

基于跨维数据的隧洞开挖中地质信息提取

徐小雷 曾俊 罗强 王昱辉 郑吉新

中国水利水电第七工程局有限公司 甘肃 武威 733000

摘要：随着传感器技术与计算机视觉的发展，跨维数据获取与处理方法逐渐应用于地下工程地质领域。本文在综述跨维数据相关研究进展的基础上，结合甘肃皇城抽水蓄能电站建设工程实例，重点探讨了基于三维激光扫描（TLS）与摄影测量的跨维数据融合方法，研究了隧洞开挖过程中快速地质素描与三维实景重构的技术流程。研究表明，该方法能够高效识别隧洞围岩节理裂隙与结构面，自动生成标准化地质素描图，并构建与实际开挖面高度一致的三维实景模型，为隧洞围岩稳定性评价与施工安全提供有力的数据支撑。

关键词：跨维数据；地质素描；隧洞开挖；稳定性评价

引言：随着地下厂房、长大隧洞及地下空间的不断扩展，工程区的地质条件日益复杂，岩体稳定性问题成为影响施工安全和进度的关键因素。在甘肃皇城抽水蓄能电站开挖洞室中，砂岩与泥岩交互分布，层间裂隙、缓倾节理和陡倾节理普遍发育，往往在隧洞开挖过程中与切层断层等结构面相互切割，形成不同形态和规模的块体。施工扰动和岩体自重作用下，这些块体容易产生滑移、剥离或塌落，严重威胁施工安全和长期稳定性。传统的地质素描是获取岩体结构特征的重要手段，但依赖人工操作，效率低下，受主观因素影响大，且难以在复杂空间条件下保证精度和全面性。

随着传感器和计算机视觉技术的发展，跨维数据获取与处理方法逐渐被引入地下工程地质领域。三维激光扫描能够快速采集高密度点云数据^[1]，摄影测量技术能够补充纹理和细节信息，两者结合实现了几何与纹理的互补^[2]。通过点云配准、几何分析、聚类运算和三维建模，可以实现隧洞围岩结构面的自动识别与产状计算，并生成直观的地质素描与虚拟场景。这种方法不仅显著提高了效率与精度，还能为后续稳定性评价和支护设计提供高质量的基础数据^[3]。

本文结合甘肃皇城抽水蓄能电站地下厂房及隧洞开挖工程，探讨基于三维激光扫描与摄影测量的跨维数据在隧洞地质素描与三维重构中的应用，阐述其数据获取与处理流程，分析其在复杂水平层状岩体条件下的优势与工程价值。

1 跨维数据获取

在本研究中，针对甘肃皇城抽水蓄能电站隧洞开挖过程中岩体结构面复杂、人工地质素描效率低的问题，采用三维激光扫描技术获取高精度点云数据，为后续的跨维数据处理与地质信息提取提供基础支撑。三维激光

扫描的原理可概括为激光测距与角度定位的综合应用^[4]。其工作流程是扫描仪首先发射激光脉冲，脉冲到达岩体表面后发生漫反射，部分光信号被接收器接收，根据激光的飞行时间差即可计算出扫描点到仪器的空间距离 S ，其公式为

$$S = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

其中， c 为光速， Δt 为激光脉冲往返所需的时间。与此同时，仪器通过旋转反射镜记录下每个激光脉冲的水平角 α 与垂直角 β ，由此即可将极坐标转换为空间直角坐标。在扫描仪坐标系下，点 P 的三维坐标计算公式为

$$\left. \begin{aligned} X &= S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \\ Y &= S \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ Z &= S \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在隧洞地质调查中，摄影测量技术主要作为三维激光扫描的有力补充，其核心作用体现在几何信息和纹理信息的完善与增强。一方面，三维激光扫描在隧洞开挖环境中可能因遮挡导致点云稀疏或缺失，而摄影测量通过多角度重叠影像生成稠密点云，有效填补了几何数据的空缺；另一方面，三维激光扫描获取的点云缺乏颜色和细节纹理，摄影测量则能够提供高分辨率的真实影像，实现对岩体表层颜色、层理和裂隙纹理的精准记录。在结构面识别中，影像信息还能突出节理、断层等在颜色和亮度上的差异，提高模糊聚类与边界检测的准确性，为自动化地质素描提供可靠依据。同时，摄影测量设备轻便、成本低、操作灵活，可快速覆盖三维激光扫描不易扫描的区域，进一步提升隧洞地质数据获取的完整性与效率。

