

给定精度条件下三维激光扫描距离及有效覆盖范围选取方法

陈嘉鑫¹, 王彤², 张培君³, 王丽萍^{1*}

¹重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

²新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐

³上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年1月6日; 录用日期: 2026年1月30日; 发布日期: 2026年2月6日

摘 要

针对三维激光扫描在给定精度条件下扫描距离及覆盖范围缺乏客观选取依据的问题, 提出一套基于标定试验与数据分析的三维激光扫描参数选取方法。以标准板矩阵为标定对象, 室内布置标靶球与标准板, 采用徕卡RTC360在1~4 m典型距离、近似正射条件下采集点云, 利用“同点多次测量平均 + 标准板四边尺寸误差平均”策略获取点位精度指标, 绘制不同距离下的点位精度分布图。将单站参数归纳为“扫描距离”和“有效覆盖范围”两个指标, 建立目标精度与推荐参数对应关系, 并给出 $\leq 2\text{ mm}$ 、 $2\sim 3\text{ mm}$ 、 $\geq 3\text{ mm}$ 三类精度需求的典型组合。进一步选取模拟装配构件端面对接特征开展验证, 在推荐扫描距离1 m条件下, 端面宽度(3个高度)与9条标贴长度的平均误差均控制在2 mm以内。算例表明, 该方法能揭示精度随距离和视场位置变化, 将参数选取由经验判断转化为可查询规则, 适用于预制构件、钢结构等具有精度要求的工程场景。

关键词

三维激光扫描, 扫描参数选取, 扫描距离, 有效覆盖范围, 尺寸检测

Method for Selecting 3D Laser Scanning Distance and Effective Coverage Range under Specified Accuracy Conditions

Jiaxin Chen¹, Tong Wang², Peijun Zhang³, Liping Wang^{1*}

¹College of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²Xinjiang Transportation Construction Group Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

³Shanghai Municipal Engineering Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

*通讯作者。

文章引用: 陈嘉鑫, 王彤, 张培君, 王丽萍. 给定精度条件下三维激光扫描距离及有效覆盖范围选取方法[J]. 建模与仿真, 2026, 15(2): 42-50. DOI: 10.12677/mos.2026.152032

Received: January 6, 2026, 2025; accepted: January 30, 2026; published: February 6, 2026

Abstract

To address the lack of objective criteria for selecting scanning distance and coverage range in three-dimensional laser scanning under specified accuracy requirements, a parameter selection method based on calibration experiments and data analysis is proposed. A matrix of standard plates is used as the calibration object, with target spheres and plates arranged in an indoor environment. Point clouds are acquired using a Leica RTC360 at typical distances from 1 to 4 m under approximately normal incidence. A two-stage averaging strategy, combining repeated measurements at the same point with averaging of dimensional errors along the four edges of each standard plate, is employed to obtain point-wise accuracy indices and derive accuracy distribution maps at different distances. Single-station parameters are then summarized into two indices, namely scanning distance and effective coverage range, and a correspondence is established between target accuracy and recommended parameter combinations for three accuracy levels of ≤ 2 mm, 2~3 mm and ≥ 3 mm. An end-face feature measurement test on a simulated assembly component is further conducted, showing that at the recommended 1 m distance, the average errors of the end-face width (three height levels) and nine tape-mark lengths are all within 2 mm. Case study results demonstrate that the method reveals the variation of accuracy with distance and field-of-view position, transforms parameter selection from empirical judgement into a queryable rule set, and is applicable to engineering scenarios such as prefabricated concrete components and steel structures with specified dimensional accuracy requirements.

Keywords

3D Laser Scanning, Parameter Selection, Scanning Distance, Effective Coverage Range, Dimensional Inspection

