

基于机器视觉的路面沉降监测技术

张祖杰

(上海市市政公路工程检测有限公司, 上海市 201108)

摘要: 针对近年隧道、管线等下穿高速公路、城市道路的地下工程对低影响交通的路面沉降实时安全监测的广泛需求,提出了一种基于机器视觉的非接触智能监测技术。技术采用可变焦球机(1~23倍光学变焦)作为核心数据采集设备,构建目标自动识别、坐标变换模型、图像处理流程和“端-边-云”协同架构的完整监测系统,实现800万像素分辨率图像的靶标特征自动提取,智能获取靶标(路面)竖向位移。经过室内外试验,验证了该技术的监测精度与可靠性,实现了低影响交通优势下路面多点沉降数据的自动快速获取和预警。

关键词: 机器视觉;路面沉降;智能监测;低影响交通监测;下穿路面监测

中图分类号: U415.54;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0068-05

Monitoring Technology for Pavement Settlement Based on Machine Vision

ZHANG Zujie

(Shanghai Municipal Highway Engineering Inspection Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: In response to the widespread demand for real-time safety monitoring of low-impact traffic pavement settlement in underground projects such as tunnels and pipelines that pass under expressways and urban roads in recent years, a non-contact intelligent monitoring technology based on machine vision is proposed. For this technology, a variable-focus dome camera (optical zoom 1 to 23 times) is taken as the core data acquisition equipment (DAE) to construct a complete monitoring system featuring automatic target recognition, coordinate transformation models, image processing workflows and “end-edge-cloud” collaborative architecture, which realizes the automatic extraction of target features from images with a resolution of 8 million pixels, and intelligently obtains the vertical displacement of the target (pavement). The monitoring accuracy and reliability of this technology are verified through indoor and outdoor experiments, which can achieve the automatic and rapid acquisition and early warning of multi-point settlement data on the pavements under the advantage of low-impact traffic.

Keywords: machine vision; pavement settlement; intelligent monitoring; low-impact traffic monitoring; underpass pavement monitoring

0 引言

随着地下空间开发建设的持续深入,隧道、管线等地下工程施工和运营中的雨污水管破损冲刷等引发的路面沉陷问题已成为威胁道路安全的重要风险^[1-2]。近年多地发生多起严重路面塌陷事故,凸显了路面监测与沉陷预警的紧迫性。特别是隧道、管线下穿既有高速公路、市政道路的盾构、顶管、定向钻等施工对基础地层的扰动导致的路面沉降问题日益突出^[3-4]。

路面安全监测是保障地下工程施工安全的重要

工作和信息化施工基础数据的重要来源^[5-6]。传统的监测方法如水准仪、全站仪人工测量和点式传感器监测难以满足大面积、全天候监测和快速预警、少干扰交通的需求,而基于机器视觉的自动化快速监测技术^[7-9],提供了低成本、低影响交通、高覆盖面、高效预警^[10-11]的智能化监测技术路径^[12-13]。

本文提出了一种基于机器视觉技术自动识别路面标识、自动测量分析路面沉降的监测方法。通过室内模拟试验与真实道路实验相结合的方式对该项技术进行了研发与验证。

1 原理

1.1 技术目标

监测系统的监控范围按三个车道的路幅区域

收稿日期: 2026-02-26

基金项目: 上海市国有资产监督管理委员会资助项目(2024016)

作者简介: 张祖杰(1983—),男,学士,高级工程师,从事工程检测、变形监测、测绘工程工作。

(宽 12 m, 长 50 m) 考虑, 沉降监测精度优于 0.6 mm, 测点布设密度可达到 3 m×3 m 网格或者更密集布设, 采样频率不少于 1 次/10 min。

