

基于激光点云的地下空间三维重建方法研究

赵艺龙¹, 李勇康¹, 朱宝新^{2,*}, 武 浩¹, 程相君¹, 朱容晖¹

1. 嵩县山金矿业有限公司运营管理部, 河南 洛阳 471400

2. 山东科技大学, 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590

摘要: 随着地下空间开发利用日益成为国土空间资源优化配置的关键环节, 传统测绘方法在复杂地下环境中的适应性不足问题愈发凸显。本文针对传统测绘方法难以满足复杂地下空间高精度建模需求的问题, 以模拟矿井和地下溶洞为研究对象, 开展基于三维激光扫描技术的地下空间三维重建方法研究。通过手持 SLAM 扫描仪进行数据采集, 采用包含点云去噪、配准与建模的完整技术流程, 构建了两种典型地下空间的三维模型。模拟矿井模型呈现均匀规整的网格分布, 而地下溶洞模型则展现出高密度精细化的网格特征, 这种差异准确反映了人工矿井与自然溶洞的本质区别, 验证了基于激光点云的建模方法对不同类型地下空间的可行性和实用性。研究表明, 三维激光扫描技术能够有效支撑地下空间的高精度三维重建, 为地下工程数字化建设与智能化管理提供可靠技术支撑。

关键词: 三维激光扫描技术; 地下空间; 三维建模; 点云处理; 数字化建设

Research on 3D Reconstruction Methods of Underground Space Based on Laser Point Clouds

Yilong Zhao¹, Yongkang Li¹, Baoxin Zhu^{2,*}, Hao Wu¹, Xiangjun Cheng¹, Ronghui Zhu¹

1. Shandong University of Science and Technology, College of Geodesy and Geomatics, Qingdao,

Shandong, 266590, China

2. Operation and Management Department of Shanjin Mining Co., Ltd. in Songxian County, Luoyang,

Henan, 471400, China

Abstract: With the increasing importance of underground space development in optimizing territorial resource allocation, the limitations of traditional surveying methods in complex underground environments have become increasingly evident. This study addresses the challenge of traditional methods in meeting high-precision modeling requirements for complex underground spaces by investigating simulated mine tunnels and underground karst caves using 3D laser scanning technology. Through data acquisition with handheld SLAM scanners and a comprehensive technical process including point cloud denoising, registration, and modeling, 3D models of two typical underground spaces were constructed. The simulated mine model exhibits a uniform and regular grid distribution, while the underground karst cave model demonstrates high-density refined grid characteristics. These differences accurately reflect the fundamental distinctions between artificial mines and natural caves, verifying the feasibility and practicality of laser point cloud-based modeling methods for different types of underground spaces. The research demonstrates that 3D laser scanning technology facilitates high-precision 3D reconstruction of underground spaces, providing reliable technical support for digital construction and intelligent management of underground engineering.

Keywords: 3D laser scanning technology; underground space; 3D modeling; point cloud processing; digital construction

随着地下空间开发成为提升国土资源配置和保障基础设施建设的战略重点，地铁、管廊、人防工程等地下结构已成为支撑城市运行与国家安全的重要载体。这些工程结构复杂、分布密集，对空间信息管理的全面性与精准性提出了更高要求^[1]。

然而，地下结构隐蔽、环境复杂、改造频繁，导致空间信息更新滞后，普遍存在信息孤岛与数据一致性问题，制约建模精度与跨部门协同效率。传统测量方法如人工测量与静态扫描效率低、覆盖有限，难以实现全空间连续感知与动态更新，无法满足数字化、智能化建模对高精度与高现势性的需求^[2]。

三维激光扫描技术作为突破地下信息采集瓶颈的关键路径，通过高速激光测量无损获取高精度、高密度点云数据，具有高效率与强真实感的优势。该技术不仅能实现地下场景完整数字化复刻，还能与移动平台、物联网、BIM 等技术集成，构建动态更新的地下空间信息模型，为规划设计、智能运维与安全应急提供统一可靠的数据基础，有力支撑地下空间高质量建设与精细治理^[3]。

