

基于机器视觉的桥梁施工大体积混凝土裂缝智能监测技术

杨庆玲¹ 丁建伟²

1.中交第三公路工程局有限公司河北雄安设计咨询分公司 河北 雄安新区 101399

2.中建市政工程有限公司 北京 大兴 102600

【摘要】：桥梁施工技术日益进步，结构安全性已经成为工程领域急需解决的一个重要课题，大体积混凝土桥梁建设中裂缝的产生与扩展对结构稳定性与耐久性有着直接的影响。本文对基于机器视觉桥梁施工中大体积混凝土裂缝智能监测技术特点及应用现状进行总结，对目前技术所面临的重大挑战进行分析，并有针对性地提出优化对策，高分辨率成像，先进图像识别算法，非接触远距离监测，大数据支撑实时预警及可视化监控等技术，机器视觉技术可以有效地提高裂缝识别准确性及监测安全性。

【关键词】：机器视觉；裂缝监测；大体积混凝土；优化对策

DOI:10.12417/2705-0998.25.08.066

引言

桥梁作为一种重要基础设施承载了巨大的交通流量，为国家经济社会发展提供了重要支持，在大体积混凝土桥梁建设中，裂缝形成通常存在很大不确定性，常规裂缝检测方法通常难以达到高精度、实时监控要求^[1]。机器视觉，深度学习和数据分析的飞速发展，出现了以机器视觉为核心的智能化监测技术，采用高分辨率摄像头及先进图像处理算法可对混凝土裂缝进行实时准确识别和定位，大大提高裂缝检测精度和效率。

1 机器视觉裂缝监测的技术特点

1.1 高分辨率与识别算法提升精度

在图像传感器技术不断进步的背景下，目前机器视觉系统普遍使用高分辨率工业相机来获得混凝土表面高清图像，这一发展大大提高了裂缝监测精度，高清晰度的图像能够准确地捕获裂缝的微小变动，如宽度、长度和形状等几何属性，为之后的识别工作提供了宝贵的数据支持^[2]。图像识别算法的演变。整合卷积神经网络（CNN）、U-Net、YOLO 等先进的深度学习技术，系统能够在端到端的操作模式中自动完成特征的提取工作、裂缝识别与像素级分割显著提高识别的精度与效率。这些算法利用多层感知机制可以了解图像中复杂的信息，特别是对有噪声和背景干扰图像的处理显示了较强的稳定性，借助于数据增强和迁移学习技术也克服了训练样本不充分的缺点，使得该模型具有了更为广阔的适应性，综合来看高分辨率成像和先进识别算法相结合已经成为了提升裂缝监测准确性的核心方法。

1.2 非接触远距离增强监测灵活性

桥梁施工现场具有空间结构复杂，作业高度高，环境动态变化频繁的特点，并且机器视觉系统具有非接触，远距离监控的天然优势，可以通过安装固定摄像头或者布设无人机飞行平台来实现远距离图像采集，大大提高监控的灵活性与安全性^[3]。该技术本质优点是不干扰施工过程，不需要关闭施工区域就能完成监测任务且适合在施工高峰期全天候作业，在梁体吊装，

高墩结构及封闭区域等情况下，采用人工或者传感器的布设都是比较困难的，视觉系统可以通过远程采集的方式来避免上述难题。变焦镜头和自动对焦模块的协同作用，能够自适应地调节监测距离及视角，同时维持高分辨率成像，从而提高了系统的部署效率。非接触式采集方式也有较好的重复性和定点性，该系统能够在指定区域内连续定点监测并记录裂缝开展情况，达到精细化目的、动态化管理为桥梁结构的长期健康监测提供了依据。

1.3 大数据支撑实时预警与可视化

在桥梁工程信息化建设带动下，机器视觉系统已经不是单一图像获取工具，而是逐渐发展成为集成数据分析，智能识别以及预警响应等功能的综合平台^[4]。该系统能够在大数据处理平台的支持下，把多时点的影像数据上传到云端，并完成影像的存储，标签化管理，识别比对和趋势分析等功能，将监测数据与 BIM（建筑信息模型）等工程管理系统进行整合，可以将这些数据映射到三维结构模型中，从而准确地展示裂缝的位置、变化趋势和受影响的区域，实现了对空间和时间的精确定位。从预警机制上看，该系统可以对裂缝宽度的增长速率，长度的变化幅度和密集分布区的关键指标阈值进行设置，当超过预设范围时自动报警以提醒施工方进行干预，该类机制显著提高了施工期结构安全保障能力和规避人为疏忽造成工程风险。可视化技术的进步还使裂缝监测成果通过热力图，趋势曲线和历史对比图更直观地展示出来，从而有效地推动了多部门协同作业。施工人员，设计单位及监理单位可以在统一平台的基础上进行信息共享，做到快速反应和精准决策。