Copyright © 2026 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

近年来, 三维激光扫描(TLS)在装配式构件与钢结构尺寸核验中的应用迅速增长, 但扫描距离、入射角与表面反射特性对结果精度影响显著, 参数选择缺乏统一、可参考的准则仍是痛点[1]。面向工程约束的优化研究表明, 可将距离、角度、分辨率等变量纳入多目标框架, 兼顾精度与作业时间, 给出更具鲁棒性的参数组合[2]。在工程构件级与轨道工程中, 基于点云的尺寸快速检测与偏差评估已显示出效率与可追溯优势, 为“精度 - 参数 - 结果”的关联提供案例[3]。隧道场景的大范围应用进一步揭示了数据获取条件与几何精度的耦合关系: 一方面, 以 TLS 为核心的整体变形分析流程强调参考基准与多期对比的可比性[4]; 另一方面, 移动激光扫描(MLS)结合图像与强度等信息实现收敛直径的快速提取并通过测量对比验证精度[5]。在地铁运营巡检中, 移动式三维激光扫描与 AI 识别的结合显著提升了缺陷识别与流程效率, 也对最小站数、路径、满足精度指标的作业组织提出了量化依据[6]。面向构件高精度建模与尺寸核验, NURBS 等曲面拟合与特征提取为“从点到量”的指标生成提供了稳定管线[7]; 而在 GNSS 受限环境下, 通过靶标控制与多传感器约束可获得绝对坐标系下的高精度点云, 保证参数到结果映射的可落地性[8]。国际研究在扫描几何作用机制与多机型性能评估方面提供了方法学基底, 使扫描距离与入射角

度对点云质量的影响机理得到系统阐释[9]，多款 3D LiDAR 的性能差异亦被量化，为工程参数外推与设备选型提供参照[10]。在上述的研究基础上，本文提出一套在给定精度条件下确定扫描距离与有效覆盖范围的通用方法。通过标准化标定和多距离数据分析，建立目标精度与扫描距离、有效覆盖范围之间的映射关系，通过精度分布图直观呈现，形成可复现的参数选取准则，避免了人为选择扫描参数的主观性和盲目性造成的精度不达标问题，提高扫描作业的工作效率。技术路线图见图 1。

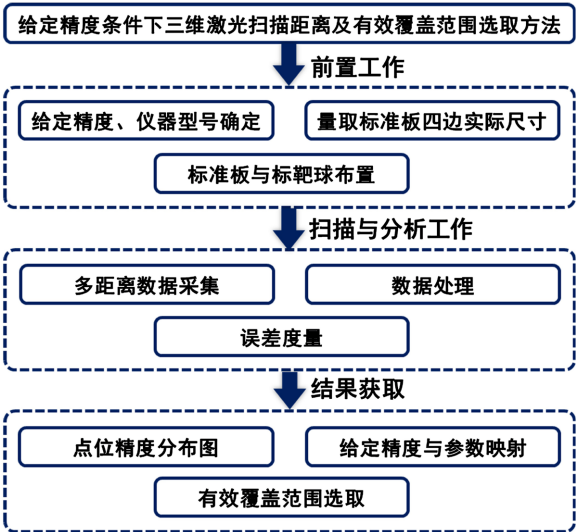


Figure 1. Technical workflow of the proposed method
图 1. 技术路线图

2. 标准板布置与扫描流程

为在工程条件下客观描述扫描精度，提出以标准板为度量单元，通过各点位标准板的平均尺寸误差来表征该点位误差。具体做法包含两次平均：其一，对相同点位进行多次独立测量，计算多次结果的平均值，用以削弱单次测量的随机波动；其二，在每次测量中取该点位标准板四条边的尺寸误差求平均，以减小单边局部噪声对结果的影响。两次平均后的数值作为该点位的代表性误差，能够有效降低偶然误差、提升统计稳定性与可比性，并为后续的距离映射、有效覆盖范围确定以及现场参数选取提供可靠输入。后续将通过示例介绍本方法。

2.1. 标准板布置

为获得稳定、可复现、可追溯的标定数据，场地布置的目的在于最大限度控制环境变量并建立统一的空间基准。通过规范化的标准板与标靶球布设，确保各点位误差可比较、可统计，并为后续参数映射提供可靠输入。

采用标准板作为标定目标，以降低镜面反射、保证几何稳定。示例规格为 300 mm × 300 mm × 20 mm，试验在室内无遮挡、无强气流、无直射光的浅色背景环境进行，以获得稳定回波与清晰边界。标靶球按三球一组布置，置于标定区域中心及两侧，三球等高；中心球用于统一坐标与瞄准，两侧两球用于配准与精度复核；当场地较长时可沿长向等距增设 1~3 组以增强全局约束。标准板按矩阵粘贴，示例为 15 × 7 行列，板间距 150 mm，矩阵中心与扫描视轴对正；粘贴方式采用背胶或磁吸，保证平整并便于拆装。本示例共粘贴 105 块标准板，可覆盖近距到中远距视场并表征由中心向边缘的精度梯度。以上配置仅为示例，可根据目标精度、设备型号与场地条件，灵活调整标准板尺寸与数量、板间距以及标靶球组数与

