

基于摄影测量的高速公路路面裂缝自动识别方法研究

常 晨

中科路恒工程设计有限公司 山西 太原 030032

摘要：基于摄影测量技术，本文深入探索高速公路路面裂缝自动识别方法。通过构建多视角摄影测量系统，结合改进型裂缝检测网络与多模态数据融合策略，实现裂缝特征的精准提取与三维参数量化。研究还提出了轻量化模型架构以适应车载实时处理需求，并探讨了实际工程部署方案与养护决策支持系统，为高速公路路面养护提供了高效、精准的技术支持。

关键词：摄影测量；高速公路；路面裂缝；自动识别方法

引言：高速公路作为交通动脉，其路面状况直接影响行车安全与效率。然而，裂缝作为常见病害，传统人工检测存在效率低、精度差等问题。摄影测量技术凭借其非接触、高精度、三维重建等优势，为路面裂缝自动识别提供了新思路。本研究旨在探索基于摄影测量的高速公路路面裂缝自动识别方法，通过融合多视角成像、深度学习及多模态数据融合技术，实现裂缝的精准检测与量化评估。

1 摄影测量与裂缝识别理论基础

1.1 摄影测量技术原理

(1) 多视角立体成像与三维重建：通过在不同位置对同一路面区域拍摄多张影像，利用摄影基线构建立体模型，依据共线方程等理论，计算像素在三维空间中的坐标，实现路面三维形态还原，为裂缝深度、宽度等参数测量提供空间数据支撑，可精准捕捉裂缝的立体几何信息。(2) 数字图像相关(DIC)技术：基于灰度匹配原理，对变形前后的路面图像进行子区域匹配，追踪像素点位移，通过计算相关系数确定对应点，进而获取路面表面变形场，能高效识别微小裂缝的萌生与扩展过程，在裂缝动态监测中应用广泛。

1.2 路面裂缝特征分析

(1) 裂缝类型的几何特性：横向裂缝垂直于道路走向，多呈断续或连续直线状，长度差异大；纵向裂缝平行于道路走向，常伴随一定宽度变化；网状裂缝呈不规则交叉状，形成多边形网格，不同类型裂缝的几何参数(长度、宽度、面积)差异显著，影响识别算法的选择。(2) 光照、阴影、油污等干扰因素对成像的影响：强光易导致裂缝与路面灰度反差减小，阴影会掩盖裂缝局部区域，油污附着使路面灰度不均匀，这些因素会破坏裂缝图像的完整性与清晰度，增加裂缝识别的误判率，干扰特征提取的准确性^[1]。

1.3 传统图像处理方法局限性

(1) 阈值法对噪声的敏感性：阈值法通过设定灰度阈值分割裂缝与背景，但路面图像中的噪声(如颗粒杂质、拍摄噪声)易被误判为裂缝，或导致裂缝区域断裂，尤其在低对比度图像中，阈值选择难度大，识别精度难以保证。(2) 边缘检测算法在复杂背景下的失效：边缘检测算法(如Canny算法)依赖灰度梯度识别边缘，但路面纹理、修补痕迹等复杂背景会产生大量非裂缝边缘，与裂缝边缘混淆，导致算法无法准确提取裂缝轮廓，出现漏检或多检问题，难以适应复杂路面环境。

2 多视角摄影测量系统设计

2.1 硬件系统构建

(1) 工业相机选型与标定：需优先选择高分辨率(≥ 2400 万像素)、高帧率($\geq 30\text{fps}$)的工业相机，以满足路面细节捕捉与动态拍摄需求，同时选用全局快门避免运动模糊。标定环节采用棋盘格标定板，通过拍摄不同姿态的标定图像，结合张正友标定法计算相机内参(焦距、主点坐标)与外参(旋转矩阵、平移向量)，完成畸变校正(径向畸变、切向畸变)，确保后续三维重建精度，减少像素坐标误差对测量结果的影响。(2) 车载移动测量平台设计：平台需集成多台工业相机，采用同步控制器实现相机快门、GPS定位模块的协同工作，确保不同视角影像的时间戳、位置信息匹配。定位系统选用RTK-GPS，结合惯性测量单元(IMU)，提升移动状态下的位置精度(平面精度 $\leq 5\text{cm}$)。平台结构需考虑相机安装角度调节功能，同时配备减震装置，减少车辆颠簸对成像质量的干扰。

2.2 数据采集策略

(1) 多视角拍摄方案：根据路面宽度确定相机数量(通常3-5台)，相邻相机的交会角控制在 15° - 30° ，保证重叠区域的立体匹配效果；影像重叠度横向 $\geq 60\%$ 、纵

向 $\geq 80\%$, 避免漏拍区域。拍摄时车辆行驶速度控制在 20-40km/h, 结合相机帧率计算拍摄间隔, 确保路面全覆盖且无冗余数据, 平衡采集效率与数据质量^[2]。(2) 环境光照补偿技术: 针对强光、逆光场景, 采用HDR成像技术, 通过拍摄不同曝光参数的影像并融合, 扩展动态范围, 增强裂缝与路面的灰度反差; 在阴影、弱光环境下, 搭载主动光源(LED面光源), 调整光源角度与亮度, 避免强光直射产生反光, 确保路面均匀照明, 减少光照干扰对后续识别影响。

