

地面三维激光扫描技术在建筑物变形监测中的应用

吕林

沈阳市勘察测绘研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ETQM.2026020036

摘 要： 三维激光扫描技术给建筑物变形监测带来了高精度、高效率的解决办法。本文详细论述了其工作原理、点云数据特点以及技术流程，包含从方案设计、数据采集处理一直到变形信息获取和可视化全部阶段，着重剖析了检测精度评价、误差控制以及大量数据处理这些重要问题，还探究了多源技术结合和自动化发展走向。研究显示，这项技术可以全方位捕捉结构的整体和局部变形，但是存在成本、环境适应能力等方面的不足。未来，同 BIM、数字孪生等技术深度融合将会进一步优化其在工程安全监测领域的应用价值。

关 键 词： 三维激光扫描；变形监测；点云数据；数据处理；精度评定

Application of 3D Laser Scanning Technology in Building Deformation Monitoring

Lv Lin

Shenyang Surveying and Mapping Research Institute Co., LTD. Shenyang, Liaoning 110000

Abstract： 3D laser scanning technology provides a high-precision and efficient solution for building deformation monitoring. This paper comprehensively discusses its working principles, characteristics of point cloud data, and technical workflows, covering all stages from scheme design and data acquisition to deformation information acquisition and visualization. It focuses on critical issues such as detection accuracy evaluation, error control, and large-scale data processing, while also exploring the integration of multi-source technologies and the trend toward automation. The study demonstrates that this technology can comprehensively capture both global and local structural deformations, though it faces limitations in cost and environmental adaptability. In the future, deeper integration with technologies like BIM and digital twins will further enhance its application value in engineering safety monitoring.

Keywords： 3D laser scanning; deformation monitoring; point cloud data; data processing; accuracy evaluation

引言

建筑物在施工、运行以及受外部环境影响时可能出现变形，这会危及结构安全及其使用寿命。传统的变形监测方法比如全站仪、GPS 等存在效率低、测点较疏等不足，很难全方位掌握结构的整体变形特点。三维激光扫描技术可快速获取物体表面大量的三维点云，从而做到了从单个点测量向整体面状监测的过渡，给建筑物变形分析带来新的途径。本文希望系统地整理这种技术在建筑物变形监测方面的应用框架，包含原理、步骤、分析以及质量保障和发展方向等内容，以此推动该技术在工程实际中得到更为科学、规范的运用。

一、三维激光扫描技术基本原理

（一）技术工作原理与系统构成

三维激光扫描技术按照极坐标测量原理运行，经由发射和接收激光脉冲准确测定目标点的斜距，再加上精密角度编码器所记下的水平与垂直方向角，即时计算出被测点在三维空间中的坐标。这个系统包含硬件和软件两大核心部分，其中硬件重点在于集成了激光测距单元、高速扫描镜以及角度传感器的扫描仪本体，而且还有控

制单元、电源以及三脚架之类的辅助设备，而软件系统覆盖了从数据收集一直到存储再到预处理的整套功能模块。整个工作流程达成了从物理空间向数字点云空间极速而又精准的转换，这种非接触、高密度的特点给后面的变化分析构筑了数据根基。

（二）点云数据特性与精度影响因素

三维激光扫描得到的点云数据具备诸多特性，其中最为关键的特性在于数据量庞大、密度较高，并带有回波强度信息。这些单独存在的点集可以细致描绘物体表面的几何特征，不过其最终

精度会被很多复杂因素共同左右。仪器本身存在一些固有的误差，测距误差、角分辨率以及校正之后残留的误差都是如此，这些误差形成了精度的基本框架。外界环境状况也起到很大的影响作用，扫描距离、入射角度、目标表面的反光性质以及大气透明度等都会明显改变信号的质量。而且人的操作行为也会产生很大影响，扫描方案是否合理、分辨率设定得恰当与否、控制网络布置得如何、现场质量保障手段怎样等等，这些都会对数据的可信度起到决定意义的作用。

二、建筑物变形监测的技术流程

（一）监测方案设计与扫描控制网布设

科学而严谨的检测方案乃是达成应用的基础所在，其设计必须要综合考虑建筑物的结构特征、变形敏感部位、预计的精度标准以及现场的通视状况。重点在于明确最佳的扫描分辨率、站点的位置与个数，从而保证点云数据能够充分覆盖目标范围，并具备足够的重叠量。扫描控制网的设置会给多期数据的配准赋予相同的空间参照系，一般会在监测体周边的稳定地方设立永久或者半永久性的控制点和标靶。这个控制网得要借助高精度的测量工具（比如全站仪）预先测量出来，它的稳定性和布设的恰当与否直接影响到多期数据对比分析是否可靠，也是关联各个时期单独扫描数据的重要纽带。

