

灵光 L3 点云精度验证白皮书

以相对精度验证法，评估灵光 L3 手持移动激光扫描系统点云成果的几何精度



5 mm

标称精度 @1 σ (典型值)

20 组

独立扫描 (7 台设备)

≈ 507 m²

复合室内测试场景

1. 引言

手持移动激光扫描系统凭借高效的数据采集流程、自动化处理能力以及丰富的点云成果，已成为测绘与空间文档化领域的重要工具。

随着其应用逐渐拓展至建筑数字化、BIM 建模、室内空间测量、工业设施数字化等专业场景，用户对点云成果的几何精度提出了更高要求。

然而，行业至今尚未建立统一的移动激光扫描精度验证标准，缺乏透明、可信且可复现的评价方法。

本白皮书采用基于测量学原理的系统化方法，对灵光 L3 手持移动激光扫描系统生成的点云进行精度验证，并完整呈现测试过程与结果。

本次验证使用 7 台 L3 设备（含 16 线和 32 线两个型号），共进行 20 组独立扫描。

本次测试将从点云的相对精度维度进行分析，全面评估灵光 L3 扫描成果的几何精度表现。

2. 移动扫描精度验证的挑战

2.1 为何移动扫描系统的精度验证更复杂

不同类型的测量系统具有不同的精度验证范式。全站仪通常基于已知靶标进行直接测量与坐标比对；架站式激光扫描仪（TLS）则可通过靶标或已知点提取点云坐标进行精度评估，相关验证方法已较为成熟。

移动激光扫描系统的精度受到传感器测量、SLAM 定位与建图、轨迹优化以及环境条件等多重因素影响，其最终精度难以仅通过单一硬件参数进行判断。与此同时，SLAM 通过连续观测估计传感器轨迹，并结合回环检测与全局优化对轨迹进行整体调整，点云最终坐标由优化后的轨迹共同决定，因而无法将单个点直接对应至原始测量位姿。

因此，移动激光扫描系统的精度验证应以最终输出点云为评价对象，结合不同空间条件和测量距离，对其相对精度及整体几何一致性进行系统评估。

2.2 我们的解决方案

我们采用**相对精度验证法**，通过比较点云中已知靶标之间的距离与基准真值，评估扫描成果的几何精度。

这一方法的核心优势：

- 不依赖 GCP，验证设备与算法自身的扫描表现
- 不受坐标系配准误差影响，直接评价点云的几何距离
- 与行业同类评测方法保持一致，便于不同系统之间进行对比

3. 验证方法

3.1 方法概述

本次精度验证采用相对精度验证法，主要步骤如下：

- 1 建立参考真值：**在测区内布设高反射率圆形靶标，并使用高精度全站仪测量其中心坐标，建立参考数据。
- 2 采集点云：**由 5 名测试人员使用 7 台灵光 L3 进行多次独立扫描，共获得 20 组点云数据。
- 3 提取靶标中心：**从每组点云中自动识别并计算各靶标的中心坐标。
- 4 距离对比：**计算靶标之间的点云距离，并与全站仪测得的真实距离进行逐一比较，获得距离误差。
- 5 统计分析：**汇总 20 组扫描的测量结果，对整体精度表现进行统计分析。

3.2 精度指标定义

指标	定义
P68 ($\approx 1\sigma$)	68% 的点对距离偏差不超过该值
P85	85% 的点对距离偏差不超过该值
P97	97% 的点对距离偏差不超过该值
Mean	所有点对距离偏差的算术平均值
RMSE	均方根误差

本白皮书以 **P68（68% 分位数，约等于 1σ ）** 作为主要精度指标，这与行业通行做法一致。¹

3.3 统计口径

多设备、多次扫描的结果汇总方式会直接影响最终数字，因此需要明确说明。本白皮书采用**全局分位数口径**：

将所有设备、所有扫描所得的全部点对偏差合并为单一数据集，再在该数据集上直接取分位数。
即：20 组扫描共 1524 条点对距离比较记录偏差 → 合并排序 → 取第 68% 位置的值。

