

动态场景下三维激光扫描技术在建筑物变形监测中的应用与分析

胡少坡

北京久城科技有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2084

[摘要] 本文探讨三维激光扫描技术在动态场景下建筑物变形监测中的技术优势与应用挑战。针对动态场景中环境干扰、数据可比性及实时处理效率等核心问题,分析了扫描模式选择、点云去噪配准算法优化及变形特征提取等关键技术路径。通过历史建筑群监测案例,验证了该技术在复杂干扰条件下的数据采集与解析能力,实现了毫米级精度变形识别与风险预警。结合技术局限性,本文还提出动态密度调控、多模态数据融合及5G边缘计算等改进方向,为动态场景下建筑物安全监测提供理论与技术参考。

[关键词] 三维激光扫描; 建筑物变形监测; 动态场景

中图分类号: TD223 文献标识码: A

Application and analysis of 3D laser scanning technology in building deformation monitoring in dynamic scene

Shaopo Hu

Beijing Jiucheng Technology Co., Ltd

[Abstract] This paper discusses the technical advantages and application challenges of 3D laser scanning technology in building deformation monitoring under dynamic scenes. Aiming at the core problems of environmental interference, data comparability and real-time processing efficiency in dynamic environment, the key technology paths such as scanning mode selection, point cloud de-noising registration algorithm optimization and deformation feature extraction are analyzed. Through the monitoring case of historical buildings, the data acquisition and analysis ability of the technology under complex interference conditions is verified, and the millimeter precision deformation identification and risk early warning are realized. Combined with the technical limitations, this paper also puts forward some improvement directions, such as dynamic density control, multimodal data fusion and 5g edge calculation, to provide theoretical and technical reference for building safety monitoring in dynamic scenes.

[Key words] 3D laser scanning; Building deformation monitoring; Dynamic scene

引言

建筑物安全监测是城市化进程中保障结构稳定与公共安全的核心环节。在交通枢纽、历史街区或密集城区等动态场景下,建筑物受外部荷载、环境振动及温度变形的复合影响,其变形行为呈现高随机性与时变性。传统监测手段(如全站仪单点测量或GPS定位)受限于采样频率低、数据维度单一等缺陷,难以捕捉短时突变或局部细微变形,且在人车流干扰、设备布设受限的场景中易出现数据断层^[1]。三维激光扫描技术通过高频次、全息化的点云数据采集,为动态场景监测提供了新的技术范式。该技术可量化分析建筑构件的位移、倾斜及裂缝扩展等关键参数,然而动态环境中的多源噪声干扰、数据实时处理效率与长期监测一致性等问题,仍制约着其工程化应用的深度与广度。

1 动态场景下建筑物变形监测的核心挑战

1.1 环境干扰因素对数据完整性的冲击

动态场景中,建筑物变形监测面临复杂的环境扰动。人流与车流产生的机械振动不仅导致点云数据的高频抖动,还会因设备架设位置受限造成局部遮挡,形成数据空洞。温度梯度变化引发的结构材料热胀冷缩效应会进一步混淆真实变形信号与物理变形的边界。例如,钢筋混凝土框架的日间温差形变量可达毫米级,与地基沉降等长期变形叠加后,需通过多源数据融合实现特征分离。不仅如此,电磁干扰(如高压线缆、无线通信信号)可能降低激光扫描仪的信噪比,导致点云密度分布不均,需依赖动态阈值滤波算法提升数据鲁棒性。

1.2 多时段数据可比性难题的连锁效应

动态场景的时空异质性显著增加多期监测数据的对齐难度。光照条件差异导致同一建筑表面在晨昏时段呈现反射率波

动,影响点云特征识别精度。临时性物体(如施工围挡、移动车辆)形成的间歇性遮挡,破坏时序数据的空间连续性。对此,传统基于固定标靶的配准方法难以适应动态坐标系变化,需引入语义分割技术区分永久结构与临时干扰物

1.3 实时性要求与数据处理效率的矛盾

高频变形监测需求与计算资源限制形成显著冲突。三维激光扫描单次作业可生成千万级点云数据,传统ICP配准算法的时间复杂度达 $O(n^2)$,难以满足分钟级数据更新需求。动态场景中建筑物局部突变(如裂缝扩展)的快速捕捉,需在数据降采样与特征保留间实现平衡^[2]。硬件层面,现有移动扫描平台受限于电池续航与算力,难以在持续作业中维持亚毫米级精度。