1 三维激光扫描技术

1.1 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术是现代测绘领域的一项革命性技术，其核心是一种基于激光测距原理的非接触式、高精度空间信息获取方法^[4]。该系统通过高速激光扫描，自动、快速地捕获目标物体表面海量密集点的三维空间信息（包括坐标、反射强度等），并以“点云”的形式进行记录，最终通过后期处理真实重构出被测物体的精确三维模型。

在获取单个点的距离 S 后，扫描仪通过其精密的角距控制系统，同步记录下此刻激光束的水平方向角 α 和垂直方向角 β 。由此，每一个扫描点相对于仪器中心的三维坐标(X,Y,Z)即可通过空间几何解算得出^[5]，将所有点的空间信息以点云的形式记录下来，原理如图 1 所示。

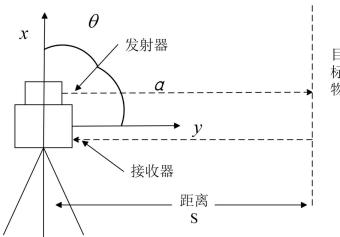


图 1 点位坐标计算原理

Fig. 1 Principle of Point Coordinate Calculation

1.2 三维激光扫描技术应用于地下空间的优势

三维激光扫描技术凭借其毫米级精密测量能力，为地下空间提供了高精度、完整的数据基础，有效保障工程分析与安全评估的准确性；该技术通过自动化快速采集与处理，显著提升了从数据获取到模型生成的效率，支撑了大范围场景的快速建模与科学决策；其非接触测量特性使作业人员能够远离危险区域，有效保障测绘安全，并克服了陡立、狭窄空间中传统方法实施困难的难题；此外，该技术展现出广泛的场景适应性，可通过针对性方案灵活应用于矿山、隧道、溶洞等多种地下环境，为复杂地下空间探测与建模提供关键技术支撑^[6]。

2 地下空间三维重建

2.1 实验数据概述

本研究选取地下模拟矿井与溶洞两类典型地下空间作为实验场景，以评估三维激光扫描技术在不同复杂度环境下的适应性。模拟矿井具有规则几何形态与人工结构，如巷道与支护设施，细节繁复且存在工况干扰；溶洞为天然地质空间，形态高度不规则，涵盖钟乳石、起伏地表与交错洞厅等复杂地形。通过对比分析两类场景，可系统评估三维激光扫描技术在人工结构化与天然非结构化环境中的数据获取质量、重建精度及适用性。

2.2 整体技术路线

本研究采用的技术路线系统性地涵盖了从数据采集到处理的全过程。外业工作始于实地踏勘，据此规划最优扫描路径，并采用移动激光扫描设备获取即时定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping, SLAM）原始数据^[7]。内业处理首先对原始点云进行去噪与抽稀，旨在提升数据质量；随后通过精确配准，旨在构建统一、完整的三维空间数据集；最终借助 Geomagic Studio 软件构建三维模型，并对其进行全面的精度验证与分析。整体技术路线如图 2 所示。

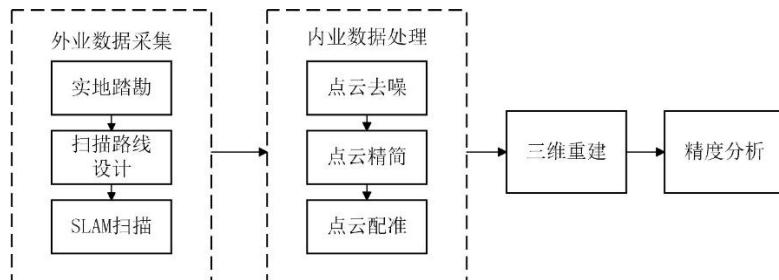


图 2 技术流程图

Fig. 2 Technical Flowchart

2.3 外业数据采集

在开展实地数据采集前，首先需对目标地下空间进行现场踏勘，掌握其整体结构与环境特征。针对性地规划扫描路径^[8]。对于结构规则、巷道交错的地下模拟矿井，宜设计包含多重闭合回环的扫描路线，以有效抑制 SLAM 轨迹误差的累积；而对于形态复杂、细节丰富的地下溶洞，则应在钟乳石、窄缝、陡坡等关键区域采取缓慢移动、多角度指向式扫描的方式，确保精细特征的完整捕捉与点云连续性。

