

手持式 LiDAR SLAM 作业指南

从首次扫描到专业成果交付

Handheld LiDAR SLAM Guidance — From First Scan to Professional Deliverable



版本：v1.0 · 2026-05

作者：Tersus 产品团队 (tersus-gnss.com)

适用读者：从 GNSS 转向 SLAM 的测量工程师；BIM / 建筑 / 室内扫描新手；经销商 / 销售工程师培训人员；林业 / 应急 / 公安等跨行业操作员。

手持式 LiDAR SLAM 作业指南——从首次扫描到专业成果交付

英文原版：Handheld LiDAR SLAM Guidance — From First Scan to Professional Deliverable

版本：v1.0 · 2026-05 中文版

作者：Tersus 产品团队

出品：天硕空间智能（Tersus GNSS）

官网：tersus-gnss.com

本指南为面向手持式 LiDAR SLAM 操作员的产品中立教育性文档。文中涉及的具体产品参数，请以对应产品的最新版规格书为准。

© Tersus GNSS

目录

0 · 如何使用本指南	6
0.1 本指南面向谁	6
0.2 如何阅读	6
0.3 全书约定	6
0.4 一个承诺，一个提醒	7
0.5 版本与反馈	7
1 · 认识你的工具——手持式 LiDAR SLAM 一览	8
1.1 什么是手持式 LiDAR SLAM 扫描仪	8
1.2 典型系统构成	8
1.3 关键作业参数——开工前要查什么	9
1.4 软件生态	9
1.5 装箱清单——通用版	10
2 · 扫描前先理解——10 分钟掌握 SLAM 基础原理	11
2.1 什么是 SLAM?	11
2.2 扫描仪的各个传感器如何协同工作	11
2.3 SLAM 的两个引擎：前端与后端	12
2.4 轨迹为什么会漂移	12
2.5 退化——SLAM 的“雪盲症”	13
2.6 回环闭合——漂移是如何被消除的	15
2.7 RTK 对扫描仪究竟起什么作用	16
2.8 为什么不能遮挡 LiDAR——用 SLAM 原理来解释	16
2.9 IMU 与角加速度——为什么平稳很重要	17
2.10 初始化位置法则	17
3 · 手持式 LiDAR SLAM 能做什么、不能做什么——合理管理预期	19
3.1 精度：三个数字，一个常见混淆	19
3.2 距离：能扫到多远，和应该在多远处扫	19
3.3 手持式 LiDAR SLAM 擅长的工作	20
3.4 手持式 LiDAR SLAM 不能做、或不应该用来做的工作	20
3.5 全行业通用的硬性限制	20
4 · 扫描前准备——做好外业准备	22
4.1 组装	22
4.2 镜头与传感器清洁	22
4.3 电池与供电	22
4.4 存储检查	23
4.5 开机与关机	23
4.6 App 安装与配对	23

4.7 固件与软件检查.....	23
4.8 CORS / NTRIP / RTK 配置.....	24
4.9 App 参数设置.....	24
4.10 开始采集前的 2 分钟检查清单.....	24
5 · 扫描十大黄金法则.....	26
法则 1——静态开始，静态结束.....	26
法则 2——缓慢拿起，平稳移动.....	26
法则 3——以约 1 m/s 的速度行走.....	26
法则 4——让 LiDAR 始终看到特征.....	27
法则 5——遵守最小量程 / 工作距离 / 最大量程.....	27
法则 6——绝不遮挡 LiDAR.....	27
法则 7——先把门打开，过门要慢.....	27
法则 8——正确闭合回环.....	29
法则 9——远离周围的动态物体.....	29
法则 10——控制每次扫描的规模.....	29
6 · 典型场景作业指南.....	31
6.1 室内多房间与走廊.....	31
6.2 楼梯与多层建筑.....	33
6.3 大型开阔空间.....	33
6.4 室内外过渡.....	34
6.5 大型建筑外立面与园区.....	34
6.6 城市街道与道路.....	35
6.7 林业.....	36
6.8 隧道与地下空间.....	36
6.9 狭小室内空间.....	37
6.10 玻璃幕墙与水面.....	37
6.11 弱光与夜间.....	38
6.12 文化遗产与历史建筑室内.....	38
6.13 船舶、码头与水岸.....	39
7 · 外业质量检查与续扫.....	40
7.1 扫描中盯住 App 的实时预览.....	40
7.2 什么时候该停下来重扫.....	40
7.3 正确使用续扫（Resume Scan）.....	40
7.4 停止扫描后的 10 秒保存流程.....	41
7.5 地面控制点（GCP）布设与最佳实践.....	41
7.6 读懂后处理报告.....	47
8 · 从原始数据到交付成果——后处理.....	48
8.1 处理环境.....	48
8.2 安装与授权.....	48
8.3 预处理检查.....	49

8.4 处理模式——选择逻辑.....	49
8.5 正确导入 GCP.....	49
8.6 处理时间预期.....	50
8.7 输出格式与适用场合.....	50
8.8 3DGS——是什么、不是什么、以及如何为它采集.....	50
8.9 精度手段的组合——优先级.....	52
9 · 异常图谱与恢复.....	53
9.1 倾斜 / 偏斜.....	53
9.2 点云分层 / 层间错位.....	54
9.3 鬼影.....	56
9.4 颜色拖尾 / 错位.....	56
9.5 “幻影”人像.....	57
9.6 玻璃与水面噪点.....	57
9.7 室内外颜色不一致.....	58
9.8 硬件异常与自检.....	58
10 · 从新手到认证操作员.....	60
10.1 四级能力模型.....	60
10.2 各级课程.....	60
10.3 实训项目——建议清单.....	61
附录 A1 · 外业检查清单.....	63
A1.1 采集前两分钟检查清单.....	63
A1.2 路线规划检查清单.....	63
A1.3 地面控制检查清单.....	63
A1.4 停止 / 重扫决策检查清单.....	64
A1.5 十秒保存流程.....	64
附录 A2 · 推荐学习资源.....	65
A2.1 通用练习.....	65
A2.2 通用技术背景.....	65

0 · 如何使用本指南

0.1 本指南面向谁

本指南面向四类读者，他们接触手持式激光雷达（LiDAR）SLAM 扫描仪的起点各不相同：

1. 从 GNSS 转向 SLAM 的测量工程师。你熟练掌握实时动态差分定位（RTK）、全球卫星导航系统（GNSS）星座、全站仪和坐标系统，但移动 SLAM 技术对你来说还是新事物。你想知道的不只是该按哪个键，而是扫描仪如何感知空间、如何采集空间数据。
2. BIM / 建筑 / 室内扫描新手。你需要能导入 Revit、ReCap、Navisworks 等软件、精度可靠的点云。你可能从未用过 GNSS，也不打算用。
3. 经销商、代理商或销售工程师。你要演示设备、培训客户、回答一线技术支持问题。你需要一份可以直接拿来教学的文档。
4. 跨行业操作员：林业、应急救援、公安、文物保护、公用设施。你有具体任务要完成，SLAM 只是工具。你需要的是通向可靠结果的最短路径。

只要符合其中任何一类，本指南就是为你写的。

0.2 如何阅读

- 全新用户：按第 0 章 → 第 2 章 → 第 4 章 → 第 5 章的顺序阅读，再看第 6 章中与你第一个项目相匹配的那一节。其余内容用到时再看。
- 已经扫描过几次：快速浏览第 2 章，通读第 3 章和第 5 章，然后把第 6 章和第 9 章当作常备参考。
- 培训他人：先读第 10 章，再把第 2、5、6、9 章作为教学模块使用。

0.3 全书约定

符号	含义
 警告	行动前必读
 深入理解	可选的技术细节，供想弄清“为什么背后的为什么”的读者阅读
 建议这样做	推荐的做法

符号	含义
 不要这样做	可以预见会带来问题的做法
 提示	补充说明与经验提示

0.4 一个承诺，一个提醒

承诺：只要读懂第 2 章，并遵守第 5 章的十大黄金法则，第 9 章列出的典型扫描故障中，90% 不会发生在你身上。提醒：本指南不能替代实际操作练习。读完指南就去扫描，最好把同一个空间扫五遍，在后处理软件里逐一查看结果，观察操作手法的变化如何影响数据。正是这样的反馈循环，让一名操作员成长为专业人员。

