

三维激光扫描技术在地下人防工程三维重建中的应用

闫阳阳, 王强昆, 王耀鑫

机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年12月7日; 录用日期: 2024年12月30日; 发布日期: 2025年1月7日

摘要

本文研究了三维激光扫描技术在地下人防工程三维重建中的应用, 通过对某地下人防工程的扫描与数据处理, 详细分析了数据采集、点云处理、模型重建等过程, 展示了三维激光扫描技术在复杂地下环境中的优势。结果表明, 三维激光扫描技术能够高效、精确地获取地下工程的结构信息, 生成的三维模型具备良好的精度和完整性, 适用于工程设计、施工及后期维护。

关键词

三维激光扫描技术, 地下人防工程, 点云处理, 三维重建

Application of 3D Laser Scanning Technology in 3D Reconstruction of Underground Civil Air Defense Projects

Yangyang Yan, Qiangkun Wang, Yaixin Wang

China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 7th, 2024; accepted: Dec. 30th, 2024; published: Jan. 7th, 2025

Abstract

This paper studies the application of 3D laser scanning technology in 3D reconstruction of underground civil air defense projects. Through scanning and data processing of a certain underground civil air defense project, the data acquisition, point cloud processing, model reconstruction and other processes are analyzed in detail, demonstrating the advantages of 3D laser scanning technology in complex underground environments. The results show that 3D laser scanning technology can efficiently

and accurately obtain the structural information of underground projects, and the generated 3D model has good accuracy and integrity, which is suitable for engineering design, construction and later maintenance.

Keywords

3D Laser Scanning Technology, Underground Civil Air Defense Project, Point Cloud Processing, 3D Reconstruction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下人防工程是城市安全防护体系中的重要组成部分, 具有复杂的空间结构和特殊的环境要求。传统的工程测量技术在地下环境中的应用受到诸多限制, 如测量精度不高、数据获取速度较慢。三维激光扫描技术以其高精度、非接触、快速获取空间信息的特点[1], 在地下人防工程的三维重建中具有广泛的应用前景。三维激光扫描技术不仅可以精确获取复杂结构的点云数据, 还能通过点云拼接生成完整的三维模型[2], 为地下工程的设计、施工以及后期维护提供可靠的技术支持[3]。本文的研究目标是探索三维激光扫描技术在地下人防工程中的三维重建应用, 为地下空间的可视化管理和结构安全性评估提供参考。

近年来, 三维激光扫描技术在建筑、古建筑保护、地质勘探等领域取得了显著成果。尤其是在地下空间工程中, 三维激光扫描技术能够有效克服传统测量方式的不足, 实现对复杂环境的精确扫描[4]。国内外已经有许多关于三维激光扫描技术在隧道工程、地铁建设等领域的研究, 但在国内, 针对地下人防工程的应用研究尚处于起步阶段[5], 尤其是基于激光扫描的三维重建技术, 仍有进一步发展的空间[6]。本文的研究目标是通过三维激光扫描技术, 对某地下人防工程进行三维重建, 分析其数据采集、处理以及模型构建的流程, 展示三维重建的精度与效果, 并讨论该技术的实际应用价值与挑战。

2. 三维激光扫描技术原理

三维激光扫描技术是通过激光测距原理获取物体表面的空间信息。扫描仪向目标发射激光束, 激光束遇到物体表面后反射回接收器, 设备根据激光飞行的时间差或相位差来计算目标点与扫描仪之间的距离。随着扫描仪在空间中旋转扫描, 成千上万个点的坐标数据被捕捉, 最终形成高密度的点云数据。

2.1. 地面三维激光扫描原理

地面三维激光扫描技术是基于地面固定站的一种通过发射激光获取被测物体表面三维坐标、反射光强度等多种信息的非接触式主动测量技术。三维激光扫描由脉冲发射器、旋转棱镜、接收器、距离时间模块和控制器以及计算机等组成, 如图 1 所示。首先由激光发射器, 发射激光脉冲, 再由高速均匀旋转的棱镜将脉冲信号发射出去。同时控制器中的距离和时间模块, 记录激光脉冲信号。