这一口径与行业同类精度报告一致，其含义直观。

4. 测试条件

4.1 测试场地

测试在某办公建筑的一个完整楼层进行。下图为该层点云的俯视投影，同时标注了全部靶标位置。

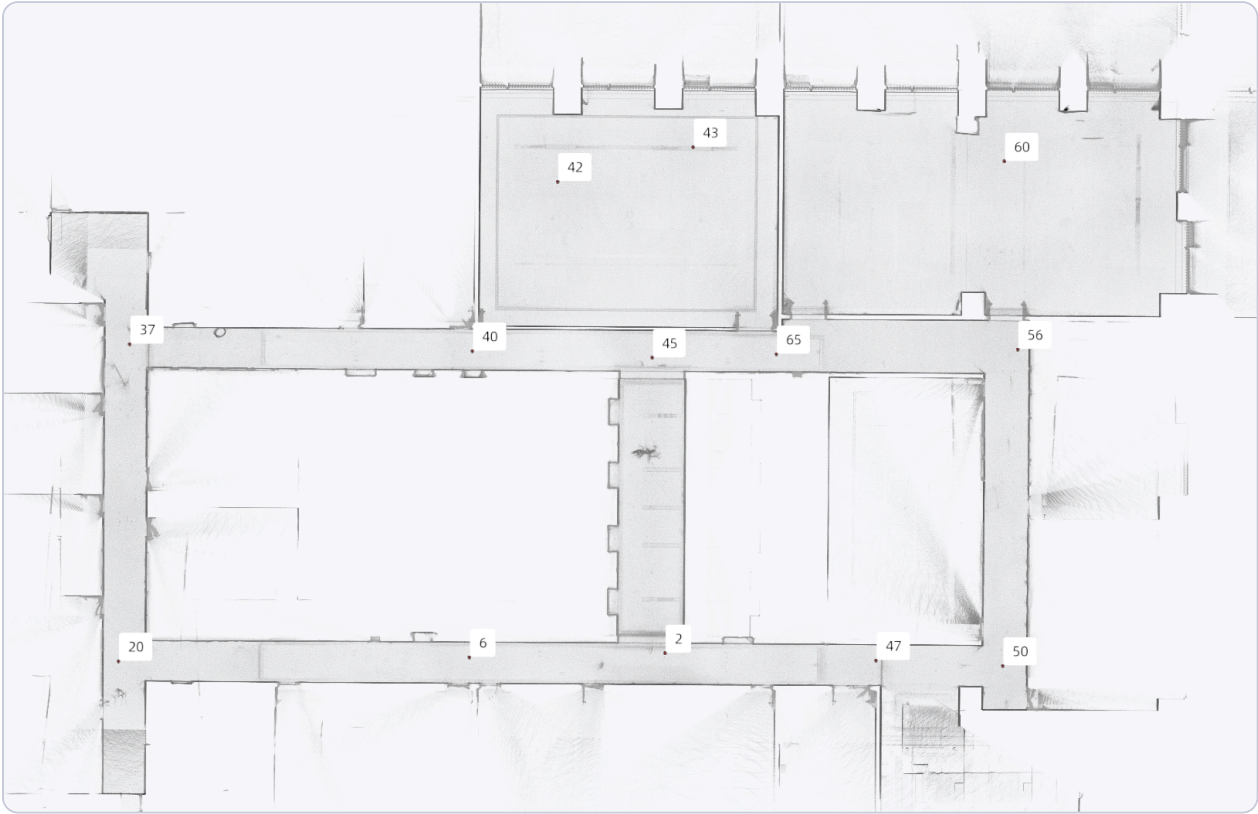


图 1：测试场地点云俯视图及靶标分布（图中为参与评测的 13 个靶标）

场地特征：

项目	参数
建筑面积	约 507 m ²
靶标点外包范围	24.5 m × 38.9 m
空间结构	双侧长走廊 + 多个独立隔间 + 中部楼梯井
楼层	单层（靶标点高差 < 5 cm）