0.5 版本与反馈

本教学版由培训负责人、产品负责人或外业运营团队负责维护。如果你发现错误、缺少某个场景，或者有比本文所写更好用的技术方法，请告诉我们。操作员的质疑和反馈会让这份文档越来越好。

1 · 认识你的工具——手持式 LiDAR SLAM 一览

阅读时间：10 分钟。读完本章，你应该能说出手持式 LiDAR SLAM 系统的每一个主要部件，并用一句话说明每个传感器起什么作用。

1.1 什么是手持式 LiDAR SLAM 扫描仪

手持式 LiDAR SLAM 三维扫描仪是一套移动式三维实景采集（Reality Capture）系统，专为单人快速采集现场而设计。典型系统在一个机身或一套设备套件中集成了：

- 高帧率 LiDAR：构建环境的几何骨架。
- 惯性测量单元（IMU）：短时运动感知，包括俯仰、横滚、航向和加速度。
- 一个或多个相机：负责赋色并提供视觉特征。
- 可选的 GNSS / RTK：在天空视野足够时提供绝对坐标锚定。
- 机载存储、电池供电，以及连接手机、平板或手簿的实时预览通道。

工作原理：操作员沿路线行走，扫描仪同时估计自身轨迹并构建点云。扫描结束后，原始数据在桌面端或云端软件中处理，生成交付用的点云；在支持的系统上，还可生成全景影像或三维高斯泼溅（3DGS）等可视化成果。

有一条原则对所有产品都适用：没有任何一个传感器能独自完成任务。可靠的外业成果，来自于理解每种环境下哪个传感器占优，并据此规划路线。

1.2 典型系统构成

主要部件及其作用：

- 主传感单元。内置 LiDAR、IMU、相机、处理器、存储，有时还包括 GNSS。
- 手柄、握把、延长杆、背包或车载支架。决定传感器的稳定程度和轨迹的可重复性。
- 定位或控制点接口。提供一种可重复的方式来采集地面控制点（GCP）或已知标靶。
- 电池系统。决定实际单次作业时长、热更换电池策略和低温性能。
- 存储介质。保存原始数据。存储卡或硬盘缺失、写满，属于外业故障，不是后处理问题。
- 移动 App 或手簿。提供开始/停止、实时预览、项目设置、坐标/RTK 状态和外业质量检查（QA）功能。

具体的部件名称、LED 指示灯、安装顺序、密码、文件名和配件因产品而异。MVP™ S1 的对应信息，请查阅最新版 MVP S1 产品规格书（datasheet）。

1.3 关键作业参数——开工前要查什么

本指南中的参数刻意做到不针对特定产品。权威规格请始终以最新版产品规格书为准。在外业现场，操作员需要了解以下几类参数，即使具体数值因扫描仪而异：

- 推荐工作距离。在这个距离范围内，点密度、噪声和特征匹配都是可靠的。
- LiDAR 最大量程。在这个距离上仍可能有回波点，但通常只应作为参考几何，不能当作测量级依据。
- 最小量程。低于这个距离，传感器可能出现截断、回波不稳定，或产生颜色/几何伪影。
- 最佳成像距离。相机能产出可用的颜色、视觉特征和 3DGS 影像的距离范围。
- 相对精度。单次扫描内部的自洽程度。
- 绝对精度。与 RTK、GCP 或其他地理配准方式所得已知控制值的符合程度。
- 电池续航。实际可用的单次作业时长，包括热更换电池的窗口。
- 环境防护等级。防尘、防雨、温度和振动限值。

不要把别的扫描仪的数值背下来生搬硬套。以手中设备的现行产品规格书为准。MVP S1 的原始数值见最新版 MVP S1 产品规格书。

1.4 软件生态

大多数手持式 SLAM 工作流使用三层软件，从外业到内业，按使用顺序为：

1. 移动端采集软件。实时预览、开始/停止、项目设置、控制点采集、RTK 状态和覆盖范围检查。
2. 桌面端或云端后处理软件。轨迹优化、回环闭合（Loop Closure）、RTK/GCP 融合、点云导出、报告生成，以及可选的可视化成果输出。
3. 厂商资源中心。固件、安装包、手册、版本说明、标定说明和支持文件。

开始新项目前，确认采集 App、固件、后处理软件和许可状态都足够新，能支持你打算使用的功能。

1.5 装箱清单——通用版

通用的手持式 SLAM 设备套件要作为一个整体系统来检查，而不是一堆零散部件：

- 扫描仪或传感头。
- 按需配备的手柄、握把、延长杆、背包、车载支架或三脚架转接件。
- 如需使用控制点：定位底板、标靶转接件或 GCP 采集配件。
- 电池、充电器、经批准使用的移动电源，以及所需线缆。
- 存储介质，如适用则带上读卡器。
- 已安装采集 App 的移动设备或手簿。
- 如需要：后处理软件许可/加密狗/账号。
- 清洁布、保护箱，以及厂商认可的防雨防尘装备。
- 打印版或离线版检查清单，以及紧急技术支持联系方式。

有缺项？在第一个项目开工前就停下来补齐。5 分钟的设备检查，能省掉一整天的重扫。

2 · 扫描前先理解——10 分钟掌握 SLAM 基础原理

如果本章只记住一句话，那就是：第 5 章的每一条法则，都只是 SLAM 工作原理的物理结果。理解了“为什么”，这些法则就不再显得武断。

2.1 什么是 SLAM?

SLAM 是同步定位与建图（Simultaneous Localization And Mapping）的缩写。顾名思义：扫描仪只靠机载传感器，同时弄清楚自己在哪里、周围环境是什么样。一个好懂的比喻：想象你闭着眼睛走进一栋陌生的黑屋子，只能靠双手摸索。摸到一面墙，这就是一个特征。向前走三步，这就是运动。返回时再次摸到同一面墙，这时你就能闭合回环，修正脑中地图里的偏差。SLAM 做的是同样的事，只不过用激光束代替了指尖，每秒采集 20 万次以上的测量，而不是一次只摸一下。