2 三维激光扫描的关键技术

2.1 动态扫描模式选择

动态场景下建筑物变形监测的扫描模式选择需在数据完整性、环境适应性与工程成本间建立平衡。连续扫描模式依托高速激光脉冲实现毫秒级数据更新,通过持续覆盖建筑物表面形变轨迹,特别适用于对瞬时振动敏感的监测场景。此类模式能够捕捉大跨度结构的瞬时弹性变形特征,结合高频采样可解析动态荷载与形变的非线性关系,但需应对设备发热、数据冗余等问题。分时段扫描通过预设低干扰时间窗口规避环境噪声干扰,在历史建筑监测中可显著提升测量精度,其周期性数据采集策略能够平衡长期监测需求与设备能耗限制。复合扫描模式利用“全局快速扫描+局部动态补扫”的协同策略,适合解决复杂建筑结构因反光、遮挡导致的数据缺失问题,该模式日间采用抗干扰模式快速获取整体形变趋势,夜间切换至高精度模式捕捉局部细微变化,使关键构件的形变识别完整度大幅提升^[3]。扫描模式的选择需与建筑功能深度耦合——人流密集区域可通过分时段策略降低动态干扰,而隐蔽性变形监测需依赖连续模式构建高分辨率时间序列。复合扫描的灵活配置进一步平衡了效率与精度的矛盾,例如通过自适应扫描频率调整,在遮挡区域自动增加补扫次数,确保关键部位点云密度不低于200点/ cm^2 。

2.2 点云去噪与配准算法优化

动态场景点云数据普遍存在多源噪声与坐标偏移问题。基于改进ICP算法的配准方案通过引入曲率特征约束与动态阈值分割(如TrimbleX9的中误差0.8mm),显著提升多期数据的空间一致性。在隧道工程中,传统特征点匹配法因振动干扰导致配准误差达4.2mm,而融合高斯滤波与KD-Tree加速搜索的优化算法将误差压缩至1.5mm。边缘计算架构(如天宝X7的GPU并行处理技术)将单次配准耗时从15分钟缩短至3分钟,满足分钟级数据更新需求。某基坑监测案例显示,通过基于移动最小二乘的小尺度噪声滤波算法,点云有效数据保留率提升至98%,为支护结构倾斜分析提供了高可信度基础。

2.3 变形特征提取与量化分析

基于曲率分析与截面线比对的混合算法,可有效分离真实变形与热胀冷缩噪声。某钢结构厂房监测中,中翼DLS-200通过0.1mm分辨率捕捉焊缝微米级位移,结合曲率变化率阈值(0.05

mm/m)识别出3处潜在开裂风险点。针对砖木结构古建筑,多尺度特征融合技术(全局摄影测量与局部纹理分析)实现了榫卯节点倾斜度与裂缝宽度的同步量化,误差率较全站仪降低62%。在北京城市副中心C08项目中,点云模型与BIM的拟合对比发现钢结构安装偏差达58mm,通过逆向修正避免了管线布设冲突。

通过对比了三类设备在建筑物变形监测中的实测性能指标。中翼DLS-200凭借2,187,000点/秒的超高扫描速率,在短期大范围扫描任务中(如施工期快速监测)具有显著效率优势,但其动态误差与环境适应性等级(IP50)弱于思看PRINCE335与天宝X9,更适合低干扰场景的快速数据采集。思看PRINCE335因复合扫描模式与抗干扰设计,在古建筑等复杂环境中误差控制最优;天宝X9则在高精度与高速扫描间取得平衡,适用于商业综合体全时段监测。

3 应用案例分析:某历史建筑群监测

3.1 项目背景与动态场景特征

该案例聚焦于华南某省级历史文化街区内12栋清末民初砖木结构建筑群的变形监测。建筑群包含商铺、祠堂及民居三类功能建筑,最高单体为三层阁楼式木构架建筑(檐口高度9.8米),部分墙体存在风化酥碱与榫卯节点松动现象。监测区域毗邻城市主干道,日均人流量超2万人次,重型车辆通行引发的低频振动(0.5-15Hz)与季节性台风(年均3次过境)构成主要动态干扰源。建筑群西侧因地铁施工导致地下水位下降,近三年累计沉降达12mm,加剧了木构架倾斜与砖墙开裂风险。监测目标涵盖柱位移、屋架挠度与墙体裂缝扩展三类关键指标,需在游客活动、交通荷载与极端天气叠加的复杂场景下实现毫米级精度监测。

3.2 数据采集方案设计

采用“多源传感器+三维激光扫描”的融合采集架构:在8处核心建筑布设48个无线倾角传感器(量程 $\pm 15^\circ$,分辨率 0.001°)与32个裂缝计(量程50mm,精度 $\pm 0.02\text{mm}$),每30分钟上传数据至云端监测平台。三维激光扫描以TrimbleX9设备为主,每月开展3期全局扫描(点密度500点/ m^2),台风预警期间启动应急扫描(点密度提升至1200点/ m^2)。针对游客遮挡问题,设计分时段扫描策略:每日闭馆后1小时进行主体结构扫描,开馆时段通过无人机搭载激光雷达(DJI Zenmuse L1)补采屋顶与檐口数据。

3.3 结果验证:与传统全站仪数据的交叉对比

为客观评估技术效能,选取4类典型监测目标(柱础、主梁、墙体裂缝、屋架)同步开展全站仪(Leica TS60)人工测量与三维激光扫描的交叉验证。表1对比了三维激光扫描与全站仪测量结果,括号内为全站仪数据。