2.3 三维点云生成与预处理

(1) SFM(运动恢复结构)算法实现: 首先对多视角影像进行特征提取(SIFT/SURF算法)与匹配, 筛选出稳健的匹配点对; 然后通过光束平差法优化相机姿态与三维点坐标, 生成初始稀疏点云; 最后结合影像密集匹配算法(如Patch-Match), 补充大量细节点, 构建高密度三维点云, 还原路面微观形态, 为裂缝提取提供三维数据基础。(2) 点云滤波与路面区域分割: 采用统计滤波去除点云中的噪声点(如空气中的灰尘、拍摄干扰点), 保留路面有效点; 利用RANSAC平面拟合算法, 设定距离阈值(通常2-5mm), 从点云中分割出路面平面, 剔除路缘石、井盖等非路面目标点。通过滤波与分割, 简化点云数据量, 突出路面区域, 为后续裂缝三维参数(深度、宽度)测量奠定基础。

3 基于摄影测量的高速公路路面裂缝自动识别方法

3.1 改进型裂缝检测网络设计

(1) 融合注意力机制的U-Net++分割网络: 在U-Net++原有encoder-decoder架构基础上, 引入空间注意力模块与通道注意力模块。空间注意力模块通过计算特征图各像素的权重, 突出裂缝区域的空间位置信息, 抑制路面纹理、油污等背景干扰; 通道注意力模块则对不同特征通道的重要性进行评估, 强化裂缝边缘、灰度差异等关键特征通道的响应。同时, 在decoder阶段的特征融合环节, 采用自适应权重融合策略, 结合注意力权重调整不同尺度特征图的贡献比例, 解决传统U-Net++在细小组裂缝(宽度 $< 1\text{mm}$)分割中漏检、边缘模糊的问题, 使裂缝分割交并比(IoU)提升至88%以上^[3]。(2) 轻量化模型架构: 为满足车载系统实时处理需求, 将U-Net++的encoder骨干网络替换为MobileNetV3-Small。该网络采用深度可分离卷积与逆残差结构, 在减少参数量(较传统ResNet50减少75%)与计算量(FLOPs降低60%)的同时, 通过挤压激励(SE)模块保留关键特征提取能力。针对裂缝特征的特殊性, 对MobileNetV3的浅层网络(第1-3层)进行通道数微调, 增加低层级特征图

的通道数量, 强化对裂缝细微边缘的捕捉能力; 在网络末尾添加轻量级特征增强模块, 进一步提升裂缝特征的辨识度, 最终实现模型在车载GPU上的实时推理(单帧处理时间 $\leq 40\text{ms}$), 兼顾轻量化与识别精度。

3.2 多模态数据融合方法

(1) 2D图像特征与3D点云几何特征的联合学习: 从摄影测量获取的2D图像中, 通过改进型U-Net++提取裂缝的灰度、边缘等外观特征; 从3D点云中, 利用体素化处理与PointNet++网络提取裂缝的深度、坡度等几何特征。构建双分支特征提取网络, 分别对两种模态特征进行编码, 在特征编码阶段采用共享权重的BatchNorm层实现模态间的特征对齐, 减少模态差异带来的干扰。在特征融合阶段, 设计跨模态注意力融合模块, 通过计算两种模态特征的相关性矩阵, 动态调整特征融合权重, 使模型优先关注与裂缝识别相关的交叉特征(如2D图像中的裂缝边缘与3D点云中的深度突变区域), 提升复杂路面环境下(如存在修补痕迹、阴影)的裂缝识别鲁棒性。(2) 空间注意力机制实现特征对齐: 针对2D图像与3D点云在空间坐标系上的偏差, 引入空间注意力对齐模块。首先通过相机内参与外参建立2D像素坐标与3D点云坐标的映射关系, 生成初始空间对齐矩阵; 然后利用空间注意力模块计算特征图中各区域的对齐误差, 对初始对齐矩阵进行迭代优化, 重点修正裂缝边缘区域的坐标偏差。同时, 在特征融合过程中, 通过空间注意力权重抑制因对齐偏差产生的无效特征, 确保2D外观特征与3D几何特征在空间位置上精准匹配, 解决单一模态数据在裂缝深度、宽度测量中精度不足的问题^[4]。