位置。三维建模图与示例试验照片见图 2(a)、图 2(b)。

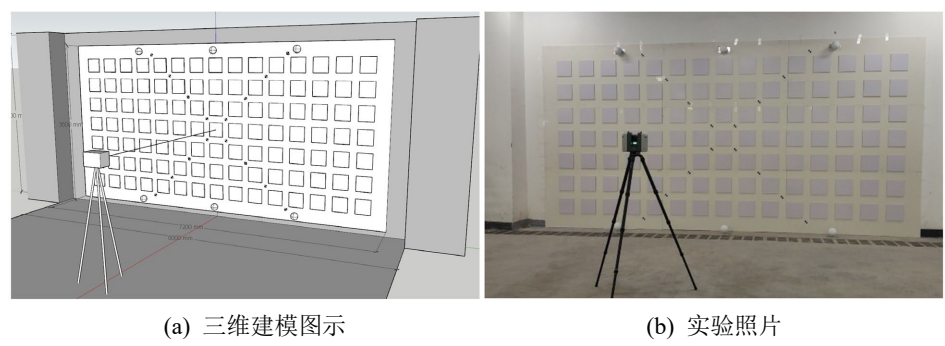


Figure 2. Layout of the standard plate array
图 2. 标准板布置示意图

2.2. 扫描方案制定

以徕卡 RTC360 型号的扫描仪作为示例，标定阶段在第 2.1 节的场地和布置条件下，固定设备型号和采集参数，设置若干典型距离，如 1 m、2 m、3 m、4 m，主站位视轴对准矩阵中心的标准板，以获得近似正射入射；为降低偶然误差，在保持距离不变的前提下，通过平移仪器依次对准与矩阵中心同高的标准板，见图 3 蓝色标记的板，建议每一典型距离扫描图中蓝色标准板不少于 10 个，各次保持分辨率和扫描模式一致。

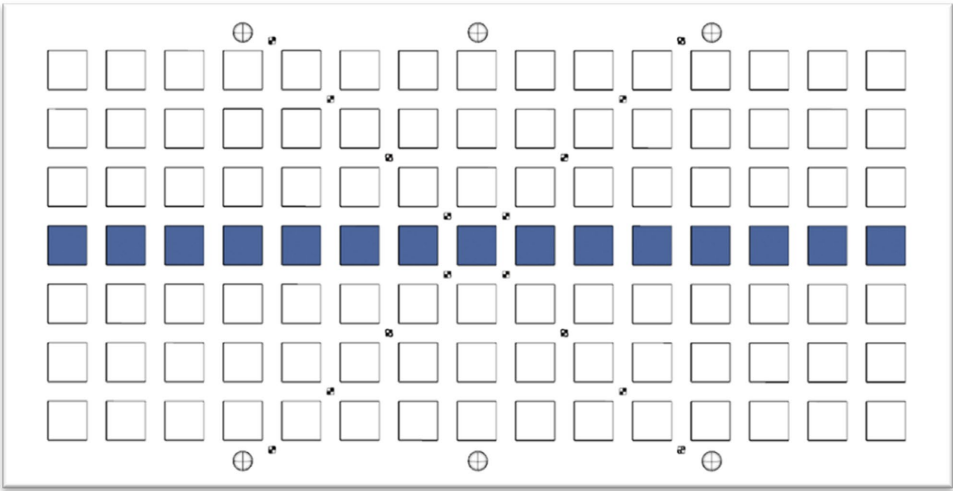


Figure 3. The scanner sequentially targets the blue plates for scanning
图 3. 扫描仪依次对准蓝色板扫描

2.3. 数据处理与精度分析

采集完成后，选取“*”方向的标准板作为精度标定对象，以反映从扫描中心向外发散的尺寸精度变化趋势，如图 4 高亮区域所示。获得点云数据后，对“*”方向的标准板点云进行边缘提取，通过 RANSAC 算法直线拟合以计算上、下、左、右四边的尺寸，而后将四边尺寸与真实测量值依次做差后平均，获得该点位标准板的单次平均误差。由于同距离扫描了至少 10 组相似的“*”，再将这至少 10 组的相同点位标准板的单次平均误差再做平均化，得到该扫描距离下的各点位标准板的平均精度。其中，对标准板四

