

视觉定位技术在基坑实时监测中的应用研究

刘广庆 刘和鑫

湖南省核地质调查所, 湖南 长沙 410000

[摘要] 本文首先分析基坑监测核心需求与常规监测痛点, 阐述视觉定位技术的优势及适配性; 其次选型适配的视觉定位技术路线, 优化相机标定、坐标系转换及特征点提取算法, 实现基坑水平位移、竖向沉降等核心指标的实时解算; 随后通过现场实测试验, 将视觉定位监测数据与全站仪、水准仪实测数据进行对比, 验证该技术的测量精度及可靠性; 最后梳理误差来源并提出优化措施, 形成可工程化应用的视觉定位基坑实时监测流程。研究结果表明, 视觉定位技术可有效弥补常规监测实时性不足的短板, 测量精度满足监测要求, 能够实现基坑全域、非接触、实时监测, 为基坑工程自动化监测提供技术支撑, 具有重要的工程应用价值与学术意义。

[关键词] 视觉定位; 基坑实时监测; 现场对比试验; 位移解算; 精度验证; 优化措施

DOI: 10.64635/ja.2026.1406

中图分类号: TU753

文献标识码: A

Research on the Application of Visual Positioning Technology in Real-Time Foundation Pit Monitoring

Liu Guangqing, Liu Hexin

Hunan Institute of Nuclear Geological Survey, Changsha, Hunan 410000, China

Abstract: This paper first analyzes the core requirements of foundation pit monitoring and the pain points of conventional monitoring, and expounds the advantages and applicability of visual positioning technology. It then selects an appropriate visual positioning technical route, optimizes camera calibration, coordinate system transformation, and feature point extraction algorithms, and realizes real-time calculation of core indicators such as horizontal displacement and vertical settlement of foundation pits. Subsequently, through field measurement tests, the monitoring data obtained by visual positioning are compared with measured data from total stations and levels to verify the measurement accuracy and reliability of the technology. Finally, the sources of error are summarized, and optimization measures are proposed to form an engineering-applicable real-time foundation pit monitoring process based on visual positioning. The results show that visual positioning technology can effectively compensate for the insufficient real-time performance of conventional monitoring. Its measurement accuracy meets monitoring requirements, and it can realize full-area, non-contact, real-time monitoring of foundation pits, providing technical support for automated monitoring of foundation pit engineering and demonstrating important engineering application value and academic significance..

Keywords: visual positioning; real-time foundation pit monitoring; field comparison test; displacement calculation; accuracy verification; optimization measures

1 引言

1.1 研究背景

作为地理信息测绘工作者, 长期在一线参与基坑监测实践, 发现基坑施工过程中的安全, 直接关系到基坑本体安全、施工人员安全, 以及周边建(构)筑物、地下管线的正常使用。当前我国基坑监测仍以传统测绘手段为主, 虽技术成熟、精度可控, 但在实际应用中存在诸多难以解决的痛点, 见下图 1。

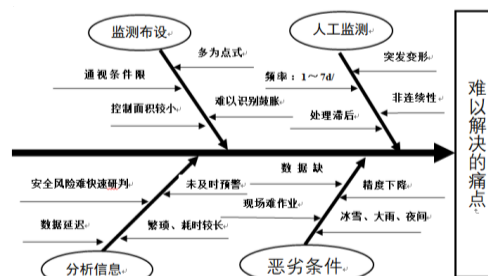


图 1 难以解决的痛点

随着计算机视觉、图像识别、近景摄影测量等技术的快速发展，视觉定位技术凭借非接触、全域覆盖、实时解算、操作便捷、成本可控等优势，数字图像相关方法(DIC)测量方法，见图 2，逐渐应用于变形监测领域，为解决基坑实时监测难题提供了可行路径。

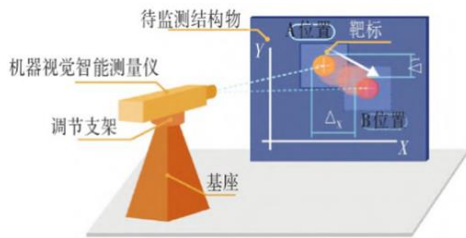


图 2 数字图像相关方法 (DIC 测量/测试系统)

1.2 研究意义

本研究可实现基坑核心变形指标的全天候、实时监测，大幅提升基坑变形预警的时效性，及时发现安全隐患并发出预警，降低基坑坍塌、周边建筑物开裂等安全事故的发生概率，保障工程施工安全与周边环境安全；同时，减少人工现场作业强度，降低测绘人员现场作业风险，提高基坑监测效率，节约监测人力成本。弥补传统点式监测的不足，构建“面状+点式”融合的基坑监测体系，实现基坑全域变形的实时捕捉、全面监控。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文围绕视觉定位技术在基坑实时监测中的应用展开，结合测绘专业优势，具体研究内容如表 1：