2 地质三维模型重构

2.1 点云地理配准

在通过三维激光扫描和多视角摄影测量获取的数据中,不同数据源各自处于不同的坐标系统中。如果直接使用,必然导致各类数据之间存在位置偏差,进而影响后续的结构面识别与参数计算^[5]。因此,必须对点云数据进行地理配准,将其统一到工程坐标系统下。其数学模型可表示为刚体变换:

$$P_1 = RP_2 + T \quad (3)$$

其中, P_2 为扫描坐标系下的点云, P_1 为工程坐标系下的点云, R 为旋转矩阵, T 为平移向量。通过选取控制点 (X_i, Y_i, Z_i) , 建立约束方程, 并采用最小二乘法优化, 最小化残差:

$$\min \sum_{i=1}^n \|P_{1,i} - (RP_{2,i} + T)\|^2 \quad (4)$$

本研究采用基于后视定向的点云直接地理配准方法。该方法通过布设控制点, 将多源点云精确地拼接在统一的工程坐标系中。配准过程的核心在于保证不同数据源之间的一致性, 使得结构面参数的计算结果能够直接与工程设计和稳定性分析对接。

在工程实例中, 皇城抽水蓄能电站地下厂房和输水隧洞布设了多个控制点, 通过TLS点云与摄影测量点云的联合配准, 这样, 获取的地质数据能够直接用于施工监测和设计验证, 避免了传统人工换算带来的误差, 提高了工作效率和数据可靠性。

2.2 Delaunay三角剖分

点云数据本质上是一系列离散点的集合, 直接用于地质分析时容易受到噪声和采样不均的影响。为了更好地描述岩体表面特征, 需要对点云进行表面建模。通过采用Delaunay三角剖分方法对点云进行重建, 生成连续的三角网格模型。Delaunay三角剖分的基本思想是, 在给定点上划分三角形, 使得所有三角形的形状尽可能接近规则状态, 从而避免生成过于狭长或扭曲的三角形。在数学上, 若给定点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 其Delaunay剖分满足空圆性质: 任意一个三角形的外接圆中不包含其他点。该性质保证了网格的局部最优性与几何合理性。通过Delaunay三角剖分, 将离散点云重构为连续表面模型, 每个三角面片都可以计算其法向量与空间参数:

$$\vec{n} = \frac{(p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1)}{\|(p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1)\|} \quad (5)$$

其中, $\vec{n}$ 为单位法向量

这种剖分方法不仅能保证网格的几何稳定性, 还能提高计算法向量与空间特征参数的精度。通过该方法, 原始离散点云被转化为连续曲面模型, 为后续的结构面识别与参数计算提供了必要的几何基础。隧洞开挖面经过

Delaunay三角剖分后, 能够清晰反映层理面、节理面和断层层面的空间分布, 为自动识别这些结构面提供可靠的数据基础。这一步骤的实施, 使点云由“数据云”转化为“数字地质体”, 极大提高了数据的可用性和直观性。

2.3 模糊聚类识别结构面

完成曲面建模后, 需要在隧洞开挖面中识别出各类地质结构面。传统方法往往依赖人工判读, 效率低且存在较大主观性。而采用模糊聚类分析方法, 是通过对网格面片的法向量与空间位置进行聚类, 自动识别结构面。模糊聚类的优势在于, 它允许一个数据对象以一定隶属度同时属于多个类别, 从而更好地处理结构面分布的不确定性和模糊性。对于隧洞开挖面而言, 层理面、节理面和断层往往相互切割、交叉, 边界模糊, 不适合用硬划分的方式分类。模糊聚类能够有效识别出这些结构面, 并避免因人工判读带来的主观误差。动划分了其分布区域。

2.4 最小二乘法计算产状参数

在识别出结构面后, 需要对其几何参数进行量化, 包括倾向和倾角。由于实际开挖面存在粗糙度和局部不规则性, 若直接利用点云数据计算, 会导致结果不稳定。因此, 可通过最小二乘拟合方法, 对聚类后的结构面进行平面拟合, 从而获取最优的几何参数。通过最小二乘拟合, 可以有效平滑掉局部起伏和噪声影响, 使得产状参数更加精确和稳定。对于每个三角面片, 其法向量可表示为:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (6)$$