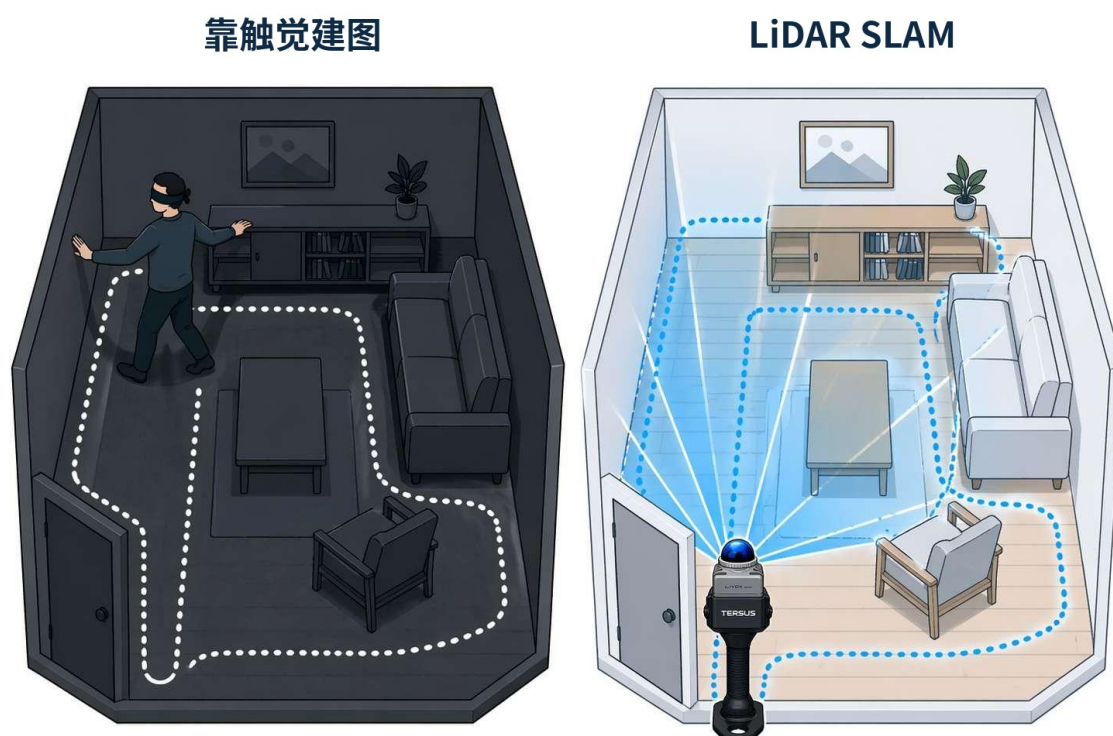


图 2-1 示意：闭眼靠触觉建图（左）与 LiDAR SLAM（右）

2.2 扫描仪的各个传感器如何协同工作

手持式 LiDAR SLAM 扫描仪是一套多传感器融合系统。没有哪个传感器能单独完成 SLAM，每个传感器都在弥补其他传感器的短板。

- LiDAR → 几何骨架。每秒提供数十万个精确的三维点。擅长形状和距离，不擅长外观。
- IMU → 瞬时运动。逐毫秒地知道扫描仪正在如何旋转、如何加速。擅长短时运动，但若单独使用，随时间会严重漂移。
- 双鱼眼相机 → 纹理与视觉特征。为每个点提供颜色，并在 LiDAR 无法分辨时（例如长走廊、无特征墙面）提供视觉备份。
- GNSS / RTK → 全局锚点。天空可见时，为 SLAM 引擎提供绝对坐标约束，避免整幅地图漂移。

关键在于多传感器融合。在 LiDAR 分不清你走了多远的走廊里，相机往往还能看到特征；在 GNSS 信号消失的隧道里，LiDAR 往往正好大显身手。每一个短板都有另一个传感器来补。

2.3 SLAM 的两个引擎：前端与后端

SLAM 处理流程内部有两项工作同时进行。

- 前端（里程计）。扫描仪每采集一帧，前端就把新的 LiDAR + IMU + 相机数据与上一帧比对，估计“在这一毫秒里我动了多少”。把足够多的这种估计串起来，就得到一条轨迹和一幅不断延伸的点云。
- 后端（回环闭合 + 图优化）。后端一直在留意你回到已扫描区域的时刻。一旦发现，它就求解一个大型优化问题，把整条累积轨迹重新拉回对齐状态。可以想象把一根橡皮筋拉紧：所有细小的漂移被重新分摊。每一帧都会累积微小误差。没有后端，这些误差会越积越多；有了后端，每闭合一次回环，误差就被消除一次。正是因为有了稳定的后端优化算法，SLAM 才能稳定达到测量级精度。

2.4 轨迹为什么会漂移

每一帧的运动估计都有一点偏差，可能只有 0.5 mm。一秒钟内看不出来。但一千帧下来，比如走 100 m，这些 0.5 mm 就累积成好几厘米。最坏情况下（长走廊、无特征空间），漂移可能大得多。这不是软件缺陷，而是“从零开始弄清自己在哪”必然付出的代价。世界上每一套 SLAM 系统都有漂移。各种应对手段，包括回环闭合、GNSS 锚定和地面控制点，都是在限制漂移的范围，而不是消除漂移。

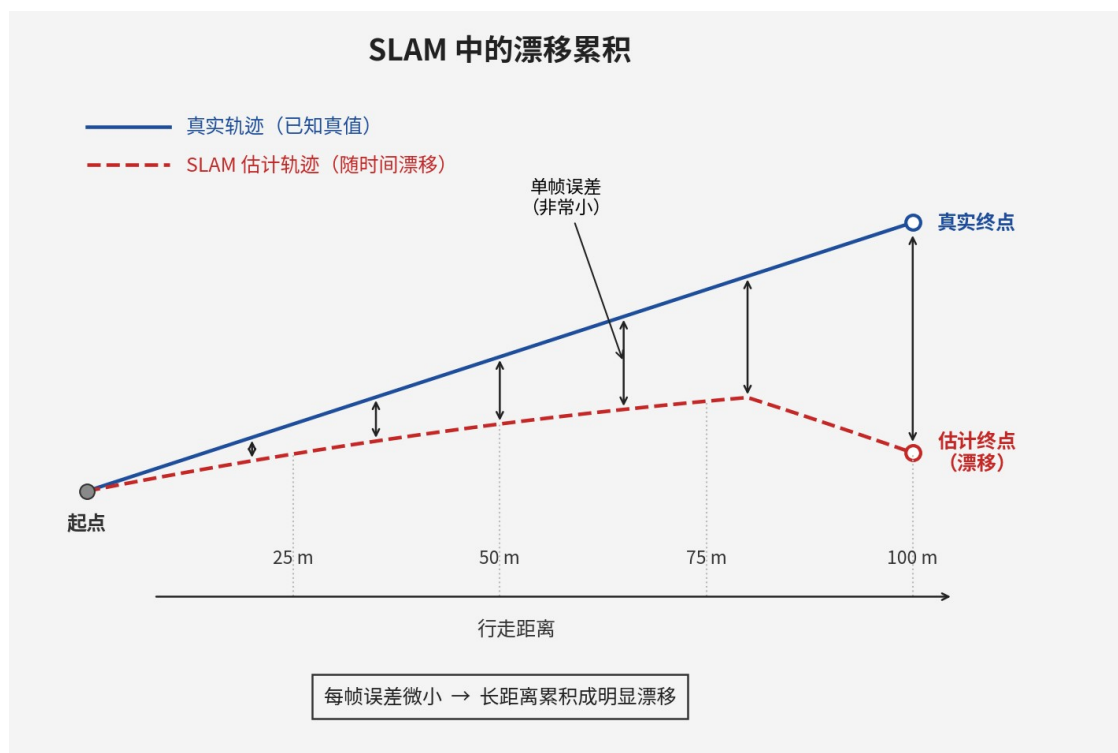


图 2-4 SLAM 漂移累积：真实轨迹与估计轨迹随距离逐渐分离

2.5 退化——SLAM 的“雪盲症”

在某些环境中，问题不在于“算法不够好”，而在于环境本身几乎提供不了可用的信息。我们把这类情况称为退化场景。拼图是一个贴切的类比。如果一块拼图上有门框、窗户、树枝或路牌，很容易放对位置，因为图案足够独特，只对应唯一的一个位置。但想象拼图中有一片区域全是白墙、空旷的天空、地毯或重复的走廊纹理。突然之间，很多块看起来几乎一模一样。你拿起一块，觉得放这里合适，放那里也合适，放到更远处好像也行。问题不在于你忘了怎么拼图，而在于这一块本身没有携带足够的独特信息来确定它唯一正确的位置。

退化场景的拼图类比

为什么重复或均一的场景让 SLAM 难以匹配

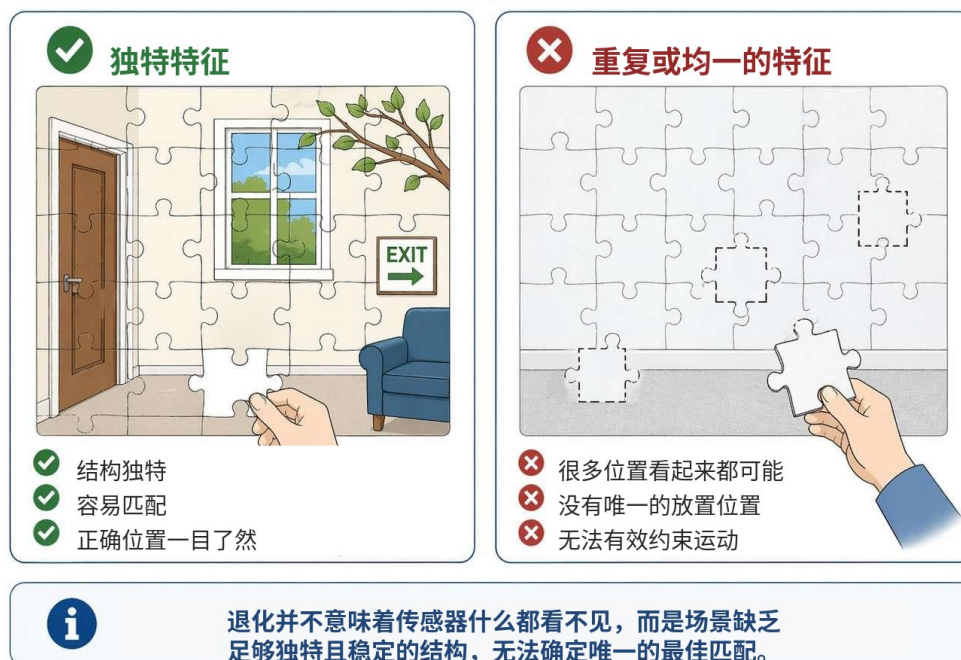


图 2-5 退化场景的拼图类比：独特特征易于匹配，重复或均一特征无法唯一定位

这正是 SLAM 在退化环境中面临的处境。不是传感器“看不见”，而是它看到的東西缺乏约束自身运动估计所需的独特性或稳定性。结果就是，沿某些方向的位移实际上已经无从确定。