表 1 视觉定位技术研究内容

序号	研究方向	研究要点	研究方法	解决问题
1	坑变形控制指标与视觉监测适配性分析	依据基坑安全等级划定水平、竖向变形允许误差标准	分析粉尘、光照、施工振动等现场干扰对视测量精度的影响	梳理技术落地难点
2	双目视觉监测方案与图像处理算法优化	选取适配基坑大范围监测的双目视觉架构，完善棋盘格相机标定流程	优化 ORB 特征提取、立体匹配算法，建立像素坐标至施工坐标系转换模型	实现变形量实时动态解算
3	现场对比监测试验设计	设计现场实测试验	同步采用精密全站仪、水准仪开展对照观测	评定视觉定位技术的测量精度、稳定性，分析误差来源
4	工程应用优化方案构建	针对误差来源提出优化措施	结合实际基坑工程案例	验证整套监测方案的实用性

1.3.2 技术路线

本文采用“调研分析—方案设计—算法优化—试验验证—方案完善”的技术路线。

1.4 研究创新点

结合测绘专业优势，有 3 个研究创新点，见下图 3。

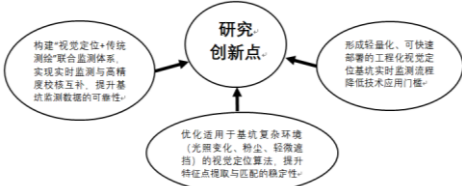


图 3 研究创新点

2 相关理论与技术基础

2.1 基坑监测相关理论

2.1.1 基坑变形监测指标

根据基坑安全等级确定变形监测精度，一级基坑按二等变形精度控制要求：水平位移小于±3.0mm，竖向沉降点小于±0.5mm，进行模拟和现实工程试验。

2.2 视觉定位技术基础

2.2.1 视觉定位技术分类与原理

视觉定位技术主要分为单目视觉、双目立体视觉、多目视觉三类，其中双目立体视觉凭借精度高、可实现三维定位的优势，适配基坑全域监测需求。其核心原理是通过两台相机从不同角度拍摄基坑监测区域，获取目标测点的二维图像，通过相机标定获取相机内外部参数，利用立体匹配算法计算测点的三维坐标，进而解算测点的位移变化量，实现实时监测。见图 4、图 5

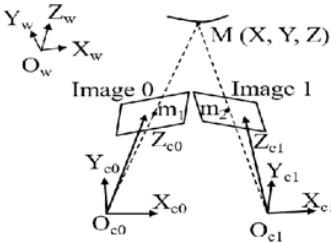


图 4 三维定位数字图像相关测量原理



图 5 三维定位数字图像相关测量装置

2.2.2 核心技术环节

1. 相机标定：利用标准棋盘格标定板采集多组图像，求解相机焦距、主点坐标、径向/切向畸变系数等内部参数，同时确定两台相机之间空间位置关系，消除镜头畸变带来的坐标计算偏差，为像素坐标转工程坐标提供基础参数。

2. 特征点提取与匹配：采用 ORB 算法提取图像中稳定性较强的角点、人工靶标特征，通过特征描述子完成跨帧、左右相机图像同名点匹配；保障坐标解算精度。常规使用的标定图案，见图 6。

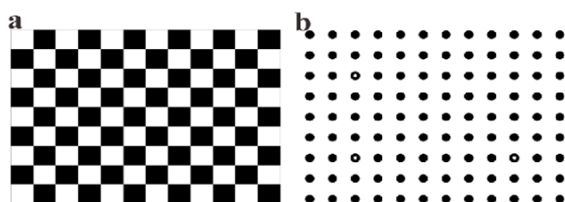


图 6 常规使用的标定图案

(a) 棋盘格标定图案；(b) 圆点标定图案

3. 坐标转换：搭建三级坐标转换体系：一、像素坐标系（图像像素行列坐标）；二、图像归一化坐标系（消除像素尺寸影响）；三、基坑施工独立坐标系（工程现场实际平面、高程基准），通过坐标转换矩阵将图像二维信息换算为现场可直接使用的三维变形数据。

2.3 数字图像相关法（DIC）基础

数字图像相关法（DIC）是一种非接触式面位移测量方法，通过对比不同时刻的监测图像，计算图像中每个像素点的位移变化，实现基坑全域面状位移场监测。该方法与视觉定位技术结合，实现“点+面”一体化监测。