对应的倾角与倾向为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C}\right), \phi = \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (7)$$

这一方法的应用不仅可提高参数计算的可靠性, 还能够在短时间内处理大量数据, 远优于传统人工测量的效率。

2.5 地质素描生成

基于结构面识别与产状参数计算结果, 可实现自动化地质素描图的生成。自动生成的素描图包括层理面和节理的轮廓线、产状标注以及文字信息说明等内容, 能够直观反映隧洞开挖面的地质特征与传统人工素描相比, 自动素描具有明显优势: 其精度更高, 完全基于点云计算结果, 避免了人工测量误差, 其次, 其效率更高, 可在数分钟内生成标准化图件, 而人工素描可能需要数小时, 此外, 其标准化程度高, 可直接嵌入工程数据库, 便于后续的设计、施工与监测使用。

2.6 三维实景重构

在完成点云处理和地质素描生成后,可进一步开展三维实景重构。该过程包括表面重建和纹理映射两个环节:前者将点云数据重构为连续曲面,后者则利用摄影测量影像将纹理信息贴附在曲面上。最终得到的三维模型既具有几何精度,又具有真实感,能够直观反映岩体的几何特征与表面纹理。三维实景模型可以被用于直观展示掌子面岩体结构,为监理和施工人员提供了可靠的可视化依据。同时,该模型还能与数值分析软件对接,为后续的稳定性和风险预测提供基础数据。

3 实例分析

在甘肃皇城抽水蓄能电站地下厂房及输水隧洞施工过程中,研究区岩性主要为近水平层状砂岩与泥岩互层,岩体内部裂隙和节理发育,结构面之间相互交叉切割形成多种块体。在这种复杂条件下,人工素描既效率低,又难以全面准确反映真实结构。为解决这一问题,需对隧洞快速地质素描与三维实景重构。

首先,在隧洞开挖面布置三维激光扫描站和摄影测量站,获取点云和影像数据。通过基于后视定向的直接地理配准,将三维激光扫描点云转换至工程坐标系,保证数据与施工控制一致。随后,利用ICP算法实现TLS与SfM点云的精细配准,生成既具几何精度又具纹理信息的融合点云。然后,基于Delaunay三角剖分与模糊聚类分析识别点云中的潜在不连续面,通过最小二乘法拟合计算产状参数。在点云处理结果的基础上,系统自动生成标准化地质素描图,包括层面识别、产状计算、轮廓绘制和文字标注,从而避免了人工绘制的主观差异。最后,针对去噪与配准后的点云数据,采用表面重构方法生成隧洞三维表面模型,并通过影像纹理映射实现几何与纹理的融合,构建出精确反映岩体几何形态与表面特征的三维实景模型。

该方法在皇城抽水蓄能电站工程中得到了验证,结果表明,其不仅能够快速、全面、客观地反映水平层状岩体的结构特征,而且为施工过程中稳定性分析和支护设计提供了可靠的数据支持。通过三维实景模型,工程技术人员能够直观观察隧洞围岩的裂隙分布和块体组合情况,有效识别潜在危险区域,从而提前制定防护措施,显著提升施工安全性与效率。

结束语:本文依托通过甘肃皇城抽水蓄能电站工程,通过TLS与摄影测量的结合,可以快速获取隧洞开挖面的高精度点云与高分辨率纹理信息,并通过配准、Delaunay算法、模糊聚类和最小二乘法等方法自动识别结构面、计算产状参数,进而生成标准化的地质素描图。结合表面重构与纹理映射技术,可以构建与实际高度一致的三维实景模型,直观反映岩体几何和纹理特征。该方法显著提高了地质素描与监测效率,减少了人工误差,为围岩稳定性分析和支护设计提供了坚实数据支撑,为复杂工程的安全高效建设提供重要保障。

参考文献

- [1]赵军,陈宝龙.三维激光扫描点云的岩体产状智能识别研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2024,44(02):20-25.
- [2]王宇翔,沈月千.基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别方法[J].激光与光电子学进展,2024,61(14):138-147.
- [3]吴翔.基于三维激光点云的岩体结构面几何信息提取研究[D].吉林大学,2022.
- [4]赵旭.结构面信息提取方法研究[D].安徽理工大学,2021.
- [5]王瑞芳,荆地.地面三维激光扫描技术在地质调查中的应用[J].科技创新导报,2021,18(33):109-111.