三维激光扫描的原始数据主要包括: 脉冲信号的水平角和垂直角, 脉冲信号发射与接收的时间差, 同时计算发射器到被测物体的空间距离以及点云反射率等值。点云数据的三维坐标以仪器坐标系为参考, 如图 2 所示。

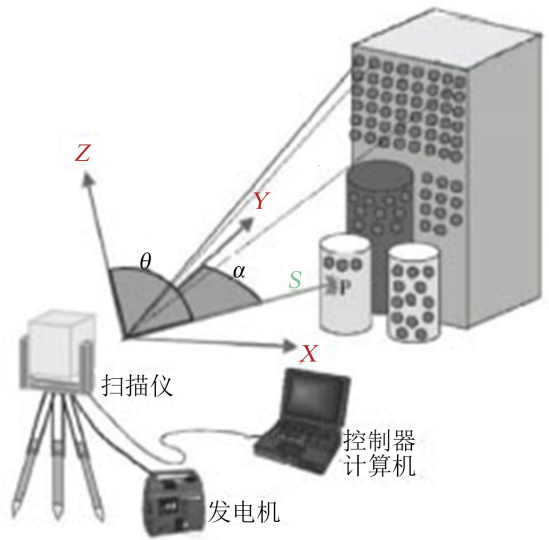


Figure 1. Composition of 3D laser scanning system
图 1. 三维激光扫描系统组成

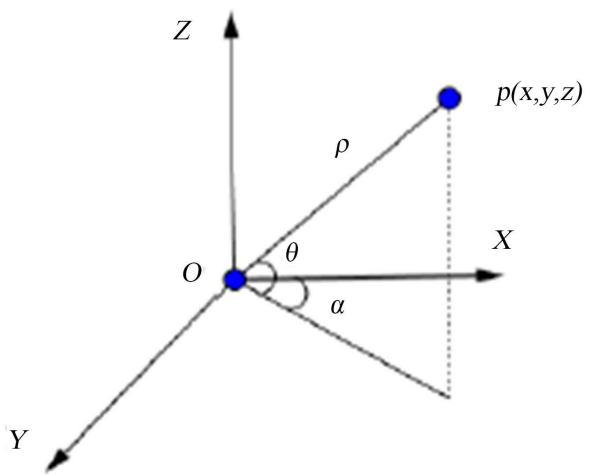


Figure 2. Instrument coordinate system
图 2. 仪器坐标系

图 2 中 O 为仪器中心对应坐标原点，Y 轴为仪器固定方向，Z 轴竖直向上且垂直于 Y 轴，X 轴垂直于 YOZ 平面。研究对象表面的三维坐标可以按照下式(1)，自动转换计算：

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha \\ y = \rho \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha \\ z = \rho \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

2.2. 三维激光扫描设备要求

- 1) 仪器的精度和测程符合实际工程的需要(见表 1)；
- 2) 仪器在检校合格有效期内(仪器校准有效期为 1 年，应送专门机构校准)；
- 3) 仪器使用的环境条件符合仪器使用说明书的要求；
- 4) 具有激光对中、双轴补偿功能的仪器作业前进行功能检查。

Table 1. 3D laser scanner parameter indicators
表 1. 三维激光扫描仪参数指标

项目	指标要求
扫描速度	最大测量速度 ≥ 50 万点/秒
测距噪声	≤ 0.5 mm @ 10 m
测距精度	1.5 mm @ 10 m, 2.4 mm @ 20 m
角度精度	$\leq 21''$ (垂直/水平)
补偿器类型	需要带有倾斜传感器或双轴补偿器。补偿范围 $\leq 2^\circ$

3. 地下人防工程三维重建流程

3.1. 外业数据采集

设备选择与优化: 由于地下人防工程空间狭小, 扫描距离有限, 精度要求高, 选择短距离高精度扫描仪。

扫描方案设计: 考虑到地下空间的复杂性(高湿度、低光照), 需要优化扫描路径、扫描密度以及扫描角度, 确保扫描数据的全覆盖、无死角, 避免数据遗漏或遮挡, 从而确保最终模型的精度和完整性。首先将地面控制点的坐标、高程, 使用传统测量方法传递至地下人防工程, 测量出人防工程内标靶的三维坐标成果, 作为数据起算基准。

