引文格式：苏秀永,金雨奇. 三维激光扫描技术在水工隧道测量中的应用研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):125-127. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.027

三维激光扫描技术在水工隧道测量中的应用研究

苏秀永，金雨奇
（浙江华东测绘与工程安全技术有限公司，浙江 杭州 310014）

摘　要：针对三维激光扫描技术在水工隧道测量中的应用需求，系统分析水工隧道应用该技术存在的技术难点与瓶颈问题，提出构建基于三维激光扫描技术的水工隧道质量监测与运维变形管理系统的解决方案。通过搭建水工隧道施工质量监测与运维变形检测原型系统平台，利用技术手段和软件，解决三维激光扫描应用水工隧道测量技术难点，实现隧道点云数据采集、点云数据处理、隧道场景化信息提取和计算；通过三维点云与传统测量数据、地质信息的深度融合，为水工隧道全生命周期质量监控与安全检测提供多维、多模态、动态化、精细化的数据支撑，形成“管得好、控得住、用得顺”的三位一体水工隧道监测、检测闭环管理体系，逐步实现“实时更新-准时处理-及时反馈”的“三时”目标。

关键词：三维激光扫描；水工隧道；隧道场景化信息提取与计算；施工质量监测；运维变形检测；“三时”目标
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0125-03

Research on Application of 3D Laser Scanning Technology in Hydraulic Tunnel Measurement

SU Xiuyong, JIN Yuqi
(Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

Abstract: In response to the application requirements of 3D laser scanning technology in hydraulic tunnel measurement, we systematically analyzed the technical difficulties and bottlenecks in the application of this technology in hydraulic tunnels, and proposed a solution to build a quality monitoring and operation deformation management system for hydraulic tunnels based on 3D laser scanning technology. By building a prototype system platform for quality monitoring and deformation detection in hydraulic tunnel construction, we used technical means and software to solve the technical difficulties of 3D laser scanning application in hydraulic tunnel measurement, and achieved tunnel point cloud data collection, point cloud data processing, tunnel scene information extraction and calculation. By deeply integrating 3D point clouds with traditional measurement data and geological information, we provided the multi-dimensional, multi-modal, dynamic, and refined data support for the quality monitoring and safety detection of hydraulic tunnels throughout their entire life cycle, forming a monitoring and detection closed-loop management system of “real-time update, on-time processing and timely feedback” and “well managed, controllable, and smooth use”.

Key words: 3D laser scanning, hydraulic tunnel, tunnel scenario-based information extraction and calculation, construction quality monitoring, operation and maintenance deformation detection, “real-time update, on-time processing and timely feedback” target

在地质测量中，三维激光扫描技术能够提供高分辨率的地形数据，有助于洞穴结构、岩层特性以及地质构造的详细分析[1-2]。国内外学者对三维激光扫描技术在隧道测量的应用进行了广泛研究，认为隧道复杂环境下的反射、散射和遮挡问题对数据质量影响较大，加上数据采集时环境条件的影响、数据处理的复杂性以及与其他数据的融合[3]，该技术的拓展性应用仍面临挑战[4-17]。近年来迅速发展的群体智慧（collective intelligence）、深度学习（deep learning，DL）等人工智能（artificial intelligence）技术为测绘数据挖掘、信息提取提供了新的手段。为此，本文从三维激光扫描技术在水工隧道测量中的应用需求出发，阐述了水工隧道应用三维激光扫描技术的应用难点，提出了构建基于三维激光扫描技术的水工隧道质量监测与运维变形管理系统的解决方案，为水工隧道施工、运维提供工程全生命周期的多维数据支撑。

1　水工隧道测量技术难点

尽管三维激光扫描技术具有传统测量方法无可比拟的优势，但其在水工隧道工程中的应用仍面临多重技术瓶颈：复杂地质环境与动态施工条件显著制约数据采集质量；海量点云数据的处理对计算资源与算法

项目来源：华东测安科技项目（ZKY2022-CA-02-08）。
第一作者简介：苏秀永（1976—），本科，高级工程师，注册测绘师，一级建造师，主要从事工程测量与管理工作，E-mail: 809863884@qq.com。

效率提出严峻挑战；此外，点云数据后处理及多源信息融合等关键环节仍存在系统性研究不足。

1.1 空间信息采集难度大

空间数据采集是进行隧道建模、线性分析应用的基础与前提。施工期的隧道协调难度大，开挖表面不平整、特征点较少，加上施工人员、机械设备、施工材料、粉尘、水汽以及连续施工（人、机、料、环、法），都极大影响点云数据采集质量，可能导致误测或漏测；对于大跨度、竖向弯曲度大的水工隧道，三维激光扫描系统搭载平台运行难度大。对于动态变化的地质条件，如何实时更新扫描数据以保证测量的时效性是一个待解决的问题。