2.4 内业数据处理

2.4.1 点云去噪精简

在地下模拟矿井与溶洞场景中获取的原始点云数据，常因环境复杂性而存在噪声干扰与密度不均问题。模拟矿井中运行的设备、移动人员以及支护结构表面附着物易引入动态噪声点；而溶洞内的悬挂滴水、空中浮尘、生物活动等自然因素，也会在点云中形成大量杂散点^[9]。这些干扰会严重影响后续建模的精度与可靠性。为提升数据质量，需对原始点云进行去噪处理，剔除不属于空间结构的异常点，去噪前后对比如图 3 所示。

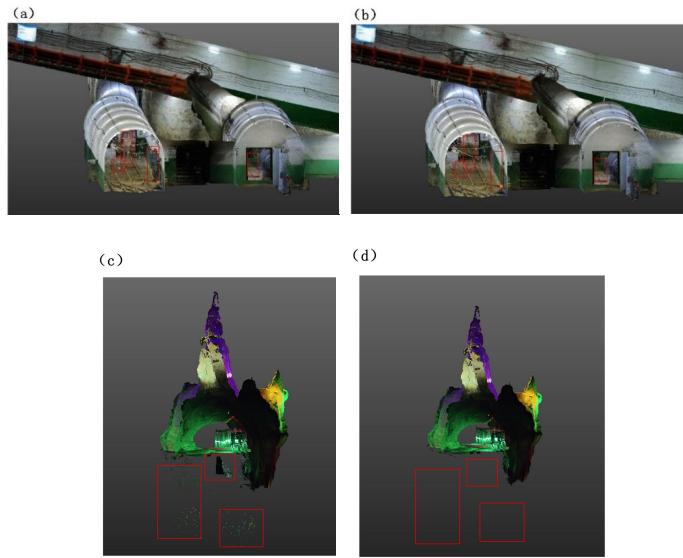


图3 点云去噪前后对比

Fig. 3 Comparison Before and After Point Cloud Denoising

为进一步平衡模型精度与计算效率，还需对点云进行抽稀处理。在结构规整的矿井巷道区域，可设置较高的抽稀密度以提升处理速度；而在溶洞的复杂形态区域及关键地质构造处，则应降低抽稀率，保留更多点云细节，确保三维模型在保持真实感的同时具备合理的几何轻量化水平。

2.4.2 点云配准

点云配准的核心原理在于实现不同坐标系下点云数据间的空间对齐。其中多次扫描获取的点云通常存在部分重叠区域。在这些重叠区域内，可以识别出一组具有空间对应关系的特征点，即“同名特征点”，分别记作来自第一个点云的 P_i 和第二个点云的 P_j 。为将两片点云统一至同一坐标系，需构建一个能够描述从源点云到目标点云坐标变换的变换矩阵 T 。在模拟矿井巷道或形态不规则的地下溶洞场景中，点云配准常采用刚体变换模型^[10]。该模型假设点云在变换过程中仅发生整体平移与旋转，而内部结构保持不变，从而保持点间距不变。刚体变换的数学表达为：

$$P_j = T \cdot P_i + t \quad (1)$$

式中， P_i 为源点云中的点， P_j 为目标点云中的对应点， T 为旋转矩阵， t 为平移向量。

通过求解并应用 T 与 t ，可将源点云中的各点转换至目标点云坐标系，实现如矿井巷道连接段及溶洞交汇区域等关键部位的高精度空间对齐。

2.4.3 点云建模

点云建模是将三维离散点云转化为结构化模型，进而生成可用于分析、仿真与制造的数字模型的关键技术。在该领域中，Geomagic Studio 作为一款专业逆向工程软件，具备将点云快速转换为高精度多边形网格，并进一步优化为工业标准非均匀有理 B 样条（Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS）曲面的能力^[11]。

将 Geomagic Studio 应用于模拟矿井巷道与地下溶洞建模，其技术价值显著。该软件能有效应对结构复杂、遮挡严重、点云缺失与噪声多等挑战，依托其强大的点云处理与网格编辑工具，通过滤波与封装快速重建出连续逼真的三角网格表面。如图 4 所示，针对矿井内人工结构（如支护与轨道），