从平面图可见，该场地并非简单的开放空间或单一走廊，而是由两条平行长走廊、连接短廊、以及多个独立房间构成的复合结构。走廊长度接近 39 m；房间需逐个进出，形成频繁的转弯与回环。

这一结构对 SLAM 构成两方面挑战：长走廊中横向几何约束不足，易产生纵向漂移累积；频繁进出隔间意味着大量的回环闭合判断。二者叠加，比开阔场地或短走廊更接近建筑测绘、室内改造类项目的实际作业条件。

4.2 靶标布设

- **靶标类型**：直径 4 cm 圆形高反射率靶标
- **靶标数量**：布设 13 个，13 个参与评测
- **分布方式**：沿走廊两侧及各隔间墙面分布，覆盖测区全域（见图 1）
- **点对距离覆盖**：5.4 m ~ 44.2 m（中位数 20.2 m）
- **形成点对**：78 对/组

靶标固定于墙面，全部测试期间位置不变。

从图 1 可见靶标点的分布特点：沿两条长走廊的两侧均匀布设，并延伸至各独立隔间内部。这一布设方式使点对距离跨越 5.4—44.2 m 的完整区间，其中超过半数在 20 m 以上，既包含同一空间内的近距离点对，也包含横跨整个楼层、需经多次转弯才能连通的远距离点对。后者对 SLAM 的累积误差最为敏感。

4.3 基准系统

真值坐标由高精度全站仪测量获得：

- **设备**：徕卡 TS60
- **平差后精度**：1.5 mm
- **测量方式**：多测回观测 + 平差处理

基准系统的精度显著优于被测设备的标称精度，满足测量验证中对参考标准的基本要求。²

4.4 扫描配置

项目	参数
被测设备	灵光 L3（16—120 × 4 台 + 32—120 × 3 台）
总设备数	7 台
总扫描组数	20 组
后处理方式	标准流程，未使用 GCP 优化
对齐方式	高反靶标自动对齐

所有精度数据均基于无 GCP 后处理的相对点云获得，反映设备与算法的原始性能。

5. 数据处理

5.1 靶标提取

从点云中提取靶标中心坐标采用自动化算法：

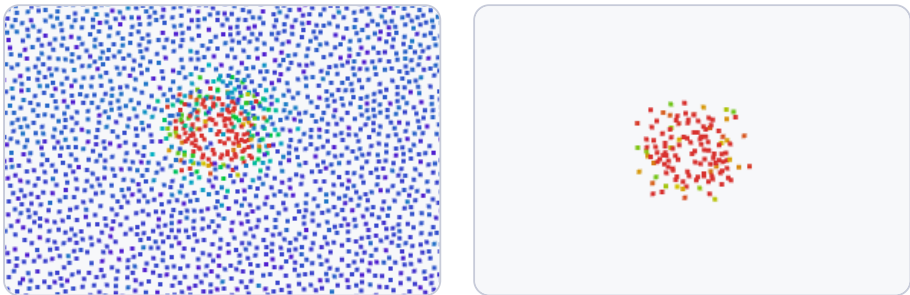


图 2：圆形高反射率靶标在点云中提点的信息

- 1 基于强度信息自动定位圆形高反射率靶标区域
- 2 使用行业标准算法拟合靶标中心坐标
- 3 对提取结果进行人工审核，确认中心位置合理

提取成功率：

靶标识别成功情况	扫描组数	靶标数	说明
靶标提取全部成功	17 组	13	单组参与评测有效点对为 78 对。
靶标提取部分失败	3 组	12	缺失的 3 组扫描均缺少了 1 个靶标，因此该 3 组扫描参与测评的有效点对为 66 对。