3 基坑视觉定位监测方案设计

3.1 监测方案设计原则

遵循变形测量精度满足规范要求；数据实时输出、支持动态分级预警；设备、算法适配工地复杂工况；硬件采购、现场布置、后期运维综合成本可控。

3.2 监测设备选型与布置

3.2.1 设备选型

结合基坑监测精度要求与现场环境，选型如下设备：

1. 工业黑白相机：分辨率不低于 500 万像素，输出帧率 $\geq 30\text{fps}$ ，保障快速捕捉微小变形；

2. 定焦工业镜头：焦距 5~16 mm 按需选配，抑制广角镜头边缘畸变；

3. 高强度防抖支架：金属加厚支架搭配膨胀螺栓固定，减弱施工机械振动对相机姿态的干扰；

4. 防水 LED 补光设备：适配夜间、阴天低光照工况，

保证图像特征清晰可识别；

5. 无线 4G/5G 传输模块：现场图像、解算位移数据实时上传云端后台，支持远程在线查看变形曲线。

根据基坑形状大小、监测范围，采用多台双目相机组合布设方式：将相机支架固定在基坑 3 倍范围之外稳定区域，确保相机视野能够覆盖整个基坑监测区域，无明显遮挡；相邻相机视野重叠率不低于 30%；相机安装高度一般为 20~70m。同时，在相机附近布设基准编码靶标，每次测量前进行校正。监测区域布设人工编码靶标，布设密度根据基坑安全等级确定，一级基坑每 10m 布设 1 个，二级、三级基坑每 15m 布设 1 个，并按基坑分层垂直布设，确保控制基坑侧壁的变形，扩大监控范围。

3.3 坐标系建立

结合测绘专业控制测量理论，建立三类坐标系：一是相机像素坐标系，以相机图像左上角为原点，x 轴水平向右，y 轴垂直向下；二是图像坐标系，将像素坐标系转换为以图像中心为原点的直角坐标系；三是基坑施工坐标系，以基坑某一固定基准点为原点，x 轴平行于基坑长边，y 轴垂直于基坑长边，z 轴垂直于水平面，用于表示测点的工程实际坐标。

3.4 监测流程设计

基坑视觉定位实时监测流程主要包括 5 个全自动化环节。



图 7 全自动化环节

4 图像处理算法优化与监测系统搭建

4.1 图像算法优化改进

4.1.1 改进 ORB 特征匹配算法

针对工地光照突变、粉尘遮挡造成特征点匹配失效问题，在特征提取前增加灰度对比度增强预处理；设置自适应阈值筛选有效特征点，过滤背景无效噪点；匹配完成后引入 RANSAC 算法剔除偏离主趋势的错误匹配对，优化后特征匹配有效率提升至 93% 以上。

4.1.2 卡尔曼时序滤波降噪

受施工振动、噪音干扰，瞬时位移数据存在小幅随机波动，引入卡尔曼滤波对连续时序变形数据平滑处理，过滤随机噪声，提升变形曲线连续性。

4.2 软硬件系统搭建

硬件系统由图像采集单元、无线传输单元、云端数据处理单元、声光预警单元组成；软件基于 Python+OpenCV

完成图像特征提取、匹配运算，结合 Matlab 开展误差分析与位移解算，配套可视化操作界面，可实时展示支护变形云图、测点位移时序曲线。

5 试验设计与精度验证

5.1 试验目的

通过现场实测试验，对比视觉定位与全站仪、水准仪等常规监测手段的监测结果，分析误差来源。

5.2 现场实测试验

5.2.1 试验工程概况

选取某城市高层建筑深基坑（边坡）工程作为试验场地，该场地安全等级为一级，基坑周边 3~10m 范围内有居民楼、道路与地下管线，深度 14~30m，支护形式为桩锚+内支撑。监测范围包括基坑（边坡）支护结构水平位移、竖向位移及周边房屋沉降；试验区域地质条件为粉质黏土、中粗砂、强风化泥质粉砂岩，现场存在施工粉尘、光照变化等干扰因素。

5.2.2 试验布置

在基坑周边已有建筑物楼上稳定区域，布设 2 组工业相机，覆盖整个监测区域，布设 10 个编码靶标测点；采用全站仪、水准仪作为对比设备，在同一编码靶标测点同步开展监测。见图 8、图 9。



