load effects, and wet-dry cycles. Traditional manual inspections rely on scaffolding or aerial work platforms to check for cracks, which comes with high operational risks, low detection efficiency, a high chance of missing tiny cracks, and subjective measurement results, making it hard to meet the needs of large-scale, routine modern bridge inspections. By combining machine vision imaging technology with deep learning AI algorithms, a smart detection system for visible concrete cracks can be set up. High-definition imaging equipment collects surface images of the concrete, and YOLOv8 and UNet neural networks are used for crack identification, contour segmentation, and quantification of crack length and width. This enables non-contact, automated inspections during construction quality acceptance and operational crack monitoring. This article discusses the technical research background, principles, overall construction workflow, AI model optimization, key points of on-site implementation, quality control, project benefits, as well as existing problems and optimization directions, providing a reference for intelligent concrete crack detection in bridges.

Keywords: Bridge engineering; Visible concrete cracks; Machine vision; AI deep learning; Intelligent detection; Construction technology

0 引言

随着我国交通路网不断完善, 大量钢筋混凝土桥梁投入建设与长期服役。混凝土桥梁在浇筑施工阶段, 受振捣不均匀、养护不到位、模板约束应力、水化热温差影响, 极易产生早期表面收缩裂缝; 投入运营后, 车辆动荷载、环境温湿度变化、雨水侵蚀、冻融循环进一步加剧裂缝发展。微小裂缝如果不能及时排查处理, 水汽、氯离子顺着裂缝侵入钢筋表层, 会引发钢筋锈蚀、混凝土剥落, 造成

桥梁耐久性下降, 严重时威胁整体结构安全。

传统桥梁混凝土表观裂缝检测手段主要分为人工目视排查、裂缝宽度尺测量、全站仪定点监测。近些年机器视觉、人工智能深度学习技术快速发展, 借助无人机、高清工业相机完成图像采集, 再通过优化后的 AI 算法自动识别裂缝位置、提取裂缝轮廓、测算裂缝几何参数, 把传统人工检测转变为自动化智能检测模式, 可用于桥梁现浇施工阶段质量验收、竣工验收、后期定期运维检测, 弥补传统

检测方式短板,已经在高速公路桥梁、市政桥梁项目中逐步推广应用。基于此,本文研究机器视觉结合 AI 算法的裂缝智能检测整套施工工艺,规范现场检测流程,优化算法模型,提升检测精度,为同类工程提供施工依据。

1 机器视觉-AI 裂缝智能检测技术基本原理

机器视觉-AI 智能检测系统整体分为两大模块:机器视觉图像采集模块、AI 深度学习算法处理模块,整套技术逻辑为图像采集—图像预处理—AI 模型识别分割—裂缝参数计算—病害报告输出。

1.1 机器视觉成像原理

机器视觉以高清工业相机、补光设备、无人机云台、稳定支架作为硬件载体,对桥梁箱梁侧面、桥墩、盖梁、承台混凝土表面进行图像拍摄。成像过程中依靠光学镜头采集混凝土表面纹理,将实景画面转化为数字化像素图像。由于施工现场存在光照不均、阴影、水渍、混凝土麻面、污渍、杂草干扰,会对后期裂缝识别造成干扰,因此机器视觉硬件配套可加装可调 LED 补光灯、偏振镜头,削弱强光反光、阴影噪声,保证拍摄图像清晰度统一,为 AI 算法识别提供高质量原始图像素材。按照作业形式分为固定式机器视觉检测、无人机移动视觉检测;固定式相机用于重点墩柱长期定点监测,无人机视觉用于全桥大范围快速巡检。

1.2 AI 深度学习算法原理

AI 算法以卷积神经网络 CNN 为基础,主要采用 YOLO-v8 目标检测算法与 U-Net 语义分割算法组合使用。YOLO-v8 算法负责快速定位整张图片内裂缝区域,区分水渍、划痕、麻面等伪裂缝,剔除干扰项;U-Net 网络实现像素级分割,勾勒出裂缝完整轮廓,提取裂缝边缘坐标;再通过像素实际尺寸标定换算,自动计算裂缝实际长度、最大宽度、平均宽度、走向角度等关键指标。

算法前期需要搭建桥梁裂缝专用数据集,收集上千张不同光照、不同裂缝宽度、不同背景的混凝土实拍图像,人工标注裂缝区域,对 YOLO-v8、U-Net 模型进行迁移学习训练,引入注意力机制优化特征提取能力,提升对 0.1-0.3mm 细微裂缝的识别能力,降低误检率。训练完成后的轻量化模型可以部署在平板、嵌入式终端设备,在施工现场实时完成运算分析,不需要将大量图像传回后台服务器,实现现场即时检测、即时出结果。

1.3 像素标定换算原理

机器视觉拍摄的图片只存在像素单位,要换算成现实物理尺寸,必须进行标定校正。检测前使用标准标定板放

置在混凝土待测平面,建立像素距离与实际毫米尺寸的换算关系;无人机检测时结合云台高度、镜头焦距完成尺度换算,最终 AI 算法可以自动输出裂缝实际宽度、长度,完成量化检测。