13 个靶标参与评测，累计提取成功 257 次（理论上限 260 次），成功率 98.8%。

靶标提取失败原因：个别靶标因强度对比不足、点密度偏低或通视时间过短。

5.2 点对距离计算

将参与评测的靶标两两配对，计算点云中提取坐标的点间距离，同时计算真值坐标的对应距离。两者之差的绝对值即为该点对的距离偏差。

5.3 点对距离分布

单组扫描（13 个靶标，78 对）的距离构成如下：

距离段	点对数	占比
5—10 m	11	14.1%
10—20 m	27	34.6%
≥20 m	40	51.3%
合计	78	100%

汇总 20 组扫描后共 1524 个点对，距离范围 5.40~44.22 m，中位数 20.23 m。超过 50% 的点对距离在 20 m 以上，充分涵盖了手持扫描仪的典型作业距离范围。

6. 结果

6.1 偏差分布

下图展示了 7 台灵光 L3 设备、共 20 组独立扫描所得全部 1524 个点对距离偏差的分布情况。误差以 0.5 mm 为分箱宽度，黄色曲线表示点对误差分布的累积百分比。

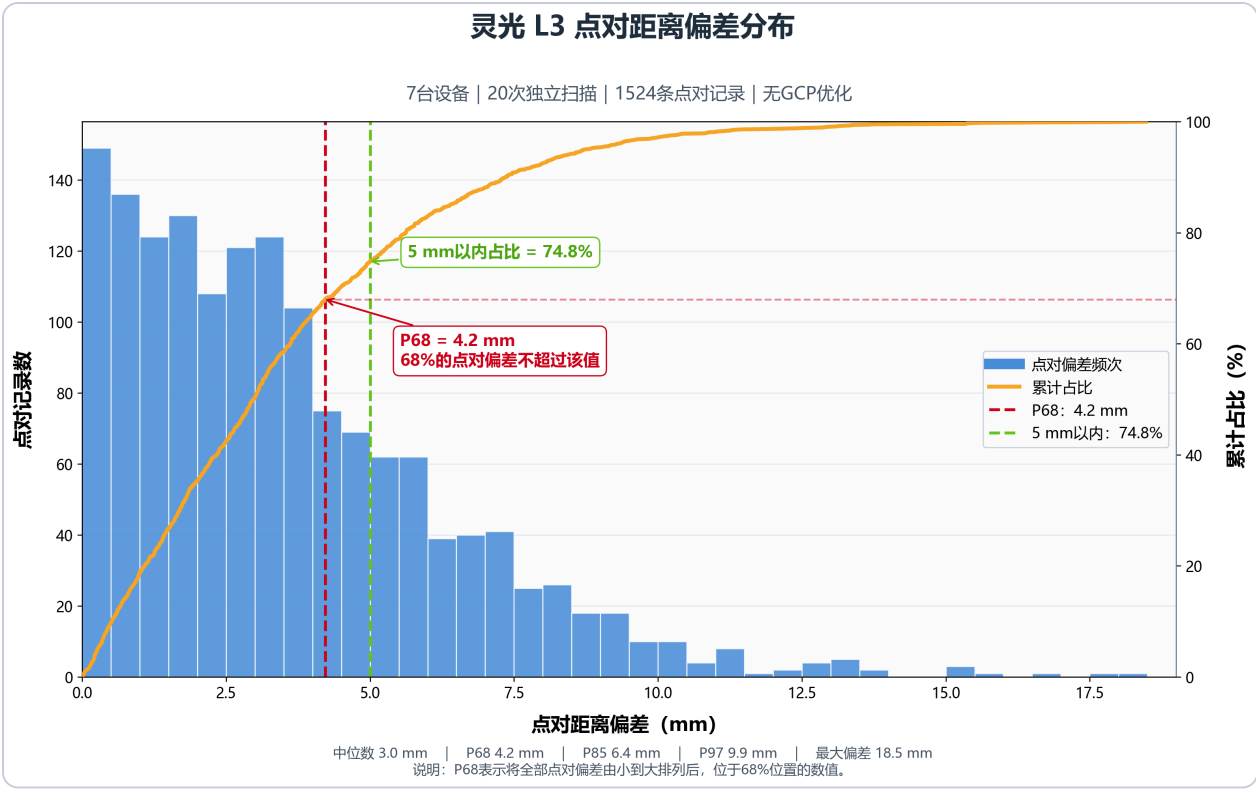


图 3: 在约 507 m² 的场景下, 灵光 L3 点对距离偏差分布直方图 (7 台设备, 20 组扫描, 无 GCP)

红色虚线标示 P68 = 4.2 mm 的位置, 表示 68% 的点对距离偏差不超过该值。绿色虚线标示 5 mm 标称精度线。

6.2 汇总精度指标

按 3.3 节所述的全局分位数口径, 对全部 1524 个点对偏差统计如下:

百分位	偏差
P50 (中位数)	3.0 mm
P68 ($\approx 1\sigma$, 主要指标)	4.2 mm
P85	6.4 mm
P97	9.9 mm
Mean	3.5 mm

7. 结论

• 核心结论

本次测试选取 7 台灵光 L3 设备，测试场地面积约 507 m²，涵盖长走廊、多隔间和频繁回环等典型复合室内场景。结果显示，本次汇总样本的点对距离绝对偏差 **P68 为 4.2 mm**，优于标称规格 5 mm @ 1 σ （典型值）³。

附录

A. 术语说明