边点云的拟合示意图见图 5(a)，四边尺寸计算示意图见图 5(b)。

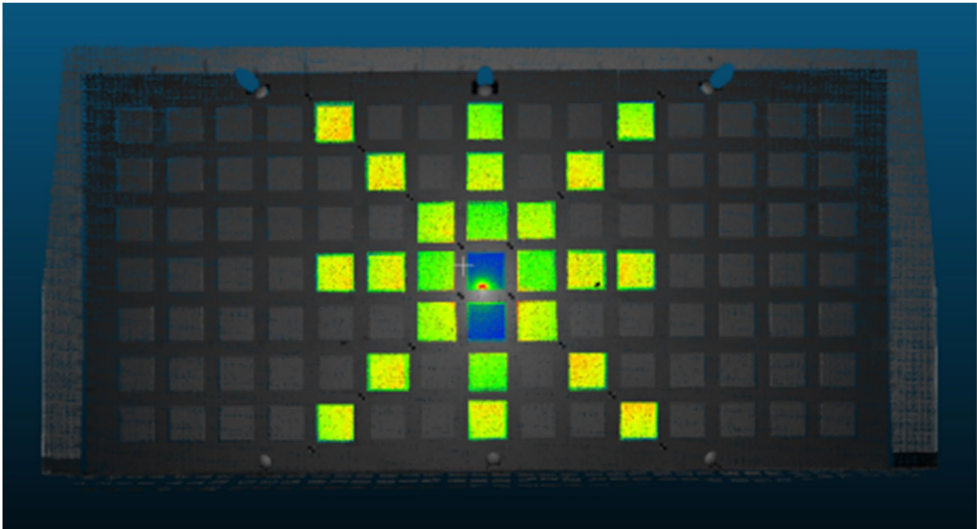


Figure 4. Standard plates along the “*” direction selected for dimensional accuracy analysis
图 4. 选取 “*” 点位的标准板进行尺寸精度分析

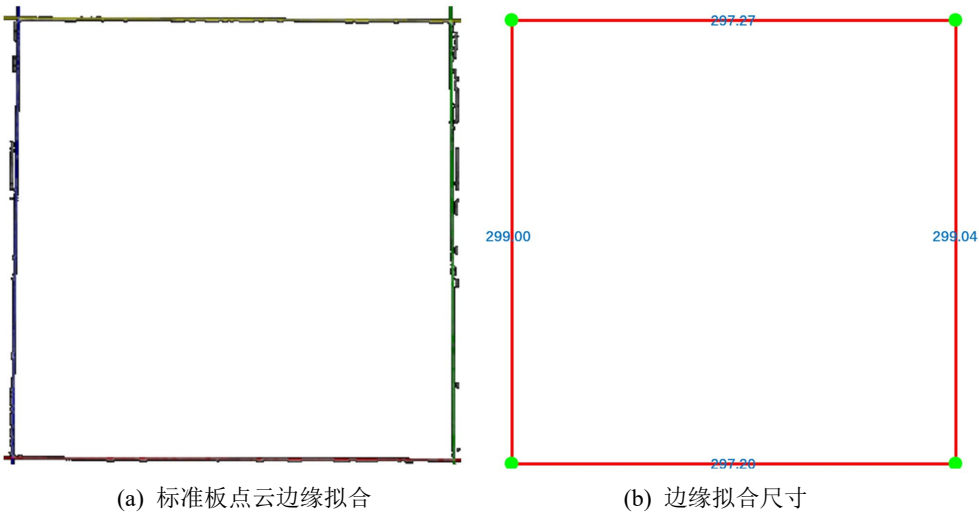


Figure 5. Example of dimensional analysis of standard-plate edge point clouds
图 5. 标准板边缘点云尺寸分析示例图

