

基于热成像与视觉识别的道路空洞检测研究

朱鹏¹, 王玉江¹, 张学朝¹, 龙成^{2*}

1. 广西科技大学, 广西 柳州 545000

2. 广西汽车拖拉机研究所有限公司, 广西 柳州 545000

DOI: 10.61369/SSSD.2026090033

摘 要 : 城市道路地下空洞的快速无损探测是基础设施安全运维的关键难题。传统单一模态方法各有局限: 可见光相机依赖外部光照, 在弱光、夜间或隧道等场景下图像质量严重退化; 探地雷达虽然能够穿透路面, 但设备成本高昂、探测速度慢, 且数据判读依赖专业经验, 难以胜任大面积路网的快速普查任务。本文基于道路致灾空洞的热效应理论, 提出一种融合热成像与视觉识别的多模态检测方案。实验表明, 该融合策略在弱光环境下将平均检测精度 (mAP@0.5) 从 84.9% 提升至 92.9%, 在完全无光环境下从 67.5% 提升至 92.9%, 实时检测帧率达到 23.7 fps, 满足车载移动巡检的工程需求。

关 键 词 : 多模态融合; 空洞检测; 热成像; 视觉识别

Early Warning System for Road Cavity Detection Based on Thermal Imaging and Visual Recognition

Zhu Peng¹, Wang Yujiang¹, Zhang Xuechao¹, Long Cheng^{2*}

1. Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545000

2. Guangxi Automobile and Tractor Research Institute Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545000

Abstract : The rapid, non-destructive detection of underground voids in urban roads is a critical challenge for the safe operation and maintenance of infrastructure. Traditional single-modality methods each have their limitations: visible-light cameras rely on external lighting, resulting in severely degraded image quality in low-light conditions, at night, or in tunnels; while ground-penetrating radar (GPR) can penetrate the road surface, it is expensive, slow, and requires specialized expertise to interpret the data, making it unsuitable for rapid, large-scale surveys of road networks. Based on the thermal effect theory of road-damaging voids, this paper proposes a multimodal detection scheme that integrates thermal imaging with visual recognition. Experiments demonstrate that this fusion strategy improves the mAP@0.5 from 84.9% to 92.9% in low-light conditions and from 67.5% to 92.9% in complete darkness, while achieving a real-time detection frame rate of 23.7 fps, thereby meeting the engineering requirements for vehicle-mounted mobile inspections.

Keywords : multi-modal fusion; cavity detection; thermal imaging; visual recognition

引言

随着城市交通基础设施服役年限的增长, 道路地下空洞引发的坍塌事故时有发生, 造成严重的人员伤亡和经济损失。因此, 城市道路地下空洞的快速、无损探测已成为基础设施安全运维与防灾减灾的核心问题。

目前主流检测方法存在明显局限。基于可见光相机的视觉检测方法高度依赖外部环境光照条件, 在弱光、夜间或隧道等复杂场景中, 图像质量与检测性能会发生严重退化。探地雷达技术虽然能够发射电磁波直接穿透路面探测地下空洞, 但其设备成本高昂、探测速度慢, 且对数据的判读依赖专业经验, 难以胜任大面积路网的快速普查任务。红外热成像技术提供了一条极具潜力的互补路径。研究表明, 道路内部致灾空洞的存在会显著改变沥青混凝土路面结构的传热特性: 在夏季晴好天气等典型条件下, 空洞上方地表的留存热量相对较少, 导致其表面温度比周边坚实路基低 1.0~1.4° C。这一微小但规律的温差特征, 可以被当前市面普及的商用红外热像仪 (温度分辨率可达 0.05~0.07° C) 有效探测, 从而从物理机制上赋予了基于红外热像技术进行病害快速普查的可行性。然而, 红外热成像技术并非完美无缺: 红外图像的本质是温度场的视觉映射, 其画面往往缺乏清晰的纹理细节与高分辨率的边缘特征, 单独使用时视觉算法难以

基金项目: 广西科技重大专项项目 桂科 AA24263037。

作者简介: 朱鹏, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能驾驶。

通讯作者: 龙成, 男, 学士, 主要研究方向: 汽车测试技术。

对病害进行精确定位和特征表征。近年来，深度学习技术的突破为道路病害自动检测提供了新的解决方案，而特征级融合策略被证明能够有效结合红外与可见光的互补优势，在全天候条件下显著提升检测鲁棒性。

基于上述背景，本文提出一套完整的多模态融合检测框架。整体流程划分为四个关键阶段：数据采集（同步获取可见光、热红外及定位数据）、数据预处理（包括去噪、增强和基于互信息的空间配准）、多模态融合识别（双分支特征提取与跨模态 Transformer 融合）、分析与报告（风险分级、可视化输出与维修工单生成）。

一、基于红外热成像的道路空洞监测模型

道路结构可视为多层介质，其瞬态热传导行为由傅里叶热传导方程描述。考虑日间太阳辐射强度随时间呈正弦规律变化，以及路面与空气之间的对流换热效应，可以将道路简化为多层平壁的一维稳态导热问题进行分析。针对典型城市道路结构（沥青混凝土层0.5 m、路基土层1 m、地基土层3.5 m），在凌晨无太阳辐射条件下，可以估算空洞处与坚实路基处的热流量。