2 当前技术应用中存在的问题

2.1 光照变化与遮挡影响图像质量

在桥梁施工现场，机器视觉监测系统面临的一大技术难题是图像采集的不稳定性，尤其是在面对自然光线变化和环境遮挡的情况下，这种不稳定性受到了严重的影响。桥梁施工往往是在室外进行的，日照强度会随着时间的推移而急剧变化，特

别是早晚, 阴晴和强逆光的天气, 拍摄的影像往往存在曝光过度的现象、阴影遮挡或者图像对比度下降等现象直接影响到裂缝边缘清晰度以及后续的识别精度, 施工现场尘土飞扬, 模板遮挡和混凝土浆液残留的现象广泛存在, 这些物理性干扰物通常都会粘附在混凝土的表面, 对实际裂缝信息的遮挡或者伪装造成了图像采集阶段就出现了缺陷。没有充分克服环境因素对动态干扰的影响, 视觉系统对遮挡物主动回避能力不足, 当图像存在遮挡信息时, 识别算法会产生漏检或者误报等问题, 从而降低了监测系统运行的可信度和稳定性。

2.2 裂缝多样性降低识别稳定性

桥梁大体积混凝土施工及养护阶段会出现干缩裂缝, 温差开裂, 结构开裂和塑性收缩开裂等多类型裂缝, 它在几何形态, 颜色分布, 扩展方向等方面都存在着很高的差异性。这一裂缝多样性直接增加了裂缝识别难度, 尤其在图像背景比较复杂的情况下, 识别算法易产生分类错误和边界误判, 深度学习模型能够在一定条件下达到很高的准确率, 对训练数据覆盖面依赖性很强。大多数裂缝识别算法都是在实验室环境下或者人工筛选图像集上构造而成, 没有完全模拟出实际工程场景中的复杂场景, 造成算法泛化能力差。在复杂背景下模型易将背景纹理误判为裂缝, 或漏检非典型形态裂缝, 裂缝时空演变特性考虑不足, 会在较短的时间内慢慢扩展且变化不容易觉察, 单帧图像不能反映裂缝的演化趋势, 导致裂缝的初期阶段很难准确地识别。

2.3 集成度低与成本高制约应用

机器视觉技术在实验与试点项目中已展示出良好的应用前景, 在大规模推广应用过程中仍面临诸多现实障碍, 其核心问题在于系统集成度低, 施工, 运维成本高。市面上的裂缝监测系统大多是由图像采集终端, 处理服务器, 识别算法平台和数据传输模块几个独立的模块结合而成, 各个环节没有统一的标准和接口协议造成了系统部署的复杂性和维护费用的居高不下。系统的核心组件例如高分辨率工业相机, 高性能 GPU 计算平台和远程数据传输设备成本较高, 具有较大的运行功耗, 不利于长周期的稳定工作。在桥梁施工这种对时间和成本都非常敏感的情景下, 增加投资的技术系统很难得到人们普遍认可, 特别对于中小施工企业来说, 装备一套完整的裂缝智能监测系统经济上难以负担。监测系统对操作人员技术要求很高, 系统部署调试需要专业工程师来完成, 在维护过程中涉及到软硬件多维联动等问题, 进一步提升了人力成本以及技术门槛, 现有的裂缝监测系统因缺少模块化和标准化的设计而难以在不同的工程上快速移植和部署, 通用性差, 极大地限制了该系统的大规模推广应用。

3 裂缝智能监测系统的优化对策

3.1 图像预处理与信息融合增强鲁棒性

为处理施工现场复杂环境对图像的干扰, 提高裂缝识别稳定性与准确性, 需要在图像采集之后先引入有效的图像预处理技术。图像预处理是裂缝识别流程的关键一环, 其主要目的在于增强图像质量, 强化裂缝特征以及抑制背景噪声等, 为之后识别算法的实现提供更加可靠的输入数据。常见图像预处理技术有灰度均衡, 自适应阈值分割, 边缘增强和去噪滤波, 这些方法能有效地增强低对比度图像清晰度并使得裂缝边缘更凸出, 以降低识别误差, 利用 Retinex 算法动态校正光照非均匀图像, 可以抑制光照伪影, 同时保留纹理细节, 双边滤波等降噪手段还能有效地去除尘埃, 噪点等因素对裂缝识别造成的干扰。多源信息融合除在图像层面上进行优化外, 还是提高系统鲁棒性的又一个重点策略, 可以通过整合红外成像, 激光扫描, 位移传感器以及其他辅助数据来实现可见光图像的时空匹配以及信息互补。在夜晚或者低照度环境中红外图像可以有效地对裂缝热辐射信息进行补充, 激光扫描可以提供表面轮廓数据来帮助判断裂缝的深度和形貌, 该多模态数据融合在增强系统适应不同情景能力的同时, 也为裂缝本质及发展趋势的智能区分提供多维度支持。