3. 点位精度分布图

参考 2.3 小节的流程，将 1 m、2 m、3 m、4 m 典型距离下的各点位标准板的平均精度映射到板阵平面，得到各扫描距离下点位精度分布图，见图 6，图中的数字代表该点位的尺寸精度误差，单位为毫米，通过从绿到红的颜色变化反映精度的变化。可以看出，随着扫描距离的增加，误差逐渐扩大，整体精度呈下降趋势。1 m 和 2 m 近距离条件下，中心区域的平均误差主要集中在 1.41 mm~3.14 mm 之间，表现出较高的精度和良好的稳定性，而边缘区域的平均误差明显偏大，大致在 2.31 mm~4.94 mm 之间。3 m 和 4 m 的较远距离下，绿色高精度区域明显减少，误差范围增大到约 3.63 mm~5.87 mm，表明扫描仪在远距离条件下的测量精度受到显著影响。

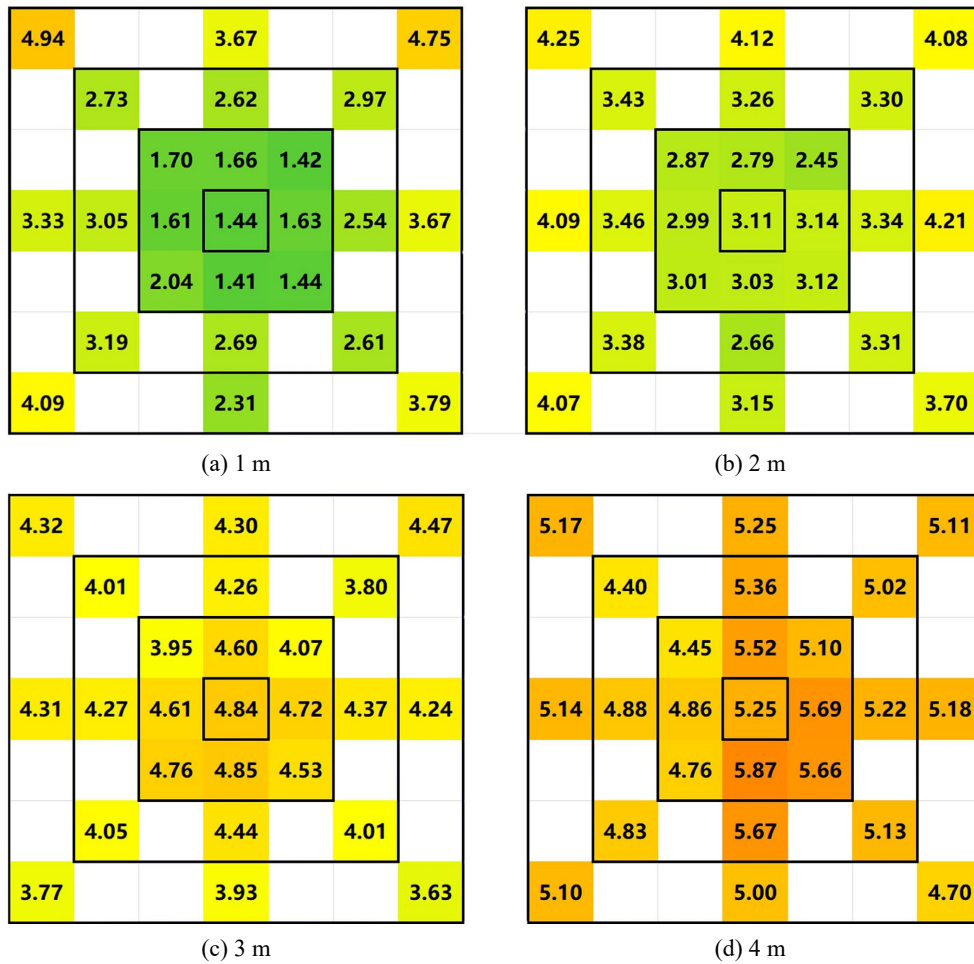


Figure 6. Point-wise accuracy distribution maps at typical scanning distances of 1~4 m
图 6. 1~4 m 典型扫描距离下点位精度分布图