1.2 点云数据处理效率低

随着观测期次和对象范围增加，点云数据量成倍增长，组织和索引方法对于快速处理意义重大。作为变形分析的基础，需要建立多期点云数据统一空间参考基准，实现点云精细配准。GB甚至TB级的海量点云数据考验计算机的运算能力。此外，现有点云数据处理软件明显缺少与其他测量数据融合功能，尤其在大型、深埋水工隧道中需要高度精准的坐标转换和误差校正，这些都给点云观测数据的高效处理带来了难度。

1.3 实际应用交互性差

多期离散无序的点云缺乏点群间的空间拓扑关系，需要经过任意处断面与水平直径提取、等效半径拟合等方法处理后，才能用于轴线偏差、超欠挖等分析。这种数据处理效率偏低，难以与人机交互功能深度融合，导致无法满足水工隧道施工实时监测的要求，用户体验感较差。

2 三维激光扫描技术应用水工隧道测量的解决方案

2.1 平台构建

针对三维激光扫描技术在水工隧道测量中的应用需求，提出了构建基于三维激光扫描技术的水工隧道质量监测与运维变形管理系统的解决方案，通过搭建水工隧道施工质量监测与运维变形检测原型系统平台，与自然智能、深度学习、群体智慧等人工智能相结合，建立基础模块和工程模块，实现点云数据采集、点云数据处理、隧道场景化信息（包括隧道中轴线、断面尺寸以及高程信息、高程偏差及超欠挖量）提取和计算等功能，为各相关方及时提供准确可靠的多维数据，形成“实时更新–准时处理–及时反馈”和“管得好、控得住、用得顺”的三位一体水工隧道监测、检测闭环管理体系如图1所示。

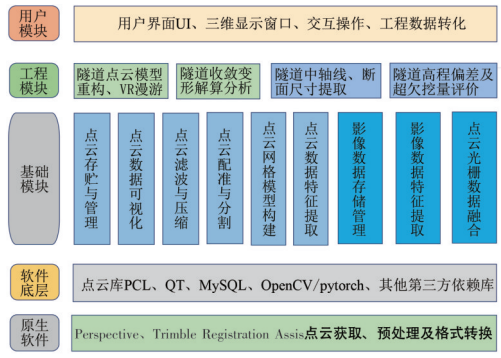


图1 水工隧道施工质量监测与运维变形检测原型系统平台

2.2 技术难点解决方法

1）基于控制点与特征点（面）协调布置的数据采集方法。施工中的水工隧道结构面粗糙，缺乏有效的特征点（面），即使是人工布设的预埋件，也因支护、二衬施工而掩盖原有面貌，导致难以重复利用。针对这一特点，采取间隔30 m左右分段、多站高密度扫描，有施工材料、设备遮挡区域，加密扫描测站，以避免扫描漏洞；扫描作业前通风降尘后，均匀布设3～4个活动靶标或标靶标纸，确保相邻测站有2个及以上公共靶标。在建成运维中的水工隧道中，设置特征点（面），移动或设站扫描前，可布设少量靶标或靶标纸。

基于全站仪实测数据建立控制基准，采用高精度全站仪对布设的标靶板进行三维坐标标定，并通过最小二乘平差算法优化控制网精度。根据工程需求预设扫描参数，通过辅助照明系统优化扫描环境照度，实现扫描仪与数码相机的光机电同步触发，确保三维点云与高分辨率二维影像的时空一致性。建立全站仪与扫描仪的协同工作机制，通过设备作业时序规划与空间位置优化布局，消除多源传感器间的电磁干扰与视场遮挡问题。

2）海量点云去噪、压缩与存储方法。水工隧道环境潮湿，施工期临时设施较多，钻爆法产生的灰尘大，导致扫描作业时出现大量噪点。对明显判断为遮挡物的点云直接手动删除。对于其他噪声，采用编程的综合去噪方法[15]。

为了避免点云抽稀可能导致局部缺少有效数据，同时节省存储空间并提高传输效率，可通过注意力机制聚合压缩点云，或对3D点云进行体素化。体素化过程可以使原始点云更加规则，使得3D点云接近类似3D图像的表示，即每个栅格（2D）或者立方体（3D）可以被作为一个图像块。如图2所示，研发处理软件，实现基于外存的处理架构。