最常见的退化场景：

- 长走廊。墙壁、天花板、地面，一米又一米全都一个样。这一帧扫描仪看到“一条走廊”，下一帧看到的是“一条视觉上完全相同的走廊”。算法分不清你向前走了半米还是一米。没有外部锚定，沿走廊轴线方向的距离从数据上根本无法确定。
- 超大开阔空间（广场、体育场、空停车场）。最近的几何体也离得很远，走 1 m 只会让测得的点产生极小的变化。就像在沙漠中只靠远处的山峰来判断自己走了多远，不是不可能，但噪声很大。
- 纯白墙面、玻璃幕墙。LiDAR 要么得不到稳定回波（激光穿过玻璃，或被哑光黑色吸收），要么各点的回波过于均一，帧与帧之间没有任何一个点能被唯一匹配。
- 间距很近的平行墙面（窄巷、两辆挂车之间）。几何结构退化成了一维的“管道”。算法又回到了走廊问题。
- 有风的茂密树冠下。每片叶子都在随机晃动。回波很多，但几乎没有一个是稳定特征。

特征匮乏时算法会怎么做。IMU 暂时接管。它进行“航位推算”，即对测得的加速度和角速度积分来推测运动。IMU 大约能撑 1–3 秒，之后自身漂移开始占主导。超出这个窗口，误差会迅速膨胀。

操作员能做什么。

1. 走得离一面墙更近一些。即使在大空间里，贴着一侧边缘走也能让特征保持在近处。
2. 插入一个侧向小回环。短暂拐进一个侧房，或绕一根柱子走一圈，可以打破对称性，给算法一个几何锚点。
3. 行走时让扫描仪轻缓地左右摆动，增加每秒看到的特征种类。（一定要轻缓！法则 2 仍然适用。）
4. 室外：保持 RTK 固定解（Fixed）。全局锚定可以弥补局部几何提供不了的信息。
5. 室内走廊：如果项目需要绝对精度，每隔 20–30 m 布设一个 GCP。

 深入理解：不可观方向。在长走廊里，沿走廊轴线方向的运动，就是工程师所说的不可观自由度，即数据本身无法约束的运动分量。SLAM 的数学模型对这个轴向确实没有任何信息：平移 1 m 和平移 2 m 产生的预测观测值完全相同。加入 GNSS（室外）、一次回环闭合，或者走廊尽头一个可见的地标（一扇门、一根柱子，任何独特的东西），就能打破对称性、恢复可观性。这也是为什么“进侧房绕一圈”特别有效：它增加了一个可被唯一识别的几何事件。

2.6 回环闭合——漂移是如何被消除的

回环闭合是 SLAM 中最容易被误解的概念。以下几点对外业很重要：

1. “回环”不只是回到起点。扫描仪必须识别出当前看到的几何结构，与之前扫描过的某处是同一个地方。这种识别需要重叠。
2. 与先前轨迹需要有 5–10 m 的重叠。不是从门口回穿一次就够了，也不是“我路过入口然后接着往前走”。引擎需要把一段帧与另一段帧进行匹配，而一段通常有好几米长。
3. 没有重叠，就没有回环。只是停在起点按下“停止”，并不会触发回环闭合。
4. 一旦找到回环，累积的漂移就会被大幅消除。后端求解一个全局优化，把整条轨迹拉回自洽状态。这就是为什么一个好的回环，常常能把实时预览里难看的画面变成干净的最终点云。
5. 大面积区域受益于中间回环。不要等到最后，每隔 100–300 m 走一个短的侧向小回环，重新进入已经覆盖过的区域。
6. 后处理软件的后处理报告会告诉你回环是否被识别出来。如何解读，参见 7.6。

2.7 RTK 对扫描仪究竟起什么作用

RTK 不是扫描仪内部的定位装置，而是一个全局锚点。区别在于：

- RTK 处于固定解状态时，每一个采样都提供厘米级的绝对位置。SLAM 把它当作约束条件：“此刻，我确切知道自己在哪。”累积漂移被不断归零。
- RTK 处于浮点解（Float）或单点定位（Single）状态时，绝对精度太低，不可信。SLAM 会降低其权重或直接忽略。
- RTK 报告固定解但实际上是错的，也就是令人头疼的伪固定解（Pseudo-Fix），此时 SLAM 仍然会相信它，整幅地图可能围绕这个错误约束发生扭曲。伪固定解通常出现在：
 - 城市峡谷。高楼遮挡信号，并反射信号（多路径效应）。
 - 茂密树冠下。
 - 狭窄山谷中。
 - 金属龙门架和桥梁下方。

⚠ 警告：室内段丢失 RTK 是正常的，也没有危害，SLAM 本来就是为此设计的。但室外出现伪固定解，可能造成大范围的点云分层（Layering），而且诊断起来要困难得多。这就是为什么有经验的操作员在整个扫描过程中都会盯着 App 上的 RTK 状态。

2.8 为什么不能遮挡 LiDAR——用 SLAM 原理来解释

新操作员常有一个误解：“不就是个激光嘛，挡一秒钟没关系。”并非如此。前端是利用重叠的几何结构，把每一帧与上一帧进行匹配的。如果你的手遮住 LiDAR 哪怕半秒钟：

1. 当前帧里只有你的手掌（一团没有特征的近距离物体）。
2. 上一帧里是周围环境。
3. 两帧之间除了你的手掌，再没有任何重叠的几何。
4. 前端要么彻底匹配失败（跟踪中断），要么去匹配手掌，而一旦手掌移开，地图就会跳变。

后处理之后的结果是三者之一：缺失一段、错位一段且无法与其余部分衔接，或者整个项目失败。

“遮挡”不仅指手，还包括：翻起来的背带、长发、宽松的衣物、悬挂的挂绳、举在扫描仪前面的手机、靠在扫描仪上的反光标牌，以及车内站在扫描仪前方的乘员。

✅ 建议这样做

- 扫描过程中始终保持 LiDAR 无遮挡。

❌ 不要这样做

- 扫描时不要换手持握。
- 扫描中途不要把扫描仪靠在胸前或腹部。
- 不要戴会耷拉进视场的帽子或高领。

2.9 IMU 与角加速度——为什么平稳很重要

扫描仪里的 IMU 是一种微机电系统（MEMS）器件，精密但有实实在在的限制。其中两条限制决定了你该如何移动扫描仪：

- 角加速度（转动有多快）。手腕突然翻转、让扫描仪绕某个轴甩动、从挂套里猛地抽出来，都会产生角加速度，使 IMU 的有效信号淹没在本底噪声里。SLAM 引擎收到的是带噪声的旋转估计，前端把这些噪声带进点云，表现为局部扭曲、轻微倾斜或帧匹配失败。
- 突然的线性加速度（走走停停）。急停急起会激发 IMU 的零偏，算法必须费力去抵消。一句话概括：SLAM 不怕慢，真正影响结果的是抖动、急促移动和突然的拉扯或转动。

🔍 深入理解：初始化阶段。按下“开始”后的最初几秒，IMU 正在测量重力，用来标定横滚和俯仰。如果此时扫描仪在移动，重力测量就会被污染。这就是 2.10 如此重要的原因。