4. 给定精度与参数映射

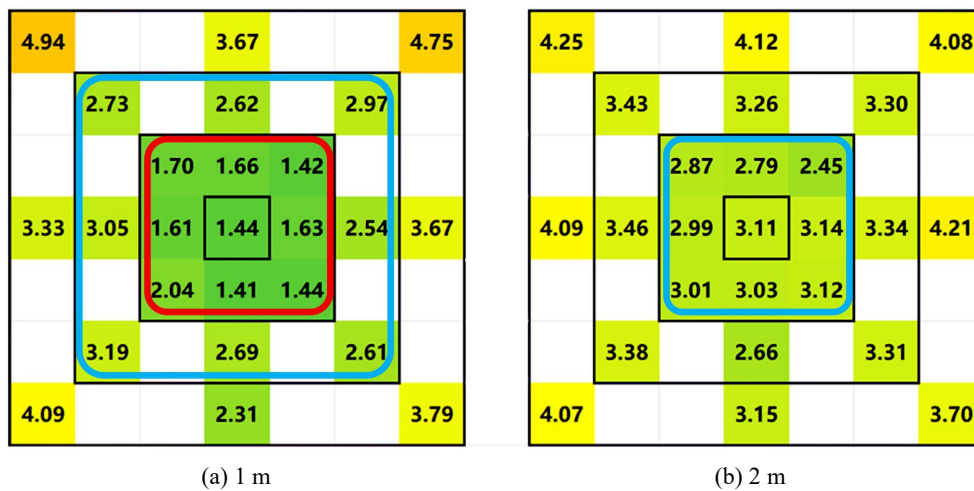


Figure 7. Selectable regions for high accuracy (red box) and medium accuracy (blue box)
图 7. 高精度(红框)和中等精度(蓝框)选择区域范围

为便于工程应用中按精度指标直接选取扫描参数,在点位精度分布的基础上,将单站扫描情况下的参数选取归纳为“扫描距离”和“有效覆盖范围”两个指标组合。以下针对徕卡 RTC360 型号三维激光扫描仪,作给定精度下的参数选取示例。

高精度需求(给定精度 $\leq 2\text{ mm}$):扫描距离建议控制在 1 m 左右,并选择红框所示区域范围,见图 7(a),此时有效覆盖范围为边长约 1.20 m 的正方形,可认为该区域内的点云尺寸精度均在 2 mm 内。

中等精度需求(给定精度 $2\sim 3\text{ mm}$):扫描距离建议控制在 1 m 左右,并选择蓝框所示区域范围,见图 7(a),此时该区域的范围为边长约 2.10 m 的正方形;或者扫描距离控制在 2 m 左右,并选择蓝框所示区域范围,见图 7(b),此时有效覆盖范围为 1.20 m 的正方形,可认为该区域的尺寸精度均控制在 $2\sim 3\text{ mm}$ 左右,为有效覆盖范围。

低精度需求(给定精度 $\geq 3\text{ mm}$):扫描距离可设置为 3 m 或以上,有效覆盖范围的正方形边长可扩大至约 3 m 以上,但边缘的误差较高,应当酌情考虑数据后处理。

5. 模拟装配构件端面对接特征尺寸精度验证

为验证所提出扫描参数选取方法在工程构件端面对接场景中的可用性,选取一类模拟装配构件开展端面特征尺寸精度验证。试验构件采用白色 PVC 板加工为 $4\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 长方体,并在端面布置一类可量测标识:贴附 9 条黑色标贴(用于标定不同高度的特征位置并形成长度测量对象)。试验场地为光照条件较好、地面平整的地下停车库,仪器采用徕卡 RTC360 三维激光扫描仪,扫描时保证端面均处于 2 mm 精度控制范围内,模拟构件见图 8(a),端面见图 8(b)。