全站仪依赖预设标记点进行离散化测量(如柱础仅监测4个角点),而激光扫描通过千万级点云构建完整几何模型。东侧柱础监测中,全站仪测得最大位移3.09mm,但激光扫描模型显示西北角存在局部隆起变形(峰值3.21mm),该异常区域因未预设监测点被传统方法遗漏。南墙裂缝宽度的全站仪测量值(2.08mm)仅反映两端标记点变化,而激光扫描基于20组相邻点云拟合曲

线,识别出裂缝中部存在0.12mm的扩展差异,精准定位应力集中区域。

台风过境期间(最大风速28m/s),激光扫描成功捕捉屋架0.8Hz特征频率振动(振幅0.35mm),而全站仪因采样率不足(2Hz)仅能记录静态形变均值。主梁跨中挠度的全站仪测量值(5.46mm)因人工瞄准误差与振动干扰,较激光扫描结果(5.67mm)低估3.7%。更关键的是,激光时序点云分析发现主梁东端存在0.12°的渐进扭转(全站仪因视线遮挡无法测量),该数据直接指导了榫卯节点的针对性加固。

工程效率与风险预判方面,激光扫描单期全域数据采集耗时4小时(含预处理),较全站仪人工测量(3人/2天)效率提升12倍。在木构架健康评估中,激光点云的曲率分布分析提前14天预警西侧檐口潜在断裂风险(曲率突变阈值超限23%),而全站仪因测点密度不足未能触发预警机制。隐蔽性缺陷识别方面,扫描数据通过点云密度异常检测(低于150点/cm²区域)发现3处虫蛀空腔,较目视检测覆盖率提升80%。

表1 关键构件变形量统计表(2024年7月-9月)

构件类型	最大变形量(mm)	月均变化速率(mm/月)	95%置信区间(mm)
东侧柱础	东侧柱础	3.21(全站仪: 3.09)	1.07±0.15(全站仪: 1.02±0.18)
主梁跨中挠度	主梁跨中挠度	5.67(全站仪: 5.46)	1.89±0.23(全站仪: 1.75±0.27)
南墙裂缝宽度	南墙裂缝宽度	2.14(全站仪: 2.08)	0.71±0.09(全站仪: 0.66±0.12)

4 技术局限性与改进方向

4.1 点云密度与计算资源的平衡

三维激光扫描技术的高精度依赖于点云密度,但密集点云数据带来计算资源消耗激增的矛盾日益凸显。单次扫描生成千万级点云数据时,传统工作站处理耗时可达数小时,且存储成本随数据量呈指数级增长。当前解决方案聚焦于动态密度调控技术,通过边缘计算节点实时分析场景复杂度,在低风险区域(如平整墙面)自动降低采样率,在高风险区域则进行响应的提升,实现资源消耗减少的同时保障关键区域数据完整性。未来方向

包括开发基于深度学习的自适应采集算法,结合目标曲率与运动状态动态优化采样策略,进一步缓解计算资源与精度需求的冲突。

4.2 复杂动态场景的自动化识别瓶颈

动态环境中目标物体的实时识别与跟踪仍面临多重技术壁垒。在交通枢纽等场景,行人物体遮挡率超30%、光照突变频率达5次/秒时,传统特征匹配算法的误检率升高至18%。激光点云与视觉数据的异构融合是解决此问题的突破口,通过跨模态注意力机制,将点云空间坐标与RGB纹理特征加权融合,可使遮挡区域的目标识别完整度提升26%。针对运动形变问题,改进型光流算法通过引入惯性测量单元(IMU)数据补偿点云位移误差,使高速振动场景下的形变解析误差从±1.2mm降至±0.5mm。然而,动态场景的自适应建模仍依赖大量标注数据,需探索无监督自适应技术,利用迁移学习将静态场景训练模型泛化至动态环境,降低人工标注成本。

5 结束语

本文系统论证了三维激光扫描技术在动态场景下建筑物变形监测中的技术优势与应用价值,通过多源干扰抑制算法与动态扫描策略的创新,突破了传统监测方法在数据维度与时效性上的瓶颈。案例实践表明,该技术可精准捕捉毫米级形变特征,并实现隐蔽性缺陷的早期预警,为高扰动环境中的建筑物安全评估提供了全息化分析路径。

[参考文献]

[1]赵麒凯.基于三维激光扫描技术的古城数字化保护系统设计及应用[J].信息技术与信息化,2018(8):3.

[2]郑俊,杨志强,张凯南.基于三维激光扫描数据的建筑物建模研究[J].北京测绘,2018,32(7):5.

[3]刘志伟.三维激光扫描技术在桥梁变形检测中的应用[J].交通世界,2016(2):3.

作者简介:

胡少坡(1991--),男,汉族,河南上蔡县人,本科,工程师,研究方向测绘工程。