1.2 机器视觉坐标系处理原理

在光学测量系统中, 坐标变换是实现三维空间点从世界坐标系映射至二维像素平面的核心过程。如图 1 所示, 该流程包含两个关键变换阶段: 世界(路面)坐标系→相机坐标系→像素坐标系。图 1 中明确标识了相机自身位姿 $(X_c, Y_c, Z_c, \alpha_c, \beta_c, \gamma_c)$ 和两个靶标的世界坐标 (X_{i1}, Y_{i1}, Z_{i1}) 与 (X_{i2}, Y_{i2}, Z_{i2}) , 并通过坐标系轴的特殊对应关系(x 与焦距 f 关联, y 与像素横轴 u 关联, z 与像素纵轴 v 关联)构建了非传统的投影模型(假设相机坐标系下的点, 即沿光轴的点投影到图像的正中心)。

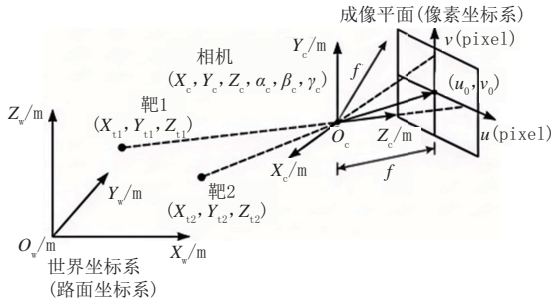


图 1 相机靶点与坐标系

世界坐标系→相机坐标系的变换通过外参矩阵 (Extrinsic Matrix) 实现, 该矩阵由旋转分量 $\vec{R}$ (3×3 旋转矩阵, 由相机欧拉角 $\alpha_c, \beta_c, \gamma_c$ 定义) 以及相机与灯靶的相对位置 $(X_{ii} - X_c, Y_{ii} - Y_c, Z_{ii} - Z_c)$ 定义, 从而构成:

$$\begin{bmatrix} x_{ii} - x_c \\ y_{ii} - y_c \\ z_{ii} - z_c \end{bmatrix} = \vec{R} \begin{bmatrix} X_{ii} - X_c \\ Y_{ii} - Y_c \\ Z_{ii} - Z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

相机坐标系→像素坐标系的转换通过相机内参矩阵 (Intrinsic Matrix) 实现。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -u \\ -v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ u_0 & f_u & 0 \\ v_0 & 0 & f_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ii} - x_c \\ y_{ii} - y_c \\ z_{ii} - z_c \end{bmatrix} / (x_{ii} - x_c) \quad (2)$$

其中: f_u/f_v 表示在图像坐标系 u/v (水平/竖直方向) 上将物理距离转换为像素数量的比例因子。它等于真实的物理焦距 F (mm) 除以相机传感器在 u/v 方向上单个像元 (像素) 的物理宽度 s (mm/pixel): $f = F/s$ 。 (u_0, v_0) 指投影中心点在图像像素坐标系中的坐标, 它标定了光轴 (主光线) 与成像平面的交点位置。

因此, 靶标图像与世界坐标, 即相机-靶 1/靶 2 的映射关系, 可通过以下非线性方程组表示:

$$\begin{cases} u = g_u(X_i, Y_i, Z_i, X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \beta, \gamma, f, k) \\ v = g_v(X_i, Y_i, Z_i, X_c, Y_c, Z_c, \alpha, \beta, \gamma, f, k) \end{cases} \quad (3)$$

通过非线性方程组的数值算法, 可使计算得到的图像坐标 u, v 与实际测量、设计值之间的残差最小, 最终反算出各靶标的三维坐标。而路面竖向位移值 (沉降或隆起) 就是当前计算值与初始测量之间的差: $Z_{ii} - Z_{i0}$ 。

1.3 设备概况

考虑摄像监测范围较大, 系统采用可变焦球机作为核心采集设备, 可实现 1~23 倍的光学变焦, 输出的 800 万分辨率图像信号与相机姿态信号通过交换机传输至边缘计算模块, 同时接收来自交换机的相位控制信号以实现动态调节。边缘计算模块依次执行畸变矫正、图像预处理、边缘检测及靶标特征提取四个处理流程, 最终将提取的特征数据与处理后的图像信号通过 4G 网络上传云端, 形成“端-边-云”协同的闭环处理架构。