2 机器视觉+AI 算法的裂缝智能检测整体施工艺流程

整套施工流程依次为:前期准备工作→机器视觉设备布设与标定→混凝土表面图像采集→图像预处理→AI 算法智能识别与裂缝分割→裂缝几何参数核算→病害信息整理归档→对比分析与维修建议输出。

2.1 检测前期准备工作

(1) 资料收集:收集桥梁施工图纸、混凝土浇筑记录、前期病害台账,确定本次检测范围,明确桥墩、箱梁、翼板、承台等检测构件,划分检测分区;确定检测目的:施工期混凝土表面质量验收或是运维阶段病害排查。(2) 硬件设备检查:调试无人机、工业高清相机、可移动补光灯、三脚架、标定板、平板终端,检查电池续航;提前将训练完成的轻量化 AI 模型导入平板终端,保证现场可以离线运算。(3) 现场环境勘查:记录检测时段光照条件,避开正午强光、大雨、大雾天气;清理检测面表层浮尘、杂草,减少杂物对成像的干扰。

2.2 机器视觉标定作业

正式采集图像前开展尺度标定。将标准棋盘格标定板紧贴混凝土待测表面,保证标定板平面和构件平面平行,相机镜头垂直对准标定板进行拍摄。平板软件读取标定板像素信息,生成像素-毫米换算系数。无人机航拍检测时,通过激光测距仪获取镜头到混凝土表面的垂直距离,结合镜头焦距完成尺度标定,消除拍摄距离带来的尺寸误差。每更换一个拍摄高度、更换一个检测面,都要重新标定,保证后续裂缝尺寸测量精准。

2.3 混凝土表面图像采集施工

按照预先划分的分区逐段采集图像。固定式工业相机检测墩柱时,利用三脚架垂直升降逐行拍摄;大面积箱梁腹板采用搭载云台的无人机沿纵向匀速移动拍摄,云台保持垂直朝向混凝土墙面,相邻两张照片预留 15%-20% 重叠区域,防止漏拍。遇到箱梁内侧、支座背面等光线不足区域,开启可调补光灯,消除阴影,保证图像纹理清晰,重点对施工后浇带、模板接缝、承台底部、墩柱变截面等裂缝高发位置加密拍摄,做到全覆盖无死角采集。

2.4 图像预处理环节

原始拍摄图像存在噪声、明暗不均、反光斑点,直接

输入 AI 模型会增大误检概率。在终端设备上对图像进行预处理:灰度化处理、高斯滤波降噪、对比度增强、边缘锐化,弱化水渍、污渍等背景噪声,强化裂缝纹理特征,提升后续 AI 算法识别准确率。

2.5 AI 算法识别、分割与参数计算

将预处理之后的图像导入 YOLO-v8+U-Net 组合 AI 模型。第一步 YOLO-v8 快速识别定位裂缝区域,过滤划痕、污渍、麻面造成的伪裂缝;第二步 U-Net 实现像素级分割,勾勒裂缝完整边缘轮廓;第三步依托前期标定的换算系数,算法自动计算裂缝长度、最大宽度、平均宽度、裂缝走向,同步记录裂缝所在构件位置、拍摄时间。对于规范中限值 0.2mm 的临界裂缝,单独标记重点等级。

2.6 生成检测报告、建立数字化档案

AI 系统自动汇总所有裂缝数据,按照构件位置、裂缝宽度等级进行分类,生成可视化检测报告,标注病害位置照片、裂缝尺寸、病害等级;将全部数据上传云端平台,建立桥梁混凝土表观病害电子档案。后期再次检测时,将新检测数据与历史数据对比,AI 自动分析裂缝是否扩展、扩展速率,判断病害发展趋势,以此提出注浆修补、表面封闭等养护施工建议,形成“检测-分析-处置-再监测”闭环流程。

3 AI 算法模型优化的施工适配要点

施工现场环境复杂,自然光忽明忽暗、混凝土表面麻面水渍多、微裂缝纹理模糊,原始基础 YOLO-v8 模型直接用于现场检测会出现漏检、误检问题,因此要针对桥梁工程场景优化算法模型,适配现场施工工况。第一,在 YOLO-v8 主干网络中增加 CBAM 注意力模块,强化对细长裂缝纹理特征的提取,抑制混凝土污渍、划痕等无关特征,降低伪裂缝误检率;第二,选用 WIoU 损失函数优化模型训练,解决细小裂缝样本数量少、模型训练不均衡的问题,提升 0.1~0.3mm 微裂缝识别精度;第三,对 U-Net 网络进行轻量化裁剪,减少网络参数量,压缩模型大小,使其能够部署在平板、嵌入式设备,实现施工现场离线实时运算,摆脱网络限制;第四,扩充自建桥梁裂缝数据集,加入阴天、逆光、雨后潮湿等不同工况下的实拍图像,完成迁移学习,提升模型在不同环境下的泛化能力。优化后模型裂缝识别准确率可以达到 90% 以上,宽度测量误差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,满足现行《公路桥梁技术状况评定标准》检测精度要求。