2.10 初始化位置法则

扫描怎么开始，决定了整个作业怎么走。这是有经验的操作员最先学会的一条法则，往往是吃过亏才学会的。按下“开始”后的最初 10–30 秒内，系统正在：

- 通过 IMU 测量重力（用于标定整幅地图的横滚和俯仰）；
- 获取初始 LiDAR 特征，为前端提供种子；
- 拍摄初始相机帧，建立初始视觉参考。

这些输入中只要有一项被污染，污染就会传遍整个扫描，而且后处理往往无法挽回。

适合初始化的位置

- ✓ 稳定、水平的表面：地面、桌面、长凳、三脚架、熄火后的封闭车辆引擎盖。
- ✓ 环境本身至少 10 秒钟保持静止：扫描仪前方没有人流穿行，视野里没有摇晃的树，场景中没有飘动的窗帘。
- ✓ 特征清晰可见：LiDAR 视场内有墙壁、家具或建筑结构。

不适合初始化的位置

- ✗ 船上、浮动码头、渡轮、有晃动的栈桥。IMU 测到的“重力”并非真正的竖直方向，整幅点云会系统性倾斜。
- ✗ 面对风中摇晃的树木、灌木、高草或窗帘。相机会检测到“运动”，视觉模块会以为是你 在动，导致初始位姿有偏差。
- ✗ 人群中。扫描仪附近走动的人会被当作静态特征，等他们走开，地图就会跳变。
- ✗ 行驶中的车辆上（哪怕很慢）。问题与船上相同。
- ✗ 手持着走向起点。一定要把扫描仪放下，让它稳定下来，按下“开始”，等待就绪状态（Ready），再平稳地拿起。

⚠ 警告：初始化不良会产生倾斜或系统性偏斜的点云，后处理无法修复，只能重扫。前期这 15 秒的投入很值得。

3 · 手持式 LiDAR SLAM 能做什么、不能做什么——合理管理预期

把任何一台手持式 SLAM 扫描仪带到现场之前，先读完本章。设备一旦超出适用范围使用，结果就是数据不合格、客户不满意。

3.1 精度：三个数字，一个常见混淆

客户经常把三个不同的精度指标混为一谈。它们不是一回事，也不能互相替代着引用。

点云厚度。 系统自身噪声。指一面实测的墙在点云中显示出多“厚”。它是扫描仪和处理流程本身的属性，不等于测量精度。它反映的是点云看起来是否“清爽”。

相对精度。 内部自治性。同一次扫描里、在不同时刻测到的两个点，彼此之间的一致程度在扫描仪标称的相对容差之内。回答“这个房间方不方正”之类的问题，看的就是相对精度。

绝对精度。 与测量真值的符合程度。当点云通过 RTK、GCP、标靶或其他测量控制被纳入真实坐标系之后，它与测量级真值之间的接近程度，就是绝对精度。

 **警告：** 常见误用是把点云厚度当作测量精度来宣传。两者不是一回事。客户做墙到墙的尺寸量测时，点云已做地理配准的应引用绝对精度；在同一次扫描内部比较各个特征的，应引用相对精度。

 **提示：** 只要操作员遵守扫描仪的适用范围，大多数手持式 SLAM 扫描仪的精度足以满足建筑、BIM、施工辅助（例如土方/料堆方量）、林业、应急测绘和现状记录等许多工作流程。面对“精度够不够”这个问题，实事求是的回答通常是：够，前提是路线、控制和环境与所宣称的精度指标相匹配。

3.2 距离：能扫到多远，和应该在多远处扫

这个区别很重要，而销售材料里却经常把它们搅在一起。

推荐工作距离。 在这个距离以内，点密度高，噪声低，SLAM 引擎也有足够的局部结构可用。规划路线时，要让重要目标落在这个距离之内。

LiDAR 最大量程。 超出推荐工作距离之后仍可能有点回波，但密度下降、噪声上升。远距离回波只能当作参考几何，不能当作用来做决策的测量数据。

最小量程。 距离小于扫描仪的近距离极限时，LiDAR 没有稳定回波，或者给出的几何不可靠。不要把扫描仪贴到墙上，指望这样能得到更多细节。

最佳成像距离。 相机在色彩质量、视觉特征和 3DGS 重建方面有自己的最佳距离区间。

对于黑色表面、深色沥青、哑光工业涂层等低反射率目标，要大幅缩短实际工作距离。具体数值因产品而异，请以最新的产品规格书和项目容差为准。

3.3 手持式 LiDAR SLAM 擅长的工作

- 室内建筑采集：房间、走廊、楼板、天花板、机电管线（MEP）。
- 建筑外立面与园区采集：立面扫描、停车场、道路。
- 施工进度：土方、钢结构框架、部分建成的空间。
- 林业调查：胸径（DBH）、冠层密度、林分结构。
- 地下空间：地下车库、隧道、矿山、历史建筑的地下墓室。
- 文化遗产：寺庙、历史建筑、考古遗址等架站式地面扫描过于耗时的场合。
- 应急测绘：面向事件响应的快速现状采集。
- 工业厂区与管线走廊：管架、工艺装置、设备通道，前提是在扫描仪的距离范围之内。

3.4 手持式 LiDAR SLAM 不能做、或不应该用来做的工作

- 毫米级结构变形监测。请使用激光跟踪仪、全站仪或其他合适的计量工具。
- 单点高精度放样。请使用 GNSS RTK 流动站或全站仪。
- 航空或大范围地形测绘。请使用为该尺度设计的无人机 LiDAR 或移动测量系统。
- 水下扫描，或超出设备防护等级的潮湿环境作业。
- 正在下雨、大雪、浓烟、大量扬尘。LiDAR 回波会被颗粒物淹没。
- 温度、振动、粉尘或水的暴露程度超出设备标称工作范围。

3.5 全行业通用的硬性限制

向客户说清楚哪些限制是物理规律、而不是产品取舍，会很有帮助：

- 弱特征走廊会让每一台手持式 SLAM 系统都头疼。中间回环和进侧房绕一圈是通用的解决办法。
- 玻璃幕墙、落地镜和静止水面会产生反射或透射噪声，常规商用 LiDAR 无法在采集时完全消除。
- 雨、扬尘和大雪会降低所有品牌 LiDAR 的性能。
- 茂密冠层加上深谷，在任何设备上都会经常出现 GNSS 多路径效应和伪固定解。

当客户反问“可是规格书上写的是……”时，向他解释那个数字适用于什么条件。产品规格书上的指标反映的是最优条件下的结果：在传感器量程和环境适用范围之内，并且有良好的路线规划和控制。不要脱离条件去为一个数字辩护。

4 · 扫描前准备——做好外业准备

一次成功还是返工重扫，几乎总是在扫描仪开机之前的这个阶段就已经决定了。

4.1 组装

顺序很重要。跳过步骤或顺序颠倒，是初始化时扫描抖动的常见原因。

1. 严格按厂商规定的顺序组装扫描仪。
2. 确认每一个机械锁扣、卡扣、夹具或螺钉都已完全到位。
3. 开机前轻轻试一下，确认没有多余的转动或松动。
4. 三脚架、车载支架、背包框架或特殊转接件，只按厂商推荐的顺序安装。
5. 如果扫描仪配有专用的控制点定位底板或标靶采集附件，先确认它刚性可靠、可重复，再依赖 GCP。

4.2 镜头与传感器清洁

相机不是装饰。它们提供色彩、视觉特征，有时还辅助跟踪。

- 每次扫描前，在光线良好的地方检查所有相机镜头和 LiDAR 视窗。注意污渍、水渍、细微灰尘、冷凝水、划痕和指纹。
- 只用厂商认可的擦拭布和清洁方法。
- 从空调车里出来到炎热的室外现场，镜头起雾时，等几分钟再开始扫描。
- 任何肉眼可见的污渍都可能导致全景影像出现色带、视觉特征变弱，或 3DGS 重建出现伪影。

4.3 电池与供电

- 作业前把电池充满。
- 按计划扫描时长加上可能的延误，带够备用电池。
- 弄清楚产品是否支持热更换电池、外接电源或边充边扫，以及这些模式对电池寿命的影响。
- 正式项目上不要临时拼凑充电器或线缆。充电握手（供电协商）失败这类问题完全可以避免。
- 把换电池安排在路线的自然间断处，不要安排在对回环闭合至关重要的路段中间。