处理分四个阶段: 首先通过多位置标定板图像 (类似 12×9 的棋盘格) 结合 OpenCV 4.5 解算径向畸变系数 (k_1, k_2, k_3) 与切向畸变系数 (p_1, p_2), 对摄像球机多焦距图像实施全域畸变校正以消除边缘形变。继而进行灰度化转换及高斯滤波预处理以抑制图中的微小噪声; 随后采用 Canny 算子^[14]实现靶标轮廓边缘检测; 最终通过连通域分析筛选圆形靶标区域, 经最小外接圆粗定位与亚像素细分技术提取高精度靶心坐标^[15]。

2 室内模拟试验

2.1 室内试验条件及内容

为模拟路面起伏对观测精度的影响, 采用靶片 (每片厚 0.6 mm) 模拟路面下穿凹陷、波浪起伏及中心凹陷现象。试验区域以地面为基准面, 长轴方向按不等间距布设 3×6 共 18 个靶位, 每个靶点初始放置 10 片靶片, 布置位置如图 2 所示。

(1) 路面下穿凹陷: 模拟地下工程引起路面下沉, 形成“U”型凹槽。中间序列靶片 (第 3~4 排向第 2/5 排过渡) 阶梯式下沉, 两侧靶片保持初始高度, 模拟道路横向结构性塌陷。参考点初始靶片数为 10 片, 数据序列显示中间点 (如靶点 4-6#、7-9#) 片数递减 (从 9 片降至 1 片), 而两侧点 (靶点 1-3#、16-18#) 始终维持 10 片, 形成深度渐变凹陷。

(2) 路面波浪起伏: 沿观测方向构建动态波形,

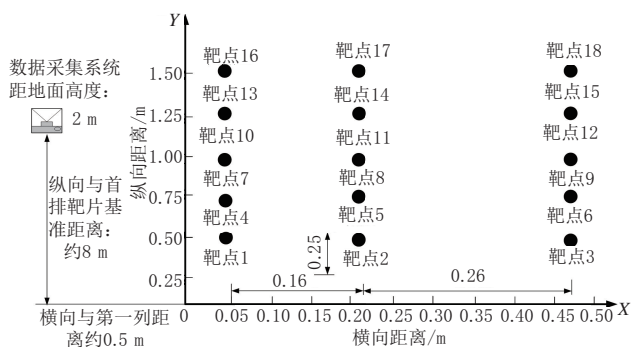


图2 测试相机拍摄圆靶俯视示意图(12倍率)

前排靶片下沉模拟波谷,后排抬升模拟波峰,中排过渡形成平滑起伏曲线。调节7个关键靶片高度,生成类正弦波地貌。参考点初始为10片,波谷区(如靶点4-6#)片数递减(从8片降至1片),波峰区(靶点13-15#)片数递增(从12片升至19片),两侧点(靶点1-3#、16-18#)保持稳定。

(3)中心凹陷模拟:以第3/4排中间点(靶点5、8#、11#、14#)抽离靶片,模拟局部凹陷向周边梯度扩散,形成中间低、四周高地形。参考点初始为10片,数据序列显示:中心点(如靶点8#、11#)片数锐减(从9片降至1片),邻近点(靶点4-6#、10#、12#)次低(从9片降至2片),外围点(靶点1-3#、7#、9#、13#、15-18#)维持不变。