可采用曲面拟合生成规整模型；对于溶洞内高度不规则的钟乳石、石笋等喀斯特地貌，则借助“精确曲面”模块生成符合地质形态的NURBS曲面，有效保留自然特征。所建模型不仅为地下空间数字化存档与可视化提供数据基础，还可直接支撑矿井安全分析、溶洞发育研究及工程规划等应用。

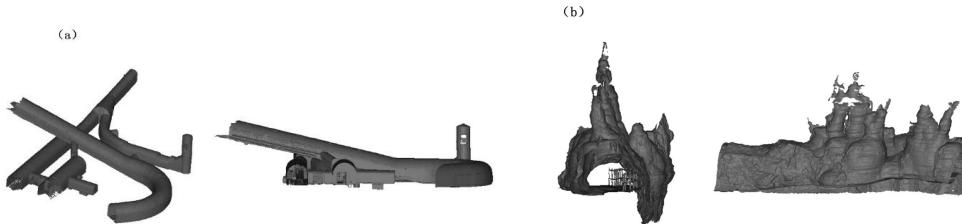


图4 点云建模结果

Fig. 4 Point cloud modeling results

3 建模结果分析

本章系统分析基于 Geomagic Studio 软件对模拟矿井和地下溶洞两类地质结构所建模型的质量指标，评估基于激光点云构建地下空间三维模型的精度和适用性^[12]。

3.1 模型规模与结构特征分析

如图5所示，模型规模分析结果表明两类模型结构特征差异显著。模拟矿井模型顶点数为 1.485×10^6 个，三角面片 2.798×10^6 个，总面积达 2213.03 m^2 ；而地下溶洞模型虽顶点数略多（ 1.627×10^6 个），三角面片更多（ 3.246×10^6 个），但总面积仅为 641.43 m^2 ，约为矿井模型的29%。

这一差异反映出两类地质结构的本质区别：模拟矿井为人工开挖结构，形态规则连续、表面平整，故在相近顶点数下可覆盖更大表面积；地下溶洞作为自然喀斯特地貌，结构复杂，孔洞发育、表面凹凸，致使其表面积较小而几何复杂度更高。

顶点密度指标进一步验证该特征：溶洞模型顶点密度达 $2536.86 \text{ 个}/\text{m}^2$ ，是矿井模型（ $671.07 \text{ 个}/\text{m}^2$ ）的3.78倍，表明其单位面积内包含更多几何细节，更能准确刻画自然溶洞的复杂表面形态。

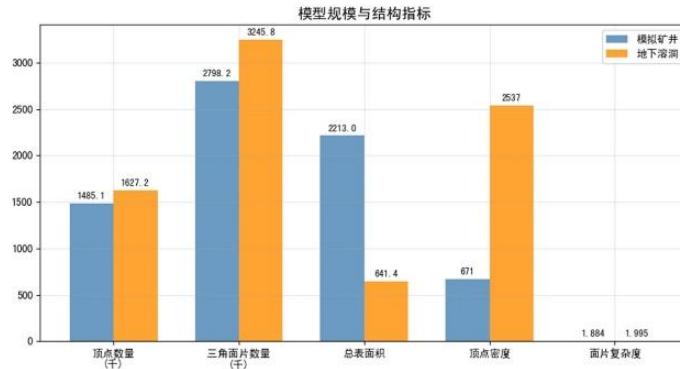


图5 模型规模与结果特征分析

Fig. 5 Analysis of Model Scale and Result Characteristics

3.2 面片几何特征与质量评估

如图6所示，两类模型在面片几何特征上呈现显著差异。地下溶洞模型的平均面片面积为 $1.98 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，仅为模拟矿井模型（ $7.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ）的25.0%；其平均边长为 $2.0718 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，也明显小于矿井模型的 $4.1865 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，说明溶洞模型采用更小、更密集三角面片以刻画其复杂几何形态。

面片面积变异系数方面，地下溶洞模型为0.816，高于模拟矿井的0.578，反映其面片大小分布

更不均匀，符合自然溶洞表面几何变化剧烈之特征。相比之下，矿井模型面片分布均匀，与其规则人工结构一致。

两模型在面片复杂度指标上相近（矿井 1.884，溶洞 1.995），表明二者三角面片形状规则性相当，网格质量均较优，体现了基于激光点云构建不同地质模型时的稳定性。