3.2. 点云数据处理

点云配准: 地下空间形态复杂、遮挡问题严重和扫描位置的限制, 导致点云数据的配准难度较大, 本文采用人工拼接和融合全站仪观测数据来提高配准的准确性和效率。

噪声与异常点处理: 由于地下空间扫描环境的复杂性, 点云数据中可能会存在大量噪声和异常点。通过数据优化和点云重采样等技术降低噪声对最终三维模型重建的影响。

3.3. 三维模型重建与应用

针对地下人防工程的复杂性(如多个层次的地下空间、各种管道和设备的布局等), 通过精细化建模技术还原结构的复杂细节。利用点云数据与建筑信息模型(BIM)的结合, 进行更精确的三维建模, 尤其是对结构细节和设施设备的准确重建。

3.4. 精度评估

精度从两个角度进行评价: 空间精度和几何精度。空间精度通过评估点云数据的全局误差来衡量, 几何精度则是通过对比重建模型与实际地下结构的偏差进行评估。

位置精度: 通过点云数据与已知参考点之间的距离计算, 评估数据采集的定位精度。**几何精度:** 通过对三维模型与实际地下结构的几何形状进行比对, 测量重建模型的误差。**尺寸精度:** 评估模型中的线性和角度测量的精度, 包括地下结构的长度、宽度、高度及其内部设施的尺寸等。

精度评估方法: 点云配准误差: 通过最小化配准误差(如均方根误差)来评估数据配准的精度。模型与实地验证对比: 利用传统测量方法(全站仪)对照扫描数据, 进行精度验证。选取地下人防工程中具有已知尺寸和形状的部分进行对比分析。

4. 案例分析

4.1. 数据采集

本研究选取某城市地下人防工程进行三维激光扫描和重建。该工程位于市中心, 地下结构复杂, 涵

盖多个防护功能区。由于该工程已经投入使用，施工过程中需保持环境清洁，且不影响正常使用，因此选择三维激光扫描技术作为主要测量手段。三维激光扫描外业工作流程如图 3 所示。

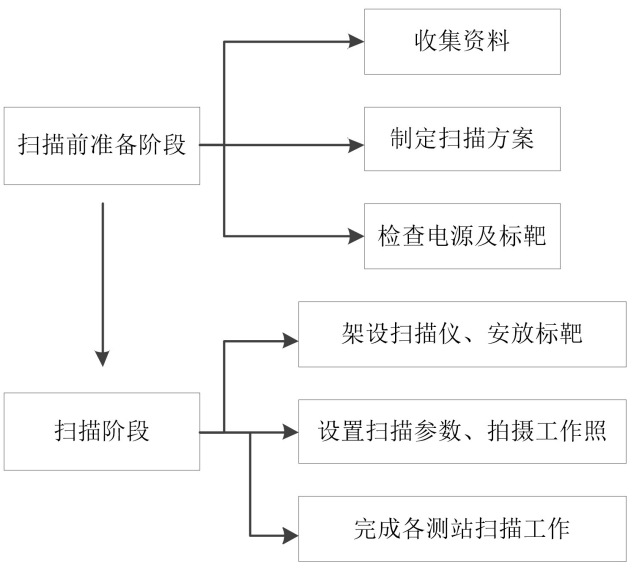


Figure 3. 3D laser scanning field workflow
图 3. 三维激光扫描外业工作流程

使用三维激光扫描仪的数据观测方法如下：在主隧道内，以 40 米为间隔设站，采用 360°扫描模式，每个硐室内设置一个观测站。用有明显空间立体特征的石膏模型代替三维激光扫描仪的标靶，每相邻测站内至少有 3 个相同的立体模型。点云扫描密度设置为 10 cm @ 50 米，由于设站密，相邻测站间有较大的重合数据，保证了对整个空间内部点云的密度。外业数据采集和地下空间点云如图 4 所示。



Figure 4. Data collection and underground space laser point cloud
图 4. 数据采集和地下空间点云

在实际操作中，使用 Leica ScanStation 激光扫描仪进行数据采集。考虑到人防工程的特殊结构，站点布置需考虑到每个功能区的空间特性，扫描覆盖范围需确保数据的完整性。整个扫描过程持续约两天，