3.2 算法优化与训练集扩展提升泛化能力

面对裂缝种类繁多和背景复杂的识别难点, 从算法层面进行优化和训练数据拓展是增强系统识别能力的基本途径。传统浅层模型已很难处理施工现场非结构化图像环境问题, 迫切需要引入更为深层次和智能化的识别模型来不断地优化结构和学习机制。当前运用较多的深度学习模型有 U-Net, Faster R-CNN, YOLOv5 等等, 这些模型有很强的目标检测和语义分割能力, 在应用过程中仍然存在误检和漏检现象。采用注意力机制 (Attention) 和残差结构 (ResNet) 来增强模型对裂缝区域的关注度和特征描述能力, 从而提高微细裂缝识别的准确性, 为了增强模型实际适用性, 还需要构造一个涵盖各种施工场景和裂缝形态的大范围训练集。目前开源的裂缝图像数据集多数是在理想环境下获取的, 缺少施工尘土, 设备遮挡和结构干扰等野外因素, 提出以实际施工项目为背景进行裂缝图像采集和手工标注工作, 并构建含有多场景, 多类型和多时间段的裂缝图像库以提高模型训练代表性和多样性。利用数据增强技术, 例如旋转, 缩放, 仿射变换和噪声添加来拓展数据的维度, 并将迁移学习和半监督学习策略结合起来使用, 把现有的模型移植到新的环境下进行快速适配, 显著减少了训练的成本和时间, 将算法结构优化和多源数据训练有机融合, 可以显著增强模型泛化能力和识别稳定性, 从而为机器视觉系统实现复杂施工环境下的高质量监控提供了强有力的支持。

3.3 软硬件一体化设计降低系统成本

为了促进裂缝监测系统大规模应用于桥梁施工,需要从系统设计层面上提高集成度、减少部署与维护成本、真正做到“项目可以落地”方案。目前问题大多来自于软硬件分离,系统结构复杂以及设备不够通用,所以向软硬件一体化以及模块化发展是突破成本和运维难题的重点战略。硬件上,要优先考虑小型化,低功耗和可集成工业视觉终端设备并与嵌入式计算单元相结合进行本地初步处理以降低数据传输负担。边缘计算设备(如 NVIDIA Jetson 系列、Google Coral)已能支持复杂神经网络的本地运行,预计传统的云端计算任务可以移植到终端上执行,明显降低系统带宽需求和运行延迟。软件层面上,要开发针对施工现场的可视化操作界面、简化部署流程和参数配置、使非专业人员具有可操作性,采用模块化的设计方式,把系统分为采集,识别,报警,记录和上传等相互独立的功能模块,并支持根据需要进行组合部署和快速更换维护,增强了系统的可维护性。制定统一通信协议和接口标准以方便系统和 BIM 平台及施工管理平台的数据联通以及监测信息和工程进度及结构参数的集成分析,这可以促进信息利用效率的提高,达到精

细化的施工管理。

4 总结

在桥梁施工技术日益发展的今天,裂缝监测技术已经成为保障桥梁结构安全最主要的方法,以机器视觉为基础的裂缝监测技术由于具有高精度,高效率以及非接触式检测的优点而被广泛运用于许多工程项目。文中详细描述了这一技术的主要特征,其中包括高分辨率图像采集和先进图像识别算法,以及大数据驱动实时预警和可视化监测等、和非接触远距离采集等监测灵活性,说明机器视觉应用于裂缝监测有明显技术优势。提出了一系列的优化对策,包括图像预处理,多源信息融合,算法优化,训练集扩展以及软硬件一体化设计,这些应对措施可以有效地增强系统鲁棒性,准确性以及可扩展性,促进机器视觉裂缝监测技术朝着更加高效,智能,经济等方面发展,基于机器视觉的桥梁施工裂缝监测将会有更大的发展前景,以机器视觉为核心的智能监测系统有望推广到更多工程项目,为确保桥梁安全,提高施工效率,提供了一种更准确,更即时的解决方案。

参考文献:

- [1] 卜娜蕊,刘睿,赵慧斌,等.浅谈建筑工程大体积混凝土裂缝控制技术[J].四川水泥,2023(5):265-268.
- [2] 侯玉杰.港口航道工程大体积混凝土裂缝的施工控制技术[J].建筑与装饰,2024(10):37-39.
- [3] 李浩然,秦铭.建筑工程施工中大体积混凝土裂缝控制技术[J].建筑与装饰,2024(5):178-180.
- [4] 赵志峰,苏洪涛.大体积混凝土施工裂缝成因及其调控技术[J].建筑机械,2024(6):106-112.