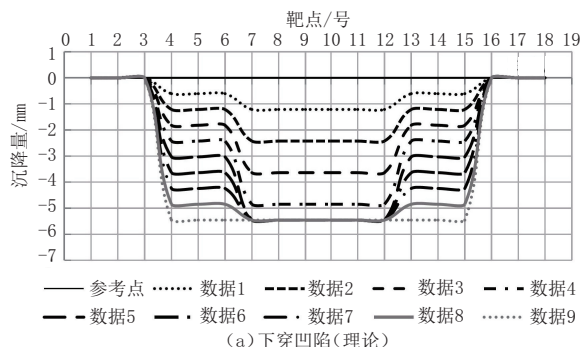
2.2 室内试验结果分析

(1)下穿凹陷模拟:对比图3(b)的实测值与图3(a)的理论值曲线趋势基本一致,但在局部表现较大差异。比如其在凹陷边缘区域出现非对称起伏(如靶点4#、7#),反映靶片不均匀性以及人工堆叠中对原靶点位置的微小偏离,平均误差在0.18 mm。

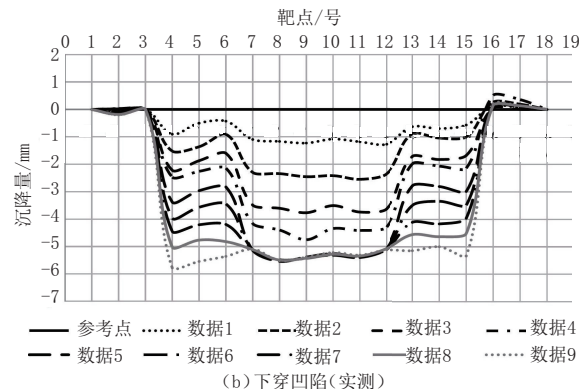
(2)路面波浪起伏:图4(b)的实测与图4(a)图的理论波浪起伏形态相似,整体偏差平均值在0.20 mm。图中峰值与谷值位置大致对应,说明模型能捕捉薄片堆叠的宏观厚度变化规律。其次实测曲线在细节上呈现的偏离,可能源于环境光干扰、靶片边缘识别误差等因素。

(3)路面中心凹陷:图5(a)与5(b)趋势相近反映当前视觉监测模型算法能够较好地反映中心凹陷的变化特征(偏差平均值在0.24 mm)。然而,实测数据在部分区域存在较大波动,位移偏差相对较大,表明实际检测仍受环境干扰、靶片识别误差或模型局限性的影响。

通过18个靶点的阶梯式位移模拟下沉凹陷、波浪起伏、中心凹陷三类典型路面变形的实际工况,三类模拟平均偏差分别为0.179、0.196、0.241 mm,均

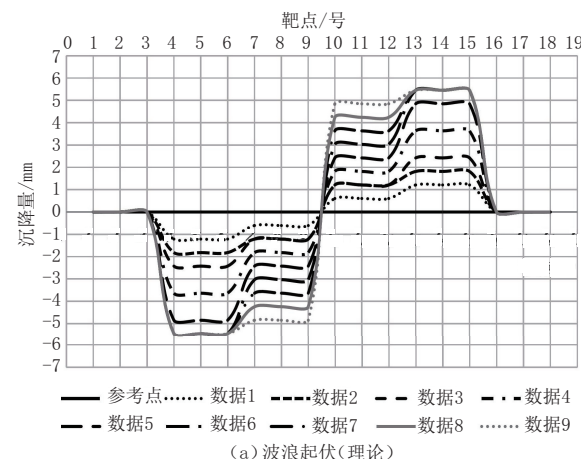


(a)下穿凹陷(理论)

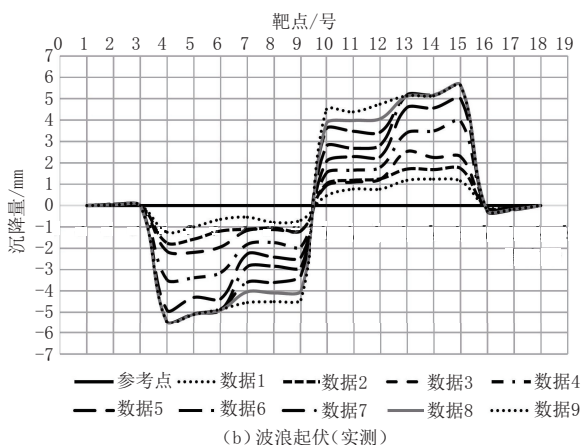


(b)下穿凹陷(实测)