累计采集数百万个点云数据。由于扫描时环境较为封闭，因此光线对激光的影响较小，扫描精度得到了保证。

4.2. 数据处理与配准

数据处理可以分为点云手动拼接、多站点调整、控制标靶坐标提取、点云数据导出。

1) 点云拼接

点云拼接采用手动拼接，原理为在两站数据间选取不在同一平面上的至少三个点，求取激光坐标系的转换参数，统一到同一坐标系下，如图 5 所示。

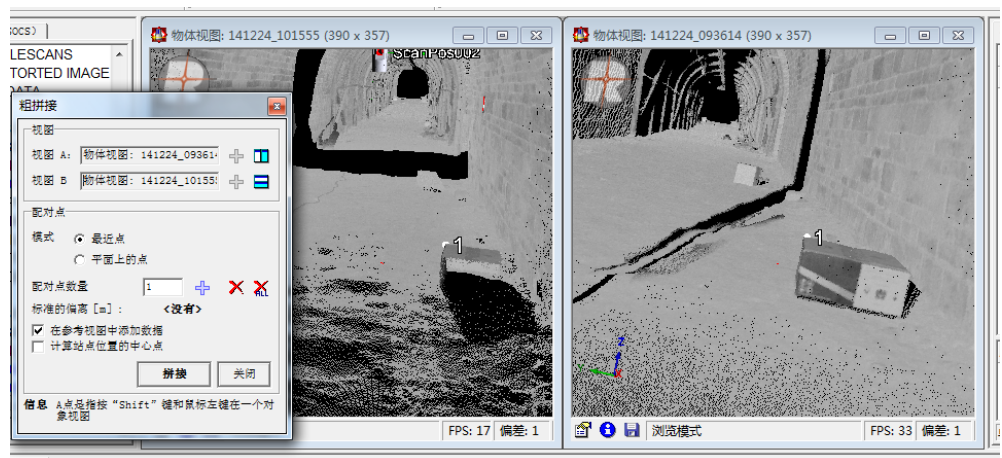


Figure 5. Same name point selection
图 5. 同名点选择

2) 点云配准

在进行多站点调整前，首先要确定两站数据间的分层到底有多大的误差，首先在两站共同区域减下一块区域，如图 6 所示。数据之间有明显的分层，因此要进行多站点调整。

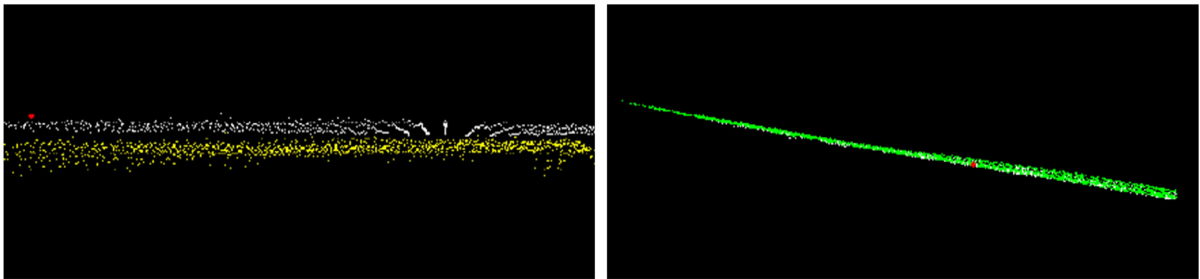


Figure 6. Point cloud registration
图 6. 点云配准

4.3. 多源数据融合

为了提高三维激光扫描模型的精度和可靠性，提出了结合多源数据的融合方法。结合激光扫描数据和全站仪实测标靶数据，采用实测数据对激光扫描数据进行纠正，弥补单一数据源的不足，提高模型的准确性和全面性，进一步提高地下工程复杂环境下模型的重建效果。

控制标靶采用的是圆形反光膜，属于反射强度较高的材质，在点云中易于识别和中心提取，另一种

为圆形环状黑白标靶，黑色反射强度低，白色反射强度较高，中心识别也易于实现，控制标靶的主要作用为点云数据拼接和精度评定。图 7 为两类控制标靶及对应点云图像。表 2 为各控制标靶坐标。