4.4 存储检查

- 开机前确认已装入格式化好的存储介质。
- 每次作业前检查剩余空间。
- 高强度作业之后，把数据拷贝到处理电脑，并确认完整拷贝已经完成，再格式化存储卡或硬盘。
- 在证明无误之前，把不完整的数据拷贝一律当作数据丢失事件处理。

4.5 开机与关机

每款产品都有自己的按键顺序和指示灯逻辑。通用的规则很简单：外业当天之前先学会。

- 按厂商规定的顺序开机。
- 等到就绪状态再开始扫描。
- 停止时，保持扫描仪静止，直到软件确认保存完成。
- 初始化、固件升级、保存或数据传输过程中不要关机。

4.6 App 安装与配对

- 作业前安装最新版本的采集 App。
- 先在办公室把手机、平板或手簿与扫描仪配对好。
- 验证实时预览、项目创建、存储状态以及开始/停止控制是否正常。
- 对于基于 Wi-Fi 连接的扫描仪，把 SSID、密码以及任何手动 IP 设置记录在项目资料包里。
- 在企业或政府/公共部门现场，确认允许使用 Wi-Fi、蓝牙、移动数据或 NTRIP 连接。

4.7 固件与软件检查

- 首次扫描前检查固件和采集 App 的版本。
- 只有在有时间完整走完升级流程时才升级。

- 升级过程中，除非厂商流程明确要求，否则不要退出软件、断开电源、拔出存储介质或手动关机。
- 如果续扫（Resume Scan）、RTK 融合、GCP 采集或新的处理模式等必需功能依赖于固件，提前确认所需版本。

4.8 CORS / NTRIP / RTK 配置

对于室外高精度作业：

- 正确输入 NTRIP（Networked Transport of RTCM via Internet Protocol，通过互联网传输 RTCM 差分数据的协议）的主机地址、端口、挂载点、用户名和密码，这些参数通常由 CORS（连续运行参考站系统）服务商提供。
- 开始扫描前确认 RTK 已达到固定解状态，最好在开阔天空下先稳定一小段时间。
- App 提供卫星数、坐标流和差分龄期时，逐项检查。
- 扫描过程中注意观察 RTK 状态。固定解有帮助；浮点解、单点定位或伪固定解都可能起反作用。

4.9 App 参数设置

典型的预览参数包括点大小、预览点数、透明度、聚焦/跟随模式、赋色设置、拍照间隔、RTK 开关，以及 GCP 采集模式。调整这些参数是为了让操作员更好地掌握现场情况，而不是指望它们能神奇地修好糟糕的几何。

- 在旧款手机上降低预览密度，让实时质量检查更流畅。
- 室外预览点云稀疏时，可按需增大点大小。
- 需要透过点云看轨迹时，使用透明度。
- 只在 RTK 有用且可信时才打开它。
- 面向 3DGS 的作业，缩短拍照间隔，并规划专门的饱和覆盖路线。

4.10 开始采集前的 2 分钟检查清单

按下“开始”之前：

- 设备已组装完毕并机械锁紧。
- 所有镜头和 LiDAR 视窗干净。
- 电量充足，备用电池在手边。
- 存储介质已插入，剩余空间已确认。
- 固件/软件版本适合本次作业。
- App/手簿已连接，实时预览可见。
- 室外作业已确认 RTK 状态。
- 已选好初始化位置：稳定、水平、周围环境静止。
- 路线已在脑中预演一遍：入口、回环点、GCP、出口。
- 操作员清楚自己应站在哪里，确保起始时 LiDAR 不被遮挡。

5 · 扫描十大黄金法则

法则 1——静态开始，静态结束

在稳定、水平、静止的表面上初始化。按下“停止”之前，先保持几秒钟静止再结束扫描。

为什么

IMU 在最初几秒内标定横滚角、俯仰角和重力方向。起始阶段晃动，会得到一个倾斜的点云，后处理无法完全修正。停止时抖动，则可能损坏最终保存的数据。

✓ 地面、工作台、三脚架、稳固的桌面、关好的汽车引擎盖。

✗ 船上、浮动码头、行驶中的车辆、视野内摇晃的树叶、正前方有人群走动。

法则 2——缓慢拿起，平稳移动

绝不要猛拉、扭转或急速旋转扫描仪。高角加速度是 IMU 最大的敌人。

为什么

IMU 噪声随旋转速度增大。手腕一甩，算法得到的就是高噪声、低可信度的运动估计。

✓ 像端一杯快满出来的咖啡一样拿起扫描仪。

✗ 不要转着扫描仪给同事展示。不要快速换手。不要为了看屏幕而转动手腕。

法则 3——以约 1 m/s 的速度行走

设计速度就是人正常稳步行走的速度。慢一点没关系，快了不行。

为什么

LiDAR 帧率和 IMU 积分是针对人体尺度的运动调校的。奔跑会丢失细节，也让回环闭合得不到足够的数据。

✓ 放松、连续、不急不躁。

✗ 在房间之间冲刺。停下来再猛地往前冲。

法则 4——让 LiDAR 始终看到特征

扫描仪的直接视野里，任何时候都应至少有一些墙面、立柱、树木或稳定的几何结构。

为什么

SLAM 依靠特征匹配工作。视野空空如也，算法就没有东西可用。

✓ 沿着墙走，而不是从大空间的正中间穿过。转动扫描仪，把侧房也扫进去。

✗ 不要举着朝天的扫描仪穿过空旷的广场。不要长时间对着无特征的天花板。

法则 5——遵守最小量程 / 工作距离 / 最大量程

最小量程为 0.3 m。规划路线时让目标保持在 40 m 以内。要接受 70 m 是上限，而不是工作距离。

为什么

参见 3.2。点密度和噪声都取决于距离，以及每台扫描仪规格书上的限制。

✓ 规划路线时，让墙面和关键特征落在扫描仪的推荐工作距离之内。

✗ 不要站在一座 100 m 长的仓库正中间，指望还能把墙角采到。

法则 6——绝不遮挡 LiDAR

任何遮挡都会打断帧链：手、背带、头发、挂绳、外套袖子、手机。

为什么

参见 2.8。当某一帧里只有你的手掌时，SLAM 前端无法把这一帧和下一帧匹配起来。

✓ 任何时候都让 LiDAR 视窗前方保持空旷、没有任何遮挡。

✗ 不要在扫描途中换手。不要把扫描仪夹在腋下。不要让背带甩进视野。

法则 7——先把门打开，过门要慢

按下“开始”之前，先把整栋建筑走一遍，把计划经过的每一扇门都打开。到了门口，放慢速度，让 LiDAR 同时看到两个房间几秒钟。

为什么（一）：提前开门

正在转动的门是 SLAM 最糟糕的对象。原因如下：

1. 转动的门是一块就在扫描仪正前方的大面积移动结构面。LiDAR 看到的是一大块平面，占据了视野中相当大的一部分。
2. SLAM 前端的设计目标是在相邻帧之间匹配几何。当某个大块的东西在帧与帧之间改变了形状，算法必须判断：“是场景变了，还是我动了？”
3. 对于转动的门，两个答案都部分成立。扫描仪在向前移动，门在横穿视野。算法无法干净地分离这两种运动，它不知道门是一个运动物体，因为门足够大、足够近，看起来就像结构的一部分。
4. 结果是，本应是稳定参照的门框，在好几帧里变成了不可靠的特征来源。实际表现为：门和周围墙面出现局部点云分层，轨迹在门口处出现一个小的错动，偶尔还会发生完全的跟踪中断，把新房间与前一个房间彻底“断开”。
5. 动态物体过滤在这里帮不上忙，因为过滤器是针对明显的动态物体（人、车）设计的，这些物体的运动独立于结构。而门连在墙上、移动缓慢、几何形状平坦，正好落在过滤器的盲区。

解决办法几乎不花成本：开始扫描之前，把每一扇门都打开。沿着计划扫描的路线走一遍，把每一扇室内门开开到大约 90–100°（完全打开，能顶到门吸最好），并确认它们能自己保持打开。然后回到初始化点开始扫描。