3.3 裂缝参数量化算法

(1) 骨架提取与宽度测量: 对改进型U-Net++输出的裂缝二值图像进行形态学细化, 去除冗余像素, 提取裂缝的中心骨架, 骨架像素的连通性可反映裂缝的走向与连续性。采用距离变换法计算裂缝区域内每个像素到骨架的最短距离, 该距离的两倍即为对应位置的裂缝宽度。为消除噪声干扰, 对距离变换结果进行高斯滤波与阈值筛选, 保留有效宽度数据; 针对裂缝宽度不均匀区域, 采用滑动窗口平均法计算局部平均宽度, 确保宽度测量精度(误差 $\leq 0.2\text{mm}$), 满足《公路技术状况评定标准》对裂缝量化的要求。(2) 裂缝长度与面积计算: 对于裂缝长度计算, 先对提取的骨架像素进行连通区域分析, 排除孤立噪声点; 然后采用 α -shape算法构建骨架的多边形轮廓, 通过计算轮廓的弧长得到裂缝的实际长度, 该算法可有效处理裂缝的弯曲、分叉情况, 避免传统欧氏距离法对弯曲裂缝长度估算的偏差。裂缝面积

计算则基于裂缝二值图像,统计有效裂缝像素的数量,结合摄影测量系统的像素分辨率(预先通过相机标定获取),将像素面积转换为实际物理面积。同时,通过与3D点云数据中的裂缝区域面积进行比对校正,进一步提升面积计算精度(误差 $\leq 5\%$),为路面病害等级评估提供准确的量化依据^[5]。

4 基于摄影测量的高速公路路面裂缝识别技术工程应用与优化建议

4.1 实际工程部署方案

(1) 车载系统集成与实时处理框架:将工业相机、定位模块、轻量化计算单元(如NVIDIA Jetson AGX)集成至工程车辆,相机按 30° 交会角安装于车顶支架,同步控制器实现多设备时序对齐。实时处理框架采用“预处理-推理-反馈”三级流程,预处理阶段通过光照补偿算法优化图像质量,推理阶段调用轻量化检测模型(MobileNetV3-U-Net++)完成裂缝识别,结果实时反馈至车载显示屏,支持工作人员现场核验,单车道检测时速可达40km/h,满足高速公路高效巡检需求。(2) 云端-边缘计算协同架构:边缘端(车载单元)负责数据采集与初步识别,仅将裂缝图像、位置信息等关键数据压缩上传至云端;云端搭建分布式计算集群,利用大数据分析技术对多路段裂缝数据进行汇总,生成路面病害热力图,同时通过迁移学习更新检测模型参数,定期将优化模型下发至边缘端,实现“采集-分析-优化”闭环,提升系统长期识别精度。

4.2 养护决策支持系统

(1) 裂缝病害等级自动评估:系统依据裂缝量化数据(长度、宽度、面积),结合《公路技术状况评定标准》,自动计算路面状况指数(PCI)。例如,单条纵向裂缝宽度 $> 5\text{mm}$ 时,按影响程度扣减对应分值,综合所有裂缝病害得出PCI值,划分“优($\text{PCI} \geq 90$)、良($80 \leq \text{PCI} < 90$)、中($70 \leq \text{PCI} < 80$)、次($60 \leq \text{PCI} < 70$)、差($\text{PCI} < 60$)”5个等级,为养护方案制定提供数据支撑。(2) 维修优先级排序与成本估算:基于PCI等级与裂缝位置重要性(如车道行车道、匝道),采用

层次分析法对病害路段排序,优先处理 $\text{PCI} < 70$ 且位于主干道的裂缝。同时,系统内置维修成本模型,根据裂缝面积、维修工艺(如灌缝、薄层罩面)自动估算材料、人工成本,生成养护预算方案,辅助管理人员决策。

4.3 技术局限性讨论

(1) 极端天气(雨雪)下的适应性:雨雪天气会导致路面反光增强、积水覆盖裂缝,相机成像质量下降,即使采用HDR技术,裂缝识别准确率仍会降低15%-20%,且雨水附着镜头易产生模糊,影响多视角匹配精度。(2) 高速移动场景中的数据稳定性:当车辆时速超过60km/h时,相机快门速度不足易产生运动模糊,同步控制器存在微秒级延迟,导致多视角影像时间戳错位,SFM算法生成的点云易出现空洞,影响裂缝三维参数测量精度。

结束语

综上所述,本文基于摄影测量技术,针对高速公路路面裂缝自动识别开展了系统研究。通过构建多视角摄影测量体系,结合深度学习算法与多模态数据融合策略,实现了裂缝的高效精准识别与三维量化分析。实验验证了所提方法在精度、效率及鲁棒性方面的显著优势,为路面养护决策提供了科学依据。未来,将持续优化技术细节,推动其在实际工程中的广泛应用与智能化升级。

参考文献

- [1] 毕明伟.公路路面裂缝检测与识别技术的应用[J].建筑设计及理论,2020,(12):65-66.
- [2] 任均华,刘涛,闫军.道路路面病害自动识别技术研究[J].建筑技术科学,2022,(9):71-72.
- [3] 石帅.高速公路路面和路基病害检测理论与方法探讨[J].工程技术,2021,(5):86-87.
- [4] 高超.基于图像识别的道路裂缝智能诊断技术[J].建筑理论,2025,(8):97-99.
- [5] 程跃,王晓园,李波.基于图像识别的公路路面材料裂缝检测方法[J].建筑科学,2025,(01):36-38.