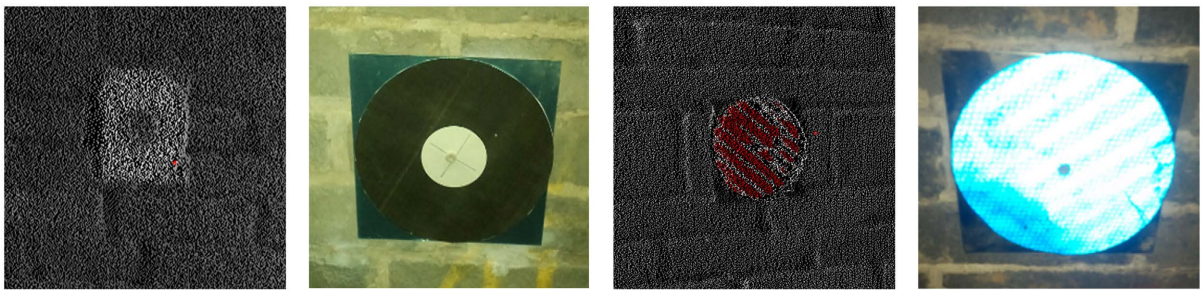


Figure 7. Control target and corresponding point cloud image
图 7. 控制标靶及对应点云图像

Table 2. Extracted control target coordinates
表 2. 提取的控制标靶坐标

点号	激光坐标系坐标/m			类型
	X	Y	Z	
1	7.902	-0.004	-0.488	黑白标靶
2	8.847	1.146	0.603	反光膜
3	21.245	4.612	0.059	黑白标靶
4	21.349	2.766	0.112	反光膜
5	33.287	5.037	-0.136	反光膜
6	33.221	7.045	-0.071	黑白标靶
7	47.306	8.871	1.002	黑白标靶
8	59.289	12.091	-0.043	反光膜
9	60.189	10.279	0.386	反光膜

4.4. 点云模型建立

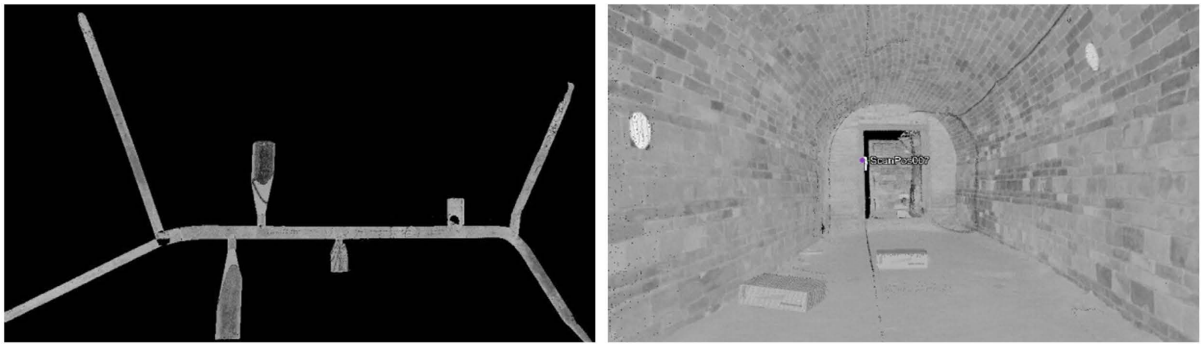


Figure 8. Overall point cloud model and local detail expression
图 8. 整体点云模型与局部细节表达

点云数据处理完成后，通过网格化生成三维模型，该过程是将离散的点云转化为连续的表面。网格

生成算法为 Delaunay 三角化和 Poisson 表面重建。在地下人防工程的应用中, 结合纹理映射技术, 将拍摄的照片与点云结合, 生成更具现实感的三维模型。

根据应用需要, 将试验场地数据导出各种格式的坐标, 以便建立精细的地下三维空间模型, 提取控制点坐标等。点云可以导出包括 ID、X、Y、Z、方位角、RGB、反射率等信息, 数据之间的分隔符可以选择空格、分号、逗号和自定义等, 方便用户对数据的二次利用。所建立的整体点云模型及局部细节如图 8 所示。