为什么（二）：在门口停一下

即使门已经提前打开，门口本身仍然是一个关键时刻，因为几何变化得很快。在原来的房间里，LiDAR 看到的是墙面、家具和天花板；一穿过门，看到的就是一个全新房间的墙面。前后两帧的共同部分只有门框那一窄条。以 1 m/s 的速度直接走过去，算法只有大约 0.5–1 秒的共同特征，勉强够用。在门口停一下，可以让算法多出 10 倍的重叠帧：几十次测量里，它能同时看到身后门内的旧房间和前方的新房间。这就是让门两侧拼接可靠的关键。

✅ 建议这样做

- 扫描开始前把每一扇门都打开。走一遍路线，开门，确认门能保持打开，再回到初始化点。
- 如果门带弹簧或闭门器，把它楔住（橡胶门挡、一本书、一块垫木都可以）。
- 每到一个门口，停 2–3 秒，让 LiDAR 同时看到两个房间。轻轻左右转动扫描仪，把整个门框扫全。
- 玻璃门要完全打开。玻璃本身就是 LiDAR 的噪声源，不要试图透过玻璃扫描。

✗ 不要这样做

- 不要在扫描过程中推开关着的门。扫描仪每看到一扇门在眼前打开，算法就会受一次影响。
- 不要让助手在你走近时替你开门。助手的手臂、身体和转动的门，会在最糟糕的时刻一起出现在扫描里。
- 不要全速冲过打开的门。开着门快速通过虽然好过关着门快速通过，但停一下仍然是最好的。
- 不要在身体遮挡 LiDAR 的情况下把扫描仪推过门洞。

法则 8——正确闭合回环

一个回环需要与先前轨迹有 5–10 m 的重叠。“回到起点”并不够。

为什么

参见 2.6。算法需要用一段帧去匹配另一段帧。

✓ 结束之前，重新走进一段已经扫过的区域，至少 5–10 m。在大型区域中，每隔 15–30 m 布置一个中间回环。

✗ 不要在起点精确停下却没有重叠。不要指望在一条长直走廊上自动形成回环。

法则 9——远离周围的动态物体

算法带有动态物体过滤，但过滤器永远不完美。尽可能让动态干扰物远离扫描范围。

为什么

在扫描仪附近走动的人偶尔会被当作静态特征采进去；他们一离开，局部就可能出现跳变。

✓ 让旁人保持 ≥ 20 m 的距离。规划路线时避开车流。扫描森林时选没人走小路的时候。

✗ 不要在没有协调好安静时段的情况下扫描人来人往的大堂。

法则 10——控制每次扫描的规模

没有中间回环的长时间单次扫描会累积无法恢复的漂移。拿不准时，就分段扫描再续扫。

为什么

漂移随距离增长。回环闭合是根治办法；当几何条件不允许形成回环时，分段并续扫是替代方案。

✓ 规划作业时，让每一次连续扫描至少能闭合一个有意义的回环。

✗ 不要把一条 2 km 长的线性走廊当作一次扫描来做，然后听天由命。

6 · 典型场景作业指南

本章每个场景都按同一结构编写：场景特点 → SLAM 风险 → 推荐路线 → 操作要点。各场景通用的外业检查清单见附录 A1。你可以把任一场景单独打印带到现场。

6.1 室内多房间与走廊

场景特点

墙面、门、家具、天花板。特征丰富，但走廊在几何上偏弱，而门是最容易毁掉一次原本不错的扫描的地方。

SLAM 风险

- 长走廊退化（参见 2.5）。
- 过门时帧间连续性中断（参见法则 7）。
- 扫描过程中有门在转动（被推开或关上），这是一种严重的干扰模式（参见法则 7 中“为什么”的第一部分）。
- 建筑在使用中时，有旁人走动。
- 镜子、玻璃隔断、高光泽地面反射 LiDAR 激光。

扫描前准备

在任何有人使用的室内场景按下“开始”之前，先不带扫描仪踏勘一遍：

- 把规划路线上的每一扇门开到 90–100°。自动闭门的门用门楔顶住。
- 玻璃门完全打开并固定，避免隔着玻璃扫描。
- 能开的灯尽量都打开（对相机有帮助，对 LiDAR 没有影响）。
- 处理明显会动的东西。百叶窗被穿堂风吹得晃动就把它关上；风扇吹得窗帘飘动就把风扇关掉。
- 提前告知在场人员。请路线上各房间里的人在接下来的 5–10 分钟内保持不动，或者暂时离开。
- 选一个好的干净的初始化位置。一间墙面结构清晰、无人走动的角落房间最理想。

在小型建筑里，这次踏勘通常只需要 5–10 分钟，却能省下 30–60 分钟的重扫时间。

推荐路线

1. 从角落房间开始。墙面以直角相交，初始特征最多。
2. 每个房间扫完整再离开。沿房间周边走一个 U 形，而不是从中间穿过去，这样特征始终保持在 4–8 m 以内。
3. 在门框处停留 2–3 秒，让 LiDAR 同时采到两个房间。轻轻转动扫描仪，让门框、当前房间和下一个房间都进入视场。
4. 长走廊每隔 15–30 m 进一个侧房，作为中间回环。每进一次侧房就形成一个微回环，把漂移限制住。
5. 建筑有多条走廊时，把一条走廊的终点放在能通往下一条走廊的房间里。能避免的话，不要沿同一条走廊原路折返两次（在有重复图案的走廊里，反向的几何可能让视觉匹配模块出错）。
6. 回到起始房间，再走进去 5–10 m 形成重叠后，再停止扫描。

操作要点

- 与墙的距离。让扫描仪与任一面墙保持 0.8–1.5 m 左右。再近就进入最小量程的问题区间；再远，在狭窄走廊里对面的墙就会超出高密度采样范围。
- 扫描仪俯仰。轻微上下摆动扫描仪，确保采到天花板和地面。常见错误是整个扫描过程中都把扫描仪端得完全水平，天花板采样就会不足。
- 室内要开 RTK 吗？纯室内作业不用，关掉 RTK。如果扫描过程中会走到室外，就让 RTK 保持开启，但在室内不要依赖它；算法本身就设计成能平稳地接受 RTK 信号消失。
- 身后的门。只有扫描路线不会再经过这扇门时，才随手关上。否则就让它开着，这样再次进入是一个自然的回环，而不是又一次门事件。
- 镜子。落地镜会在点云里制造出整个“幻影房间”。有条件的话，暂时用床单或浅色布把镜子盖住。没条件就计划在后处理中清除虚假几何。
- 电视屏幕和高光泽柜面。大面积深色高光泽表面回波稀少；它们在点云里显得“很薄”，不必惊慌。
- 厨房和卫生间。要格外小心，这里有大量高光泽瓷砖、镀铬件、镜子和玻璃淋浴门。在这些地方走得更慢。

6.2 楼梯与多层建筑

场景特点

垂直方向的过渡，楼梯间往往光线不足，扶手表面接近镜面。

SLAM 风险

- 纯 SLAM 在垂直轴方向的困难（上楼过程中水平特征很少）。
- 扶手可能引起反射噪声。
- 扫描仪姿态变化（上楼时会倾斜）。

推荐路线

- 单跑楼梯采用手持、自下而上的方式。从底层开始，缓慢上行，在每个楼梯平台停一下。
- 在每个平台停 3–5 秒，把扫描仪转 360°，采集楼梯间的几何。
- 有两个楼梯间时，每个楼梯间都从头到尾扫完，再通过共同的楼层把它们连接起来。

操作要点

- 每一跑楼梯都以正常步速的一半行走。
- 让扫描仪大致保持水平，不要为了“往上看”或“往下看”而大幅倾斜。
- 在最顶层和最底层，先绕楼层平台走一圈再继续。

6.3 大型开阔空间

场景特点

体育馆、仓库、展厅、空旷的停车场。

SLAM 风险

极度退化：大部分特征可能都在远处，而且大多千篇一律。

推荐路线

- 沿墙走，不要走中间。这样特征始终在 10 m 以内。
- 确有必要时可以在内部加几条横穿路线，但要短，并且两端都落在墙边路段上。

- 每个主要区域至少闭合一个内部回环。

操作要点

- 长距离扫描时可考虑使用背包模式以提高稳定性。
- 室外天空开阔时保持 RTK 开启。室内则 GCP 的作用非常明显。
- 在 App 中降低点密度，让预览保持清晰可读。