3） 时序点云数据高精度配准、拼接与精度评定。

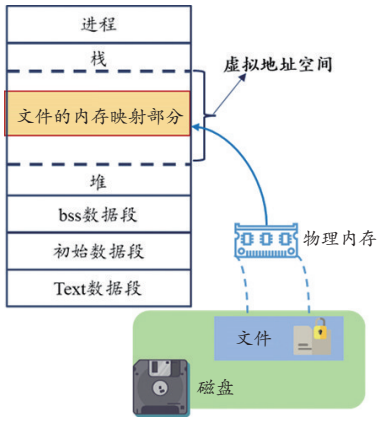


图2　点云外存架构

点云配准是计算机视觉领域中的一个热门主题，其目的是通过最小误差函数来估计最优变换。

$$T=\arg\min e(M,TP) \tag{1}$$

式中，T 为待估计的相对变换；P 和 M 分别为起始点云和目标点云；$e(.)$ 为最小化的误差函数。

考虑点到点的应对关系，利用迭代最近点（ICP）方法实现扫描配准，在每次迭代中寻找最优解。相邻测站点云配准后，再拼接成一个整体，从而获得水工隧道特征点（面）的立体表示。相邻测站点云使用公共靶标配准，或融合影像配准技术进行点云平面同名点配准，构建局部配准形状描述子，利用同名平面点（面）约束条件实现刚性与非刚性点云配准融合。基于水工隧道内、外多个控制点进行平移、选转，将分段点云拼接成统一坐标系的整体更具鲁棒性。也可以基于SLAM算法自动拼接各段点云。

以时序点云中的特征点（面）的几何结构为约束条件，基于几何特征自洽的相对精度，评估点云扫描精度，结合商用软件自带配准误差、精度统计功能，实现自然智能与计算智能相结合的高效、便捷评估。

4）海量点云数据几何形态参数信息快速智能提取、应用。为了分割降低点云数据规模、快速提取隧道几何形态参数，利用信息挖掘技术将点云数据投影转换为二维栅格数据。之后，构建多时序点云数据几何形态参数信息库，结合深度学习多任务中先验归纳知识嵌入的技术方法，将监测、检测区域几何形态参数与深度学习算法进行多时序、多节点耦合，计算其间的拓扑、方向及度量等空间关系，实现自然智能与计算智能相结合的隧道几何形态快速分析应用。构建精细模型，三维虚拟隧道现状。

3　结　语

本文指出了三维激光扫描技术在水工隧道测量中应用存在的问题和技术难点，提出研究思路和解决方法。通过开发水工隧道施工质量监测和运维变形检测原型系统平台，实现空间信息采集管理、点云数据高效处理与精度智能评定。经过不断优化升级迭代，将逐步实现实时更新扫描数据、准时智能处理数据、及时提供隧道几何形态信息的“三时”目标。

参考文献

[1] 王梓龙,裴向军,董秀军,等. 三维激光扫描技术在边坡地质编录中的应用[J]. 人民黄河,2018,40(5):111-115

[2] 荆洪迪,李元辉,张忠辉,等. 基于三维激光扫描的岩体结构面信息提取[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(2):280-283

[3] 胡琦佳,鲁勇,李春华. 三维激光扫描技术在隧道断面限界检测中的应用[J]. 工程勘察,2020(3):56-59

[4] 赵栋. 基于三维激光扫描的地铁隧道断面测量技术[J]. 自动化应用,2023,64(12):167-169

[5] 卢建军,黄小斌,吴勇,等. 基于移动三维激光扫描技术的地铁隧道接触网导高检测新方法[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(1):200-205

[6] 袁长征,滕德贵,胡波,等. 三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 测绘通报,2017(9):152-153

[7] 刘欢,王立娟,裴尼松,等. 三维激光扫描技术在米仓山特长隧道施工中的可行性应用研究[J]. 测绘通报,2017(9):83-87

[8] 张慧,李凯. 三维激光扫描技术在公路隧道施工监测中的应用研究[J]. 公路工程,2018,43(4):230-234

[9] 赵宇,詹建勇,杨勇勇,等. 基于三维激光扫描技术的隧道施工期变形监测研究[J]. 科技通报,2019,35(9):173-179

[10] 江鸿,张永涛,陈培帅,等. 山岭隧道三维激光扫描及数据处理技术研究[J]. 施工技术,2019,48(1):116-120

[11] 宋云记,王智. 利用三维激光扫描技术进行地铁隧道施工质量管控及病害检测[J]. 测绘通报,2020(5):150-154

[12] 姚天予,韦征,张豪,等. 三维激光扫描技术在铁路隧道中的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2020,37(1):315-317

[13] 田宏图. 三维激光扫描技术在铁路隧道断面提取中的应用研究[J]. 工程勘察,2021,49(7):45-49

[14] 唐东跃,肖书安,周兴华,等. 三维激光扫描技术在高铁隧道平整度检测中的应用[J]. 测绘通报,2021(9):160-164

[15] 闵世平,彭东,何跃川,等. 隧道三维激光扫描测算一体化技术方案与实践[J]. 现代隧道技术,2022,59(1):87-94

[16] 李旭. 三维激光扫描技术在地铁隧道竣工测量中的应用[J]. 测绘通报,2022(6):166-169

[17] 方立伟. 三维激光扫描技术在隧道工程中的应用分析[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(2):163-165