通过点云数据的处理和拼接, 成功生成了该人防工程的三维模型。模型精度达到了毫米级, 能够清晰反映工程的各类结构细节。在对比传统测量方法时, 三维激光扫描的优势在于其能够快速获取复杂结构的完整数据, 且无需多次布站。此外, 通过对模型的精度分析, 三维激光扫描的重建误差控制在允许范围内, 满足了工程设计和后期维护的要求。

4.5. 精度评价

数据采集使用 Riegl VZ-1000 地面三维激光扫描仪, 其能完成高速、高分辨率、高精度三维测量, 主要参数如下: 扫描可达 1400 m; 扫描精度: 5 mm (100 米距离处, 一次单点扫描); 扫描视场范围: $100^{\circ} \times 360^{\circ}$ 。在采集数据时, 采用了密集点云的参数设置, 保证了最稀疏点云间隔小于 2cm 的点云密度, 整个空间都由密集点云均匀覆盖。使用专业点云拼接软件 RiScan 进行拼接, 使拼接测站间点云拼接精度控制在 3 mm 以内。

对所获取的密集点云模型, 能获得更高的相对表面精度, 从已有研究成果, 在假设单点不存在误差的情况下, 点云模型任意点的内插精度为点云距离的 $1/3 \sim 1/10$, 也就是说, 任意点的相对精度为 2~7 mm。

点云模型误差主要包含三个方面: 点云自身测量误差、拼接误差和任意点内插的误差, 分别取 5 mm、3 mm、7 mm, 则任意点的总误差为 9.1 mm。因此可以认为, 所获得的点云模型的整体精度优于 10 mm。

5. 结束语

三维激光扫描技术凭借其高精度、高效率和非接触式数据采集的特点, 特别适合在地下人防工程三维重建中应用。相比于传统的测量方法, 激光扫描技术能够大大减少人为操作误差和时间成本, 提高整体工程的施工质量与效率。三维激光扫描技术也存在一定的局限性, 扫描过程中会受到环境因素(如光线、尘土等)的影响, 导致点云数据的噪声和不完整性, 激光束可能因遮挡而无法全面获取数据, 影响最终建模的精度。三维激光扫描技术产生的数据量巨大, 如何高效处理和存储这些点云数据, 以及如何实现点云数据的自动化处理和智能化分析, 是当前技术应用中的一大挑战。

三维激光扫描技术能够提供高精度的点云数据, 通常误差在厘米级别, 尤其在测量大范围的地下结构时, 激光扫描显示出了明显的优势。然而, 重建的精度仍然会受到点云数据质量、处理算法和外部环境等多种因素的影响。为了进一步提高重建模型的精度, 需要优化点云配准、噪声滤除等处理步骤, 并结合多源数据进行校正和优化。

随着数字化建设的深入发展, 三维激光扫描技术在地下人防工程中的应用将不断拓展。未来, 基于三维激光扫描的地下人防工程数字化建模不仅仅局限于三维重建, 更将扩展到信息管理、智能运维等领域。通过结合 BIM(建筑信息模型)技术, 三维激光扫描数据可以与工程的设计、施工、运营和维护阶段的数据进行无缝连接, 为工程提供全生命周期的数字化支持。

参考文献

- [1] 王海燕, 李金红, 刘阳阳. 基于激光扫描技术的三维建模方法研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 102-107.
- [2] 刘杰, 陈朝晖. 三维激光扫描技术及其在复杂地形测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(3): 80-83.

-
- [3] 李强, 王力. 地下空间的三维激光扫描应用研究[J]. 工程勘察, 2019, 37(2): 64-69.
 - [4] 张伟, 陈建. 基于三维激光扫描的点云数据处理与重建技术[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 15-21.
 - [5] 李峰, 韩露. 三维激光扫描技术在地下工程中的应用进展[J]. 岩土力学与工程, 2022, 53(4): 48-53.
 - [6] 张建军, 孙伟. 三维激光扫描技术的原理与应用综述[J]. 现代测绘, 2019, 36(1): 45-50.