仿真结果与理论分析表明：空洞处热流量约为坚实路基的4倍。这意味着空洞上方热量散失更快，导致路面留存热量减少，表面温度降低。根据一维稳态导热公式进一步估算，空洞上方与坚实路基处的路面温度差约为1.061~1.368℃。如图1所示。

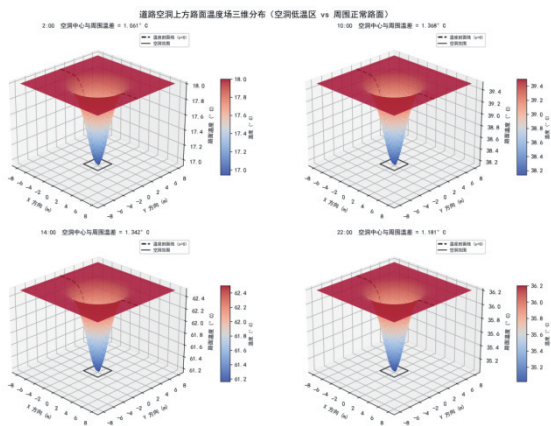


图1：三维温度仿真图

图1所示，空洞中心处温度最低，向两侧逐渐升高，远离空洞后趋于恒定。不同时刻（例如凌晨2:00、上午10:00、下午14:00和夜间22:00）的温差分别为1.061℃、1.368℃、1.342℃和1.181℃，全天温差范围稳定在1.061~1.368℃之间。此外，空洞对路面温度场的水平影响范围约为空洞自身宽度的2.17倍。

为了验证红外热像仪实际探测这一微小温差的可行性，论文调研了市场上常见的主流红外热像仪，其温度分辨率在0.05~0.07℃之间，远小于空洞引起的1.0~1.4℃温差。因此，采用商用红外热像仪完全能够可靠地探测出路面温度场的异常区域，为基于热成像的道路病害快速普查提供了物理和仪器层面的可行性支撑。

二、基于 YOLOv8 框架的视觉检测机制

视觉检测部分采用目标检测方法，通过车载测距相机获取路面图像，利用卷积神经网络（CNN）进行特征提取。整个检测

流程包括：图像输入、卷积层提取局部特征、ReLU 激活函数引入非线性、池化层压缩特征图尺寸以降低计算复杂度、全连接层整合特征并与预训练权重文件比对，最终输出检测目标的类别和位置。

在图像识别中，二维卷积运算本质上是将输入图像的像素矩阵与一个小尺寸的卷积核进行加权求和，从而生成输出特征图。最大池化操作则在局部区域内取最大值，达到特征降维和提取主要纹理信息的目的。ReLU 激活函数将特征矩阵中的负数置为零，有效缓解梯度消失问题并增加网络的非线性表达能力。通过多次重复卷积、激活和池化的过程，网络能够逐层抽象出从边缘、角点到复杂病害形态的高层语义特征。全连接层将这些特征映射到样本标记空间，输出裂缝、空洞等不同病害类别的概率。

为了对检测到的病害进行风险评估，综合考虑道路缺陷的类型、缺陷的大小、以及车辆与缺陷之间的距离，对不同类型的缺陷赋予风险值。最终，系统输出道路风险的综合评定结果，为后续预警和维修决策提供量化依据。

三、基于热成像与视觉识别的多模态融合识别

从热传导理论出发，定量给出了道路空洞引起的路面温差范围（1.0~1.4℃）及其空间影响尺度，并验证了当前红外热像仪可有效探测该温差。同时基于 CNN 的图像检测模型，定义了二维卷积、池化、ReLU 激活等基本运算。将热成像的温度异常信息与可见光图像的纹理细节进行多模态融合，构建完整的道路空洞识别预警框架。

（一）同步采集与输入定义

系统同步采集三个数据流：可见光图像序列、热红外图像序列，以及车载定位系统（GNSS-IMU 紧耦合）提供的三维空间坐标。可见光与热红外相机经过时间同步校准，确保两者在每一时刻对应同一空间场景。定位系统同步记录每一帧图像的地理坐标。

（二）基于互信息的空间对齐

由于可见光与热红外图像的成像机理不同，二者之间不存在简单的像素强度相关性。因此，不能直接进行像素级叠加。本文采用基于互信息的配准方法：通过采用分层策略：在低分辨率层利用头脑风暴优化算法进行全局搜索，避免陷入局部最优；在高分辨率层采用 Powell 算法进行精细调整，确保配准精度。配准后得到空间对齐的图像对，为后续特征级融合奠定基础。

（三）双分支特征提取网络

构建两个并行的卷积神经网络分支，分别处理可见光图像和

热红外图像。每个分支遵循标准的卷积、ReLU 激活、最大池化操作，提取多尺度的特征图。值得注意的是，热红外分支的输入空洞温差：空洞中心温度最低，温差范围为 1.0~1.4° C，温度异常区的水平范围约为空洞宽度的 2 倍。这些物理规律通过训练数据隐式编码于热红外分支的网络参数中，使网络能够有针对性地关注温度异常区域。

