

# 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<sup>[1]</sup>。

### 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( $\geq 2400$ 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 $15^\circ\text{-}30^\circ$ ，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<sup>[2]</sup>。（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<sup>[3]</sup>。（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<sup>[4]</sup>。

### 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 $\alpha$ -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 $\leqslant 5\%$ ），为路面病害等级评估提供准确的量化依据<sup>[5]</sup>。

#### 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 $\text{PCI} < 70$ 且位于主车道的裂缝。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.