（二）多站点云数据采集与现场质量控制

数据采集阶段要严格按照既定方案来执行，经由合理规划测站，防止出现测量死角，还要保证相邻测站之间有足够大的公共重叠区域，这样才能满足后续拼接的需求。在现场操作的时候，要记录环境参数，精确地设置扫描参数，也要对靶标实施清楚而完整的扫描。现场的质量控制非常关键，其中涉及及时预览点云，检查其完整性、密度是否达到标准，是否存在明显的噪声或者数据缺失等情况。如果发现了问题，比如因为遮挡造成数据不全，就要马上执行补扫或者调整测站。这个过程是保障原始数据质量的第一道屏障，可以有效地防止把重大瑕疵带进后续的处理环节。^[1-5]

（三）多期数据预处理与配准方法

所采集的原始点云存在噪声、多余点和无关背景信息，所以要经过预处理才能使用。预处理流程包含点云去噪滤波来清除离散误差点，数据抽稀可在保留特征的情况下缩减数据量，还有点云分类分割以获取目标建筑物的数据。多期数据配准是把不同时间、不同测站得到的点云统一到同一个坐标系的关键步骤。主要方法有依靠人工标靶的配准和依靠点云自身几何特征的配准，前者精度高、可靠性强，不过需要稳定的控制点；后者更为自动化，但算法复杂，而且对点云质量的要求很高。配准之后要评定残差，保证其精度符合检测要求。

三、变形信息提取与分析方法

（一）基于点云数据的变形量检测关键技术

从配准后的多期点云中提取变形信息是核心分析内容，其关

键技术在于建立可靠的对应关系并量化变化。主要方法包括：凭借点的直接比较法，要计算最近点对的距离，这须要点云配准精度非常高；依靠模型拟合法时，把点云或者分割出来的区域拟合几何元素（比如平面、圆柱），经由比较模型参数（法向量、间距等）的改变情况来衡量变形；按照表面的比较法，可以创建点云为三角网模型，利用计算模型之间的距离场（像 Cloud-to-Mesh 距离之类）来产生变形分布图。选取方法的时候，要综合考虑变形类型、数据特征以及计算效率等因素^[6-10]。

（二）整体变形分析与局部特征变形识别

变形分析要从整体和局部这两个层面去开展。整体变形分析重点放在建筑物的宏观位移上，也就是整体沉降、倾斜或者扭转之类的状况，可以经由获取点云中的特征点（比如角点、屋脊点）、特征线（像是边缘）或者拟合出来的特征面，来计算它们在不同时期的位置和姿态发生了哪些改变从而达到目的。而局部特征变形的识别则侧重于针对特定构件或者区域所出现的微小变化，墙面鼓出、楼板弯曲、裂缝扩展等情况，这常常得要把点云细致地分割开来，选取好目标区域，再用高精度的对比算法来做分析。局部变形往往预示着结构损伤，准确识别它对于安全警报来说有着十分关键的意义。

（三）变形过程可视化与监测成果表达

直观的可视化表达对认识复杂变形空间分布十分关键。常见的方法包含变形云图，该图用颜色梯度直观表现建筑物表面各个点的变形量大小及其方向；还有变形等值线图，此图清楚描绘变形量的梯度变化情况；另外有特定方向的剖面图，可用来剖析沿某条剖线的变形规律；也可以借助多期数据制作变形发展的三维动画。监测成果的最终表达需把这些可视化图表、关键点变形量的统计表格以及趋势分析的文字报告融合起来，进而得出综合结论。该结论要清楚标明变形区域、变形量级、发展速度以及潜在风险，从而给结构安全评定和决策提供直接依据。

四、技术应用的关键问题与质量控制

（一）监测精度评定与不确定性分析

对三维激光扫描变形监测结果执行科学的精度评定与不确定性分析，这是保障结论可信度不可或缺的部分。精度评定要融入整个流程当中，包含对仪器自身标称精度实施验证，评定多期点云配准精度，还要分析最终变形量检测的精度。不确定性产生源很繁杂，涉及仪器误差、环境干扰造成的误差、标靶对中的误差、数据配准的误差以及数学模型简化产生的误差等等。应当系统地找出各个不确定度的来源，并利用误差流传定律或者统计方法来执行综合处理，进而给出变形量结果的置信区间或者不确定度范围，以此对监测数据的可靠性展开定量评判。

（二）复杂环境下的误差控制与优化策略

建筑物监测常常遭遇振动、温差、遮挡、复杂光线等复杂环境难题，这些因素会产生大幅误差。要从数据采集和数据处理两个方面来实施误差控制策略。在采集阶段，应当选取环境比较稳定的时段开展工作，改良测站布局以缩减遮挡情况，针对那些容

易受温度影响的部件执行温差补偿，而且可以采用多传感器同步观测的方式相互校验。在数据处理阶段，可以运用先进的滤波算法去除环境噪声，凭借统计检测去除粗差，或者经由多视点云融合技术填补单站数据的不足。制订出恰当的改良策略对于改善复杂环境下监测数据的质量和可靠性十分关键。