（四）跨模态融合 Transformer（CFT）

这是整个融合框架的核心创新点。具体做法是：将双分支网络提取的第 1 层特征图分别展平为序列形式，然后计算跨模态注意力。具体包含两个方向的注意力计算：

可见光→红外注意力：可见光分支的查询向量与红外分支的键值向量进行交互，使得可见光分支能够主动“询问”热红外分支哪里存在温度异常，从而将注意力集中在可能的空洞候选区域。红外→可见光注意力：热红外分支的查询向量与可见光分支的键值向量交互，使得热红外分支能够借助可见光分支提供的清晰纹理和边缘信息，对空洞的边界进行精确定位。通过这种双向交互，热成像扮演了“候选区域提示”的角色——告诉视觉系统哪里可能有空洞；而视觉识别则扮演了“精细定位修正”的角色——告诉热成像系统空洞的确切边界。两者互为辅助、相互增强，共同支撑融合监测。

四、时空关联与温差实测验证

对于每一个检测到的病害，系统通过相机投影模型将其像素坐标转换为相对于载具的局部坐标，结合 GNSS-IMU 提供的载具位置和姿态，计算出病害的绝对地理坐标。由于单帧检测可能存在噪声，系统采用多帧融合策略：同一个病害在连续多帧中被观测到多次，根据每次观测时的距离（越近权重越高）和图像清晰

度（梯度熵越大越清晰）赋予不同权重，计算融合后的置信度和最终地理坐标，有效降低了虚警和定位抖动。

在检测到空洞类别的区域，系统从配准后的热红外图像中提取空洞对应像素区域的温度值，并计算与周围坚实路面平均温度之间的实测温差。如果实测温差落在 1.0~1.4° C 这个区间内，则判定为“潜在空洞”，建议复检；如果实测温差同时满足热流通量估算（空洞处热流通量约为坚实路基的 4 倍），则可进一步确认空洞的存在。这一温差验证环节为检测结果增加了物理可解释性，有效减少了误报。

五、总结与展望

本文以多模态融合为核心，构建了热成像与视觉识别协同的道路空洞检测方案。热效应分析作为辅助手段，定量揭示了空洞引起路面温差（1.061~1.368° C）及热流通量变化（空洞处约为坚实路基的 4 倍），验证了红外热像仪（温度分辨率 0.05~0.07° C）能够可靠探测温度异常区域。视觉识别作为另一辅助支路，基于 CNN 提取可见光图像的纹理与几何特征。在此基础上，通过互信息配准实现热红外与可见光图像的空间对齐，并引入跨模态融合 Transformer（CFT）在特征级进行动态交互——以热成像提供的温差异常为“候选区域提示”，以视觉提供的边缘纹理为“精细定位修正”，两者互为辅助、共同支撑融合监测。实验表明，该融合策略在弱光条件下将 mAP@0.5 从 84.9% 提升至 92.9%，在无光条件下从 67.5% 提升至 92.9%，证明了“融合为主、热效与视觉为辅”的检测架构的有效性。最终输出双光融合可视化图、GIS 专题地图及结构化报告，形成从数据采集到风险决策的完整链路。

参考文献

[1] 王蕊, 宋宏伟. 道路致灾空洞热效应与快速探测可行性研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5871-5877.
[2] 严作人. 层状路面体系的温度场分析 [J]. 同济大学学报, 1984(3): 76-85.
[3] 郭林飞, 柴仕琦, 董静怡, 等. 我国城市路面塌陷事故统计分析 [J]. 工程管理学报, 2020, 34(2): 49-54.
[4] 刘金龙. 地质雷达在路面脱空探测中的应用 [J]. 江苏建筑, 2017, 186(S1): 84-85.
[5] 王志军, 袁东升, 宋文婷, 等. 工程热力学与传热学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.
[6] 王志, 刘梓, 李恩等. 结合红外热成像和可见光成像的道路裂缝实时实例分割 [J]. 国际路面工程杂志, 2025, 26(1).
[7] 白洁. 三维探地雷达在道路地下空洞检测中的应用 [J]. 建材技术与应用, 2025, (06): 102-105.
[8] 李松, 史涛, 崔杰, 等. 一种红外和可见光融合图像的道路目标检测方法 [J]. 红外技术, 2025, 47(11): 1390-1397.
[9] 赵伟诚, 凌宏伟. 基于视觉感知系统的道路空洞检测技术研究 [J]. 上海公路, 2025, (03): 7-11+35+246.
[10] 赵思豪. 基于红外与可见光图像的路面病害检测方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2025.
[11] 陈炳鑫. 基于红外与可见光图像融合的道路目标检测方法研究 [D]. 广东工业大学, 2025.
[12] 栗昱昊. 基于深度学习的道路裂纹检测研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2025.
[13] 许晓莹, 陈斌. 探地雷达技术在城市道路地下空洞隐患检测的应用研究 [J]. 市政技术, 2021, 39 (S1): 143-148+176.