图3 模拟下穿路面凹陷下沉



(a)波浪起伏(理论)



(b)波浪起伏(实测)

图4 模拟路面波浪起伏

小于单靶片厚度的50%,实测竖向变形曲线变化与理论值吻合度较高,软件系统再优化环境干扰、靶片识别等误差后可满足该类工程监测的基本需求。

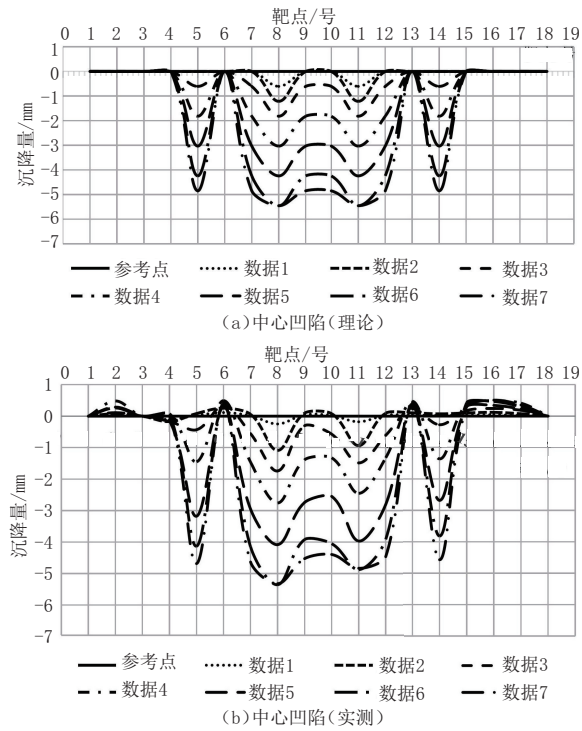


图5 模拟路面中心凹陷

3 道路实地验证

3.1 道路实验条件及内容

3.1.1 实验场地

选取某市政道路混凝土路面(下方 22 m 深处存在地铁盾构施工,监测工况为工后 1 个月)作为实验场地,实验路面范围长 51 m,宽 8 m。

3.1.2 监测系统硬件配置

监测摄像机设备高 5 m,设置在路边稳固位置,核心监测区域第一排靶点纵向距相机 17 m。系统图像采集模块配 800 万像素球机,支持 1~23 倍光学变焦,具备水平 360°/垂直-15°~90°方向调整,提供分辨率 3 840×2 160@25fps (4K 高清)的拍照性能,实现最低照度彩色 0.005 Lux/黑白 0.001 Lux 的暗光拍摄,搭载红外光源可实现夜间 150 m 距离的红外补光,日间使用可见光模式,夜间切换至红外光模式,数据异常时自动拍摄现场照片回传系统。

3.1.3 靶标布置与坐标系定义

实验区共布设 36 个靶点(2×18,纵、横间距 3 m),以相机为原点建立三维直角坐标系,如图 6 所示。

靶标由红外高反射材料(白色地面漆+玻璃微珠)制成,直径 20 cm,确保日夜可见性。初始喷涂后,实测发现斜向拍摄时边缘稳定性不足,故增设黑色外轮廓框(纵向延伸设计),显著提升边缘对比度和可识别性。