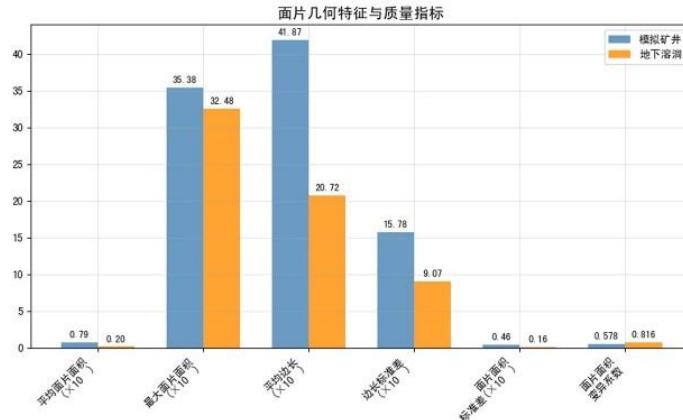


图 6 面片几何特征与质量评估

Fig. 6 Geometric Features and Quality Assessment of Noodles

4 结论

本文通过系统研究三维激光扫描技术在地下空间三维重建中的应用，得出以下主要结论：

(1) 三维激光扫描技术有效突破了传统地下空间测绘的技术瓶颈，其高精度、高效率的非接触测量特性为复杂地下环境提供了完整可靠的空间信息获取方案。

(2) 建模实验表明，基于激光点云建模对人工规则结构与自然复杂结构均表现出良好的适应性。模拟矿井模型呈现均匀规整的网格分布，而地下溶洞模型则展现出高密度精细化的网格特征，准确反映了不同类型地下空间的本质差异。

(3) 面片质量分析验证了基于激光点云构建地下空间三维模型的稳定性，在保持相近面片复杂度的同时，能够有效捕捉不同结构的几何特征，为地下空间数字化建设提供了可靠的技术支撑，推动地下空间开发利用向精细化、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 陈燕美. 城市地下空间测绘与三维建模关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (25): 198-200.
- [2] 李瑞芬. 基于移动激光扫描的城市地下空间动态建模与更新方法分析[J]. 电子技术, 2025, 54(06): 380-382.
- [3] 张倩斯. 基于三维激光扫描与 BIM 技术的地下空间三维建模技术探究[J]. 新城建科技, 2024, 33(08): 10-12.
- [4] 杨成坡, 刘顺, 牛向波, 等. 三维激光扫描技术在地下空间测量中的应用研究[J]. 电力勘测设计, 2025, (S1): 37-42.
- [5] 郑理科, 王健, 李志远, 等. 一种局部最优邻域法向量估算的巷道点云去噪方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(04): 140-148+171.
- [6] 黄东锋, 杜艳忠. 三维激光扫描技术在新型地形测绘中的应用探究[J]. 新疆有色金属, 2025, 48(01): 84-86.
- [7] 吴海明, 杜朋卫, 周芳玲, 等. 地下空间三维建模方法研究及应用[J]. 北京测绘, 2025, 39(06): 769-775.
- [8] 刘学人, 刘康, 王安妮, 等. 视觉 SLAM 技术在室内三维重建中的应用[J]. 测绘技术装备, 2023, 25(04): 77-80.
- [9] 齐智宇, 王健, 赵艺龙, 等. 基于改进空间密度聚类的电力线自动提取[J]. 应用激光, 2025, 45(02): 141-147.
- [10] 李燕. 一种改进 ICP 点云配准方法的研究[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(03): 23-29.
- [11] 张晓敏, 朱煜捷, 刘龙奎, 等. 基于 Geomagic Studio 的石窟寺三维数字化重建[J]. 城市建筑, 2022, 19(12):

171-174.

- [12] 张前, 王健, 齐智宇, 等. 改进 Crust 算法的点云复杂曲面精细化三维重建[J]. 激光与红外, 2024, 54(12): 1827-1833.

基金项目: 山东省自然科学基金, 基于 LiDAR 技术的城市地下空间安全监测关键技术研究 (ZR2023MD027)。

¹ **第1作者简介:** 赵艺龙 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地质测绘。 E-mail: zyl16315450@163.com。

* **通讯作者简介:** 朱宝新 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 点云建模。 E-mail: z15634137692@163.com。