（三）海量点云数据的管理与处理效率

三维激光扫描产生的海量点云数据对存储、管理和计算处理构成巨大挑战。有效的数据管理需要建立规范的文件命名、元数据记录和分层存储体系。提升处理效率是工程应用的核心需求之一，主要途径包括：在保证精度的情况下执行数据抽稀以缩减数据规模，利用并行计算、GPU加速等技术来加快核心算法的运算速度，开发高效的数据索引及检索方法以加快数据访问，创建自动化的处理流程从而减轻人工干预。发展智能化的点云处理平台并整合高性能算法和数据经营工具，这是应对海量数据并加强整体监测效率的必然方向。

五、技术总结与发展展望

（一）技术在建筑物变形监测中的优势与局限性

该技术在建筑物变形监测中展现出显著优势：非接触测量方式比较安全，不会干扰到建筑物自身的状态；它能快速采集数据，效率比传统单点方法高很多；可以得到完整又高密度的表面空间信息，做到真正的“面监测”；而且可视化效果好，变形结果很直观。不过它的局限也很明显：高精度设备的购买和保养费用比较高；大量点云数据的处理需要很强的专业性，耗时间长；监测的绝对精度会受到扫描距离和环境因素的影响比较大；还要求测站和被测目标之间要有通视条件。所以在实际应用的时候，要依照具体项目的精度需求、经费预算以及现场条件来谨慎选择。

（二）多源技术融合与自动化监测趋势

单一技术无法解决全部检测问题，多源技术融合已是清晰的发展趋向。把三维激光扫描同高精度全站仪、GPS、测量机器

人、地面合成孔径雷达以及各种传感器网络关联起来，就能发挥各自的长处，达成点、面、体检测的融合，做到宏观与微观变形相互补强，进而形成更为全面、可靠的检测体系。而且，检测系统正在向着自动化、智能化极速发展，经由整合物联网技术来做到设备的远程操控并让数据自动回传，凭借人工智能和机器学习算法做到对变形信息的自动识别、分析及警报，最终目的在于创建起无需值守、随时反馈的智能结构健康检测系统。

（三）未来技术发展方向与应用前景

未来的技术发展会着重于硬件向小型化、低成本化和高精度化方向发展，软件则朝着智能化和自动化方向前进。在算法方面，更为高效稳定且可靠的点云配准、变化检测、语义分割以及特征识别方法将成为研究的重点所在。从应用角度来讲，三维激光扫描技术将会同建筑信息模型、数字孪生技术深度融合，从而达成从“静态扫描建模”迈向“动态数字孪生”的转变，给建筑物的设计、施工直至运维这一整套生命时段的健康监测赋予关键的数据支持。该技术的应用范围也将由传统的土木工程逐步拓展到智慧城市运作、地质灾害防御、文化遗产数字化保护与修缮等诸多崭新的领域之中，表现出极为宽广的发展潜力。

六、结语

三维激光扫描技术具有非接触、高效率、高密度这些特性，给建筑物变形检测带来新的技术手段。经由规范的检测步骤、精准的数据处理以及严格的精度把控，这项技术可以有效地显示结构整体和局部的变形规则。应对海量数据处理、复杂环境误差控制这样的难点时，要不断改良技术手段，促使多源数据整合并朝着智能化方向发展。未来，这项技术会深入结合 BIM、数字孪生等，会在智慧城市、遗产保护等领域起到更为关键的作用，给工程结构的安全运行和全生命时段管理提供稳固的基础。

参考文献

[1] 施青刚. 基于地面三维激光扫描的采空区建筑物变形监测研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(20): 176-178.
[2] 刘华, 周美玉, 单维营. 地面三维激光扫描仪在建筑物倾斜变形观测中的应用 [J]. 电力勘测设计, 2017, (S1): 135-146.
[3] 石自桂. 基于三维激光扫描技术的建筑物变形监测与数据分析 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(18): 205-207.
[4] 王清朋. 多源监测技术协同建筑物纠偏全过程变形监测研究 [D]. 山东建筑大学, 2024.
[5] 马彦凤. 基于三维激光扫描技术的建筑物倾斜度观测方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(05): 222-224.
[6] 王广全. 基于三维激光扫描的高层建筑物地基沉降测量方法分析 [J]. 江西建材, 2023, (02): 86-87+90.
[7] 王磊, 朱尚军, 蒋创, 等. 基于三维激光扫描的矿区建筑物变形监测与采动损害评估 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(04): 213-222.
[8] 李英芳. 三维激光扫描仪在建筑物变形监测中的应用 [J]. 中国建筑金属结构, 2020, (09): 90-91.
[9] 李明. 三维激光扫描技术在建筑物变形观测中的应用 [J]. 住宅与房地产, 2019, (33): 151.
[10] 刘亮. 三维激光扫描技术在高层建筑整体变形监测中的应用 [J]. 住宅与房地产, 2019, (27): 243.