图 8 安装工业相机



图 9 现场安装靶标

5.2.3 试验过程

1.设备安装与标定：完成相机、支架、补光装置的安装，进行相机标定；安装全站仪、水准仪，建立监测控制网；

2.同步监测：视觉定位系统实时采集图像、解算监测数据，全站仪、水准仪每 1 小时开展一次人工观测，连续监测 7 天；

3.数据记录与对比：记录视觉定位与常规监测的所有数据，对比分析两者的一致性、测量误差，评估视觉定位技术在复杂现场环境下的稳定性。

5.2.4 试验结果与分析

现场实测试验结果显示，视觉定位技术的水平位移测量平均误差为 $\pm 2.2\text{mm}$ ，竖向沉降测量平均误差为 $\pm 0.33\text{mm}$ ，满足二等变形监测精度要求；与全站仪、水准

仪监测数据的偏差较小，最大偏差分别不超过 0.60mm 和 0.15mm，相关系数达到 0.95 以上。在现场粉尘、光照变化等复杂环境下，视觉定位系统能够稳定运行，特征点匹配准确率保持在 91%以上，无数据中断现象，说明视觉定位技术能够适配基坑现场复杂环境，稳定性良好。

5.3 误差来源与抑制方案

5.3.1 主要误差诱因

1.相机标定误差：标定图像组数不足、标定板摆放角度单一，导致内外参数求解存在偏差，传递至坐标转换环节；

2.现场环境干扰：光照强弱变化、空气中粉尘遮挡、施工机械振动，降低图像清晰度，产生特征匹配误差；

3.设备安装误差：支架固定不牢固、相机安装角度偏移，造成成像视角持续漂移。

5.3.2 误差控制优化措施

1.标准化标定流程：多角度、多距离采集 20 组以上标定图像，取多组参数平均值降低标定偏差；

2.环境适配改造：相机加装防尘外壳、减震垫片，配套可调亮度 LED 补光灯，弱化昼夜光照差异、粉尘对图像质量的干扰；

3.安装精度管控：采用水平仪校准相机安装姿态，膨胀螺栓加固支架，减少施工振动带来的机位偏移。

6 结论与展望

6.1 主要研究结论

1.视觉定位技术适配深基坑变形监测场景，可连续输出支护结构水平、竖向变形数据，实现支护侧壁全域无接触动态监测，有效弥补传统人工点监测数据滞后、覆盖范围有限的短板；

2.搭建的双目视觉自动化监测系统集成校正、采集、解算、预警全流程，形成标准化现场实施流程，可适配不同规模、不同安全等级基坑工程；

3.现场对照试验证明，视觉监测数据与全站仪、水准仪测量结果一致性良好，两套监测手段可互相校核，为基坑施工安全动态管控提供可靠数据支撑。

6.2 研究不足与未来研究方向

6.2.1 现有研究局限

1.极端工况适配性有待提升：基坑出现大面积遮挡、强机械振动、持续暴雨天气时，图像成像质量下降，测量稳定性会受到一定影响；

2.视觉面位移场与传统离散测点数据融合分析模型较为简单，未形成成熟分级预警算法；

3.整套监测设备体积偏大，快速轻量化部署仍有优化

空间。

6.2.2 后续研究方向

1.开展多源监测数据融合算法研究,构建视觉全场位移、全站仪单点变形联合预警模型,提升基坑变形风险识别准确度;

2.推进监测设备小型化、集成化开发,简化安装标定操作,降低设备采购与现场部署成本,推动技术大范围普及;

3.结合智慧工地 BIM、物联网平台,将视觉监测变形数据接入数字化管控平台,实现基坑设计、施工、监测全流程数字化协同管理,推动岩土监测智能化升级。

[参考文献]

[1](GB 50497-2019)建筑基坑工程监测技术标准[S].中华人民共和国住房和城乡建设部,北京:中国建筑工业出版社,2019.

[2]李清泉,杨必胜.视觉测量与应用[M].北京:科学出版

社,2018.

[3]邵新星.高精度.实时数字图像相关变形测量[D].导师:何小元.东南大学,2018.

[4]王雪帆.数字图像相关技术在结构变形测量中的应用研究[J].广东土木与建筑,2022,29(12):17-21.

作者简介:刘广庆(1967—),男,汉族,湖南长沙人,本科,高级工程师,主持多项城市复杂环境的深大基坑、高边坡、周边建构筑物安全监测项目,主要研究精密工程测量、多源自动化监测设备集成、监测数据变形预警分析,擅长基坑(边坡)及周边环境变形监测数据分析及安全风险判断预警。研究方向:基坑(边坡)及周边环境变形监测及风险预警。刘和鑫(1992—),男,汉族,湖南长沙人,本科,副高,从事工程质量检测、地质灾害治理工程施工质量检测、岩土工程勘察、水文地质勘查、地质灾害危险性评估、基坑监测、支护施工等工作。