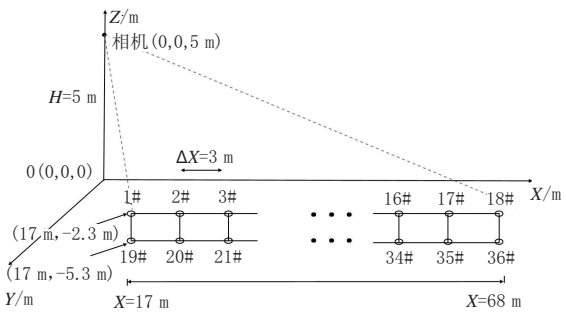


图6 现场靶点网格化布局与坐标系

3.1.4 监拍方案

靶标监拍采用多相机协同和双模式成像,耦合方案。通过对变焦监控相机巡查点的设置,相机每隔 10 min 对监拍区域进行扫描,这等于部署了 3 台不同焦距的相机(4 倍、6 倍、12 倍)实现 51 m 区域全覆盖(距相机 17 ~ 68 m 区域)。4 倍率相机覆盖前段(靶点 1#~12#, 15 m),6 倍率覆盖中段(靶点 9#~22#, 18 m),12 倍率覆盖后段(靶点 19#~36#, 24 m)。各视场设置 3~4 个重叠靶点(如 9#~12#靶)进行坐标系标定,消除盲区并通过逻辑关联无缝衔接(见图 7)。



图7 现场靶标布置

实验 30 d 覆盖了晴、雨、阴天多种天气和日夜不同光照条件,气温日均上升约 10 °C,设置系统每 10 min 采集一次数据,设靶点 1、2、36 为基准参考点,通过光学坐标修正相机参数(RMSE<0.3)。扫描到有车辆遮挡或者其他异常时,后台程序自动拍摄现场照片上传系统供人工核验,对遮挡或者光学异常导致的数据不予计算,然后对 1 h 内的数据予以平均,以减少相关干扰所带来的波动。

3.2 现场实验数据处理

3.2.1 图像处理

对采集到的图片,结合畸变校正与靶标识别实现对靶心的亚像素提取。畸变校正:采用高精度棋盘格标定板,从多角度拍摄 15 张样本,通过 OpenCV 库计算径向(k_1/k_2)与切向(p_1/p_2)畸变系数,输出无失真图像。靶标识别:预处理包括灰度化与高斯滤波,通过连通域分析筛选圆形靶标,Canny 边缘检测提取

轮廓^[14-15],最终亚像素细分定位靶心 (x_0, y_0) 。

3.2.2 数据分析

从30 d的试验监控结果看,25#、26#靶点位移与最低温度出现同步上移现象,位移幅度为0.5~1.2 mm。结合同期气象记录分析,有可能受温度上升的影响。最低温15℃到23℃稳步上升,导致路面混凝土板的上拱(如图8、9)。其余测点平稳正常,与现场路面人工精密水准仪测量的沉降数据偏差小于0.5 mm。

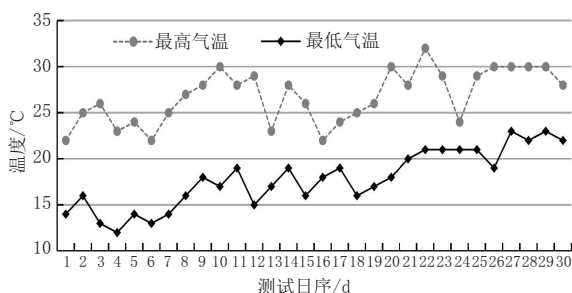


图8 测试过程温度

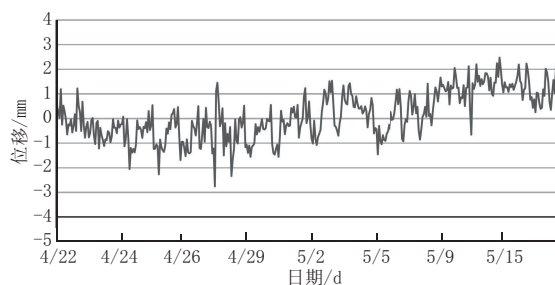


图9 26#靶过程位移变化

3.3 现场实验结果分析

基于机器视觉的路面沉降智能监测系统利用多视角相机阵列(4倍、6倍、12倍变焦协同)对51 m范围内道路区域实现连续长期全覆盖监测,结合优化后的高对比度靶标(增设黑色轮廓提升边缘鲁棒性)和亚像素级靶心提取技术,成功捕捉到亚毫米级位移变化。