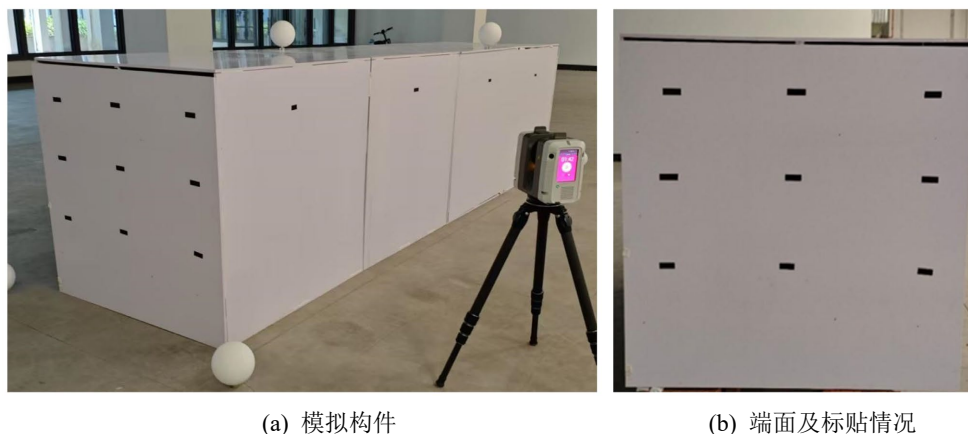


Figure 8. Simulated assembly component

图 8. 模拟构件情况

以目标精度为 2 mm 为例,根据前文扫描精度映射标定结果,当精度要求 $\leq 2\text{ mm}$ 时,扫描距离宜控制在 1 m 左右,此时单站高精度有效覆盖范围可近似为边长约 1.20 m 的区域,可满足端面特征尺寸测量的精度需求。因此,本节端面特征尺寸验证统一采用 1 m 扫描距离进行数据采集。端面宽度分别在 3 个高度位置进行测量,见图 9(a),同时对端面 9 条黑色标贴的长度进行测量;对应实测尺寸均采用钢尺获取。为降低偶然误差并提高结果的统计可靠性,在相同站位与参数条件下重复扫描 5 组端面点云数据,并对测量结果进行误差统计分析,端面及标贴点云见图 9(b),点云尺寸测量方法沿用 2.3 小节中点云尺寸拟合法。

其中,3 个高度位置的端面宽度点云的平均尺寸测量值与实际尺寸的对比见表 1,黑色标贴点云平均尺寸测量值与实际尺寸对比见表 2。

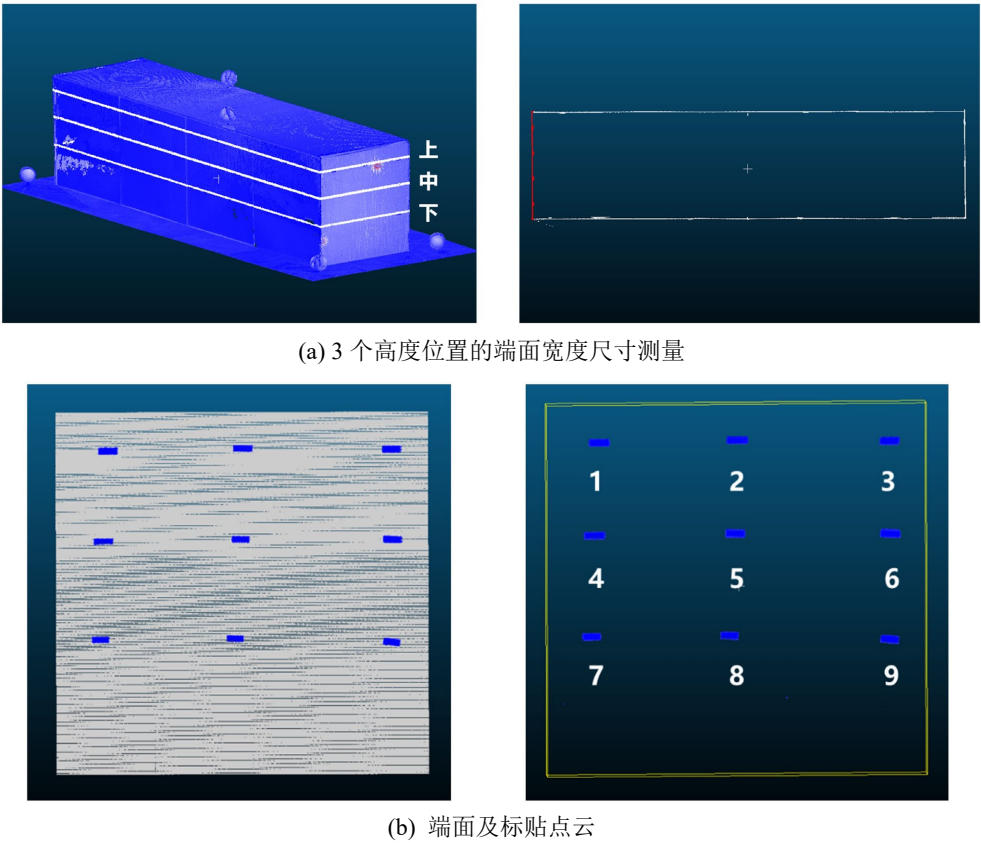


Figure 9. Schematic of end-face feature dimension measurements
图 9. 端面特征尺寸测量示意图

Table 1. Comparison of end-face width measurements at three height levels (unit: mm)
表 1. 3 个高度位置的端面宽度尺寸对比(单位: mm)