术语	定义
SLAM	同步定位与建图 (Simultaneous Localization and Mapping)
GCP	地面控制点 (Ground Control Point)
P68 / 1 σ	在有符号误差近似零均值正态分布的条件下，P68 近似等于 1 σ （一倍标准差）
RMSE	均方根误差 (Root Mean Square Error)
TLS	地面激光扫描仪 (Terrestrial Laser Scanner)

B. 测试设备清单

项目	规格
被测设备	灵光 L3 16–120 × 4 台 + 灵光 L3 32–120 × 3 台
基准设备	高精度全站仪（平差后精度 1.5 mm）
靶标	圆形高反射率靶标 × 13 个
处理软件	Lixel Studio 4.1 版本

脚注 · NOTES

- ¹ P68 即 68% 分位数，表示 68% 的测量偏差不超过该值。在有符号误差近似零均值正态分布的条件下，P68 近似等于 1σ （一倍标准差）。本文统一以 P68 作为实测统计指标；仅在上述条件成立时，P68 才与 1σ 作近似对照。本白皮书所有分位数均按 3.3 节定义的全局分位数口径计算（全部扫描的点偏差合并为单一数据集后取分位），采用统一的全局分位数口径，以便不同测试结果之间进行比较。
- ² 基准系统精度（约 1.5 mm）与被测系统标称精度（5 mm）之比约为 1:3.3，满足本项目采用的参考系统与被测系统不低于 3:1 的能力比准则。基准系统自身仍存在有限误差，因此观测偏差中包含其误差贡献，使实测结果相对保守。在基准系统与被测系统误差相互独立且均按 1σ 表征的前提下，按独立误差平方和分离，设备自身的误差贡献约为 $\sqrt{(4.2^2 - 1.5^2)} \approx 3.9$ mm（在上述假设成立时的条件性估计）。本次测试直接观测到的参考系统与被测系统合成点对距离绝对偏差 P68 为 4.2 mm。
- ³ 标称精度 ≤ 5 mm @ 1σ 为典型作业条件下的预期表现。实际精度受场地几何特征、扫描路径规划、环境条件等因素影响，个别高难度场景下的偏差可能略有浮动。本白皮书所述数据基于特定测试条件获得，详见第 4 章。