数据分析表明,该系统通过每小时平均化处理有效抑制了车辆遮挡干扰,三维坐标解算精度达 $RMSE < 0.3$,验证了光学测量模型(基于旋转矩阵 R 与相机内参矩阵 K 的非线性优化)智能感知监测技术在实际路面沉降自动监测工作中的可行性和可靠性。

4 结 语

为解决隧道、管线等地下工程下穿既有高速公路、市政道路等涉路工程的路面安全监测需求,本文研究的基于机器视觉的路面沉降智能监测技术成果总结如下:

(1)试验室内模拟路面下穿凹陷、波浪起伏、中心凹陷等典型路面变形工况,实测竖向变形与理论值吻合度较高。通过优化硬件配置和系统软件算法,本研究成果解决了目标自动精准识别、智能排除环境干扰和去噪解算等实际应用问题,并在道路现场更大监测范围进行实况验证,效果良好。

(2)本技术使用喷涂式无源标靶进行非接触智能测量,所采用的工业相机等硬件为市场通用低成本设备,结合开发的配套软件系统,是可复用的高效智能装备,相较于激光雷达、无人机摄影测量等具有低成本推广应用的優勢。

(3)相较于传统的水准仪、全站仪等人工监测技术,本技术具有不中断交通且能全天候、高密度、实时监测的技术优势。

(4)智能全站仪、静力水准仪等传统自动化监测技术难以实现的测点高效布设、密集覆盖行车路面、区域精准预警、预警区域复查、低影响交通等应用目标,本研究成果可轻松实现。

参考文献:

- [1] 时刚,王宇斌,武天仪,等.交通荷载下城市路面塌陷问题的试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1202-1209.
- [2] 邓海纯,廖小平,陈敏.下穿城市快速路顶管施工与路面沉降变形分析[J].施工技术,2023,52(15):94-98.
- [3] 宋二祥,徐明,吴志轩,等.某盾构施工岩溶场地地面塌陷机理和数值分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(6):1874-1880.
- [4] 张成平,岳跃敬,王梦恕.隧道施工扰动下管线渗漏水对地面塌陷的影响及控制[J].土木工程学报,2015,48(增刊1):351-356.
- [5] 陈择慧.静态和动态荷载双重作用下的路面沉降分层监测分析[J].工程力学,2024,41(5):163-168.
- [6] 马宪永.随机荷载作用下沥青路面力学响应理论求解与监测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [7] 张广军.视觉测量[M].北京:科学出版社,2008:33-41.
- [8] 肖和华,金鼎沸.基于机器视觉的路基沉降监测方法研究[J].交通运输工程学报,2015,15(6):1365-1368.
- [9] 史磊.基于CCD图像分析的路基沉降测量系统的开发[J].山西电子技术,2013(3):23-25.
- [10] 邢敬宏,张明新,赵浪涛,等.基于嵌入式机器视觉的路基沉降监测系统研究[J].自动化与仪器仪表,2013(4):28-29;32.
- [11] 杨化奎,温巍.基于机器视觉的巷道变形实时监测与预警系统设计[J].煤炭技术,2021,40(12):219-221.
- [12] 唐咸燕.机器视觉在邻近铁路营业线变形监测中的应用[J].山西建筑,2023,49(12):145-147.
- [13] 陈登伟,郭双喜,朱旻,等.机器视觉技术在地下交通枢纽施工变形监测中的应用[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3827-3836.
- [14] 朱晨宇,吉彦锦.基于Canny算子的图像边缘检测及优化[J].Pure Mathematics,2024,14(5):130-139.
- [15] 张铤,孙宇,林清河,等.基于自适应阈值Canny边缘检测的Shi-Tomasi角点检测方法[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(10):36-43.