4 现场施工质量控制措施

(1) 图像采集质量管控:镜头必须与混凝土检测面尽

量垂直,拍摄距离保持稳定;逆光环境必须开启偏振补光灯,避免画面过暗、反光模糊,一旦图像存在大面积阴影、虚焦模糊,要重新拍摄,不合格图像禁止导入 AI 算法系统。(2) 标定精度管控:标定板必须紧贴混凝土表面,不能悬空、倾斜;无人机航拍时激光测距要精准,每 20m 检测段重新标定一次,降低尺寸换算误差。(3) 算法结果复核管控:AI 自动识别完成后,工作人员对标记出的裂缝进行抽检复核,把 AI 误判的伪裂缝剔除;对于宽度大于 0.2mm 的结构性裂缝,再使用人工裂缝宽度尺进行校核,保证检测数据真实可靠。(4) 环境管控:大风天气禁止无人机航拍,防止镜头晃动造成图像模糊;雨天混凝土表面有水渍,会干扰 AI 识别,应在雨后混凝土表面完全干燥后再开展检测施工。

5 工程应用效益分析

5.1 经济效益

传统人工高空检测需要搭设脚手架、租赁登高车,人工成本、机械租赁费用高昂,一跨桥梁人工检测周期 3~5 天。采用机器视觉+AI 智能检测技术,无人机一天即可完成整座中小桥梁全桥混凝土表观巡检,省去脚手架搭设、高空设备租赁费用,大幅缩短工期;同时可以提前发现早期微裂缝,及时做封闭处理,避免后期裂缝扩大后进行注浆加固,节约后期大修成本,长期运维阶段经济效益十分明显。

5.2 安全效益

传统高空人工检测作业属于高处危大工程,存在高空坠落、坠物风险。机器视觉依靠无人机、地面相机完成非接触式检测,工作人员只在地面开展操作,规避高空作业安全隐患,降低安全事故发生概率。

5.3 技术效益

传统人工检测数据零散,仅依靠纸质表格记录;智能检测技术可以形成标准化电子台账,实现长期动态监测,AI 自动对比多期裂缝变化情况,精准预判病害发展趋势,实现从事后维修转变为事前预防性养护,提升桥梁工程数字化、智能化管理水平,契合智慧交通的发展方向。

6 现存技术问题与未来优化方向

6.1 当前存在短板

第一,当混凝土裂缝被藤蔓、杂物完全遮挡时,机器视觉无法拍摄完整画面,AI 算法不能完成识别;第二,极端强光、暴雨浓雾环境下成像质量差,算法识别精度下降;第三,当前轻量化 AI 模型对于极细微发丝裂缝识别依旧存在少量漏检问题;第四,无人机在桥梁箱梁内侧等狭

小密闭空间飞行受限，视觉采集存在盲区。

6.2 后续优化方向

其一，融合多源视觉设备，将爬行机器人搭载工业相机，进入箱梁内部狭小区域进行成像，弥补无人机检测盲区；其二，融合红外视觉技术，在光照不足环境下辅助成像，提升全天候检测能力；其三，持续扩充裂缝数据集，进一步迭代优化 AI 算法，提升发丝级微裂缝识别能力；其四，将 AI 检测系统与 BIM 模型结合，把裂缝病害位置直接映射在桥梁 BIM 模型上，实现病害三维可视化管理，进一步完善智慧桥梁运维体系。

7 结语

机器视觉结合 AI 深度学习算法的桥梁混凝土表面裂缝智能检测施工技术，改变了传统人工检测模式，依托高清成像设备实现非接触式图像采集，依靠优化后的 YOLO-v8+U-Net 人工智能算法自动识别裂缝、测算裂缝几何参数，构建起完整的“图像采集-AI 智能识别-数据归档-病害分析-养护决策”施工流程。该技术节约检测工期、降低高空作业安全风险，检测精度优于传统人工巡检，可用于桥梁现浇施工阶段混凝土表面质量验收、竣工验收以及长期运维阶段病害常态化巡检。随着人工智能、机器视觉技术持续迭代升级，结合爬行机器人、BIM 数字化平台，该检测技术会进一步完善，在国内公路、市政桥

梁工程中得到更加广泛的应用，推动桥梁工程养护向着数字化、智能化方向发展。

参考文献：

- [1] 谢明志, 樊丁萌, 蒋志鹏等. 基于计算机视觉的混凝土结构裂缝检测研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(03): 582-594.
 - [2] 蒋仕新, 邹小雪, 杨建喜等. 复杂背景下基于改进 YOLO v8s 的混凝土桥梁裂缝检测方法[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(06): 135-147.
 - [3] 朱前坤, 谢辰辉, 张琼等. 基于计算机视觉和深度学习的古桥裂缝识别方法[J]. 西南交通大学学报, 2026, 61(2): 529-540.
 - [4] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T H21-2020 公路桥梁技术状况评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
 - [5] 王佳男, 李军. 基于 U-Net 改进算法的混凝土桥梁裂缝像素级分割研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(08): 210-221.
- 作者简介: 杨锦鹏 (1990.05.01), 男, 白族, 云南省大理州, 本科, 文山州路桥有限责任公司, 中级 (工程师), 项目总工, 研究方向: 道路与桥梁工程。