截取区域	实际尺寸	5 组点云平均尺寸	平均误差值
上	1001.00	999.86	-1.14
中	1000.80	999.30	-1.50
下	1000.80	999.49	-1.31

Table 2. Comparison of black tape-mark length measurements (unit: mm)
表 2. 黑色标贴尺寸对比(单位: mm)

标贴编号	实际尺寸	5 组点云平均尺寸	平均误差值
1	51.20	52.10	0.90
2	52.80	51.91	-0.89
3	48.00	46.93	-1.07
4	52.50	53.47	0.97
5	47.00	48.40	1.40
6	48.00	46.43	-1.57
7	44.90	43.75	-1.15
8	44.40	43.47	0.93
9	44.50	45.16	0.66

由表 1 与表 2 的对比结果可知, 在扫描距离控制为 1 m、并重复扫描 5 组端面点云的条件下, 端面宽度在三个高度位置的测量误差稳定, 黑色标贴长度的测量误差整体较小, 二者的平均误差均控制在 2 mm 以内。说明本文所提出的扫描参数选取方法能够满足工程构件端面对接特征尺寸测量的 2 mm 精度要求, 验证了该方法在端面装配场景中的可行性与有效性。

6. 结论

本文提出了一种在给定精度条件下三维激光扫描距离及有效覆盖范围的选取方法。通过标准板布置和典型距离标定, 采用“同一点位多次测量平均 + 四边尺寸误差平均”的策略获取点位精度指标, 绘制不同扫描距离下的点位精度分布图, 建立了目标精度与扫描距离、有效覆盖范围之间的对应关系。

以徕卡 RTC360 为例的算例表明, 该方法能够直观给出高精度、中等精度和低精度三类需求下的推荐扫描距离及单站覆盖尺寸, 将原本依赖经验的参数选取转化为可查询、可复现的规则。该流程适用于预制混凝土构件、钢结构等具有明确尺寸精度指标的场景, 可为工程现场快速制定三维激光扫描方案提供简明有效的参考。

此外, 针对工程端面对接场景开展了模拟构件验证试验。结果表明, 在目标精度为 2 mm 且扫描距离控制为 1 m 的条件下, 端面宽度(3 个高度位置)与 9 条黑色标贴长度的测量平均误差均小于 2 mm, 验证了本文参数选取规则在端面对接特征尺寸检测任务中的可行性与有效性。

基金项目

本研究受新疆维吾尔自治区“2+5”重点人才计划项目资金资助(项目名称: “新疆装配式桥梁设计与施工关键技术研究”)。

参考文献

- [1] 余萌, 程军龙, 朱锋, 等. 扫描几何条件对多线激光雷达点云质量的影响分析[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(3): 35-40.
- [2] 吴贤国, 邓婷婷, 黄金龙, 等. 基于 LSSVM-NSGA-II 的桥梁钢构件三维激光扫描方案优化[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(3): 1-7.
- [3] 李圆, 陈霄, 秦飞, 等. 三维点云在轨道板快速检测中的应用[J]. 测绘科学, 2021, 46(1): 141-148.
- [4] 赵强, 王涛. 一种三维激光扫描技术隧道整体变形分析方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 99-105.
- [5] 周米玉, 孙海丽, 杜黎明, 等. 移动激光扫描技术的盾构隧道收敛直径提取方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(5): 112-117.
- [6] 张旻. 移动式三维激光扫描系统在地铁隧道病害检测中的应用[J]. 铁道勘察, 2024, 50(6): 6-11.
- [7] 李圆, 张献州, 陈霄, 等. 基于 NURBS 的轨道板点云外形尺寸检测研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3): 48-53.
- [8] 张宇. 一种顾及靶标控制的高精度隧道移动扫描方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(8): 111-118.
- [9] Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M. and Teunissen, P. (2011) Scanning Geometry: Influencing Factor on the Quality of Terrestrial Laser Scanning Points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **66**, 389-399. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005>
- [10] Lambert, J., Carballo, A., Cano, A.M., Narksri, P., Wong, D., Takeuchi, E., *et al.* (2020) Performance Analysis of 10 Models of 3D LiDARs for Automated Driving. *IEEE Access*, **8**, 131699-131722. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3009680>