6.4 室内外过渡

场景特点

门口、入口大堂、车库出口。

SLAM 风险

- RTK 状态突变的冲击：从室外的固定解突然变为室内无解，或者反过来。
- 光线剧烈变化可能让相机在几帧内过曝。

推荐路线

- 在每一处室内外分界处，在门口停 5 秒，让：
 - 相机曝光重新适应。
 - LiDAR 采到两侧的特征。
 - RTK 状态在进出前后稳定下来。
- 尽可能在 RTK 已经固定的状态下进入室外阶段。
- 结束前再回到室内走 5 m，闭合一个回环。

6.5 大型建筑外立面与园区

场景特点

立面、庭院、停车场、相互连接的建筑体量。

SLAM 风险

长距离线性路段；庭院内的 GNSS 遮挡；高层建筑反射造成的多路径信号。

推荐路线

- 先闭合大的外圈回环。先绕整个园区走一圈外围，再进入内部细节。
- 然后以主回环为干线，把内部和庭院细节作为分支扫描。
- 结束前再回到主回环的路径上。

操作要点

- 时刻盯着 RTK 状态。靠近高楼时若降为浮点解，放慢速度，给接收机恢复的时间。
- 在入口、地块角点（界址点）和每个内部庭院规划 GCP。

6.6 城市街道与道路

场景特点

长距离线性场景，路边停放的车辆，行驶中的车流，道路沿线不断变化的建筑和树木。

SLAM 风险

城市峡谷中的伪固定解（参见 2.7）；长距离线性漂移；行驶中的车辆。

推荐路线

- 沿一侧人行道走，然后过街从另一侧人行道返回，这样自然形成一个闭合回环。
- 在主要路口，向每条横向街道做一小段侧向扫描（进去 20–30 m 再返回）。
- 街道很长（> 200 m）时，在路口处分段扫描。

操作要点

- 打开 RTK。注意茂密树冠下的伪固定解。
- 交付成果要求绝对精度时，在路口布设 GCP。
- 远离车流。尽可能只在人行道上作业。

6.7 林业

场景特点

特征密集（树干、树枝），但天空被遮挡；GNSS 信号常常很弱。

SLAM 风险

树冠削弱 GNSS 信号；伪固定解常见；相邻树干在局部看起来很相似。

推荐路线

- 采用多回环条带式路线。按条带行走并保证明显重叠；每条带至少闭合一个回环。
- 接受 RTK 在大部分扫描时间里处于浮点解的现实。要求绝对精度时，在条带端点和交叉处规划 GCP。
- 始终留一只手保持平衡。地面不平，一旦打滑就会带来不必要的运动。

操作要点

- 走慢一点。林地地面不平，在这里保持平稳运动更难。
- 不要只让 LiDAR 正对头顶树冠扫描，变换 LiDAR 的角度去看树干。

6.8 隧道与地下空间

场景特点

完全没有 GNSS，长距离线性几何，照明可能很差。

SLAM 风险

纯 SLAM 场景。隧道内的长距离线性漂移。粉尘和潮湿。

推荐路线

- 往返扫描。返程路径自然形成重叠，回环覆盖率 100%。
- 在两端各在地表或洞口区域走一个小回环，让出入口成为清晰可辨的地标。
- 在地下车库里，按车辆环行的路线走，闭合多个内部回环。

操作要点

- 进入前检查 LiDAR 视窗是否干净（粉尘）。
- 注意滴水 and 地面积水，一次打滑就是一次角加速度事件。
- 相机照明属于锦上添花；车库有灯就把灯打开。

6.9 狭小室内空间

场景特点

狭窄走廊、小卫生间、储藏室、设备间、室内楼梯。

SLAM 风险

最小量程截断（处于扫描仪的近距离极限之内）；狭窄走廊则从相反的方向逼近几何退化：视场里几乎全是近距离的墙面。

推荐路线

- 尽可能与墙保持 ≥ 0.5 m。空间更窄时，接受离扫描仪最近的那面墙被截断，但要确保对面的墙被覆盖到。
- 缓慢走过，再重走一遍。

操作要点

- 不要为了“多采点细节”把扫描仪贴到墙上。效果恰恰相反：距离 < 0.1 m 时 LiDAR 没有稳定回波。
- 墙角是你的帮手。把墙角当作天然的特征簇来用。

6.10 玻璃幕墙与水面

场景特点

大面积玻璃的现代建筑；滨水或河岸场景。

SLAM 风险

玻璃会让激光穿透，只产生部分回波，有时回波来自玻璃后面的室内，从而形成虚假几何。水面产生镜面反射。

推荐路线

- 尽可能从不垂直于玻璃的角度扫描。玻璃回波在掠射角下最弱，在垂直入射时最强，但垂直入射的回波往往正是鬼影层。
- 水面可以扫，但要做好在后处理中清理噪声的准备。

操作要点

- 后处理时，用后处理软件的裁剪和手动滤波功能去除水面和玻璃鬼影。
- 不要归咎于设备，这是物理边界，任何常规商用 LiDAR 都无法在采集阶段解决（参见 3.5）。

6.11 弱光与夜间

场景特点

黄昏、黎明、夜间扫描，光线昏暗的室内。

SLAM 风险

相机的贡献减少；色彩质量下降；3DGS 质量大幅下降。

推荐路线

- 夜间 LiDAR 照常工作，扫描仪的几何采集不依赖光线。
- 接受色彩偏灰、有时呈斑块状的结果。
- 面向 3DGS 的项目，增加便携照明。

6.12 文化遗产与历史建筑室内

场景特点

空间狭小，细节繁复，反射表面多（抛光石材、金箔），光线昏暗。

SLAM 风险

操作员希望采到最多的细节；但必须遵守扫描仪在最小量程和密度上的限制。

推荐路线

- 多次扫描：先扫一遍整体空间，再对每个细节区域各扫一遍。
- 3DGS 采集需要再单独扫一遍（参见 8.8）。
- 频繁闭合回环，文保场所通常有足够的墙面和柱子来支撑回环。

操作要点

- 不要触碰任何表面。与脆弱的文物构件保持 ≥ 1 m。

6.13 船舶、码头与水岸

场景特点

码头、舷梯、系泊的船只、岸边构筑物。甲板可能有轻微晃动。

SLAM 风险

在运动平台上初始化失败。IMU 会把平台的晃动当作扫描仪自身的运动。

推荐路线

- 在岸上初始化，不要在船上。这一点没有商量余地，整个点云的垂直基准都取决于它。
- 初始化完成、扫描仪已经在稳定跟踪几何之后，再登船。
- 接受系泊但仍在晃动的船会带来一定的系统性抖动。测量级作业必须在平静海况下进行。
- 在岸上闭合回环，不要在甲板上。

操作要点

- 如果确实必须在船浮在水上时扫描，最好的折中办法是：在岸上初始化，轻缓登船，快速扫完，然后下船。回环应与岸上行走路线有一部分重叠。

7 · 外业质量检查与续扫

发现数据问题的最佳时机是离开现场之前。在现场花 10 分钟做质量检查，可以省下数小时甚至数天的返工。

7.1 扫描中盯住 App 的实时预览

扫描过程中，要时不时看一眼 App 的实时预览。需要关注：

- 覆盖完整性。预览中是否有没有点的灰色区域？回去补扫。
- 轨迹形状。显示的路径是否与你记忆中实际走的路线一致？如果某个回环看起来断了或出现折角，说明算法在吃力。
- RTK 状态条。室外绿色（固定解）是健康状态。开阔天空下黄色或红色持续超过几秒，就要查明原因。
- 电量。规划好热更换电池的时机。
- 剩余存储空间。TF/microSD 卡存满时，扫描会毫无提示地结束。

7.2 什么时候该停下来重扫

出现以下情况时，停下来，要么重做有问题的那一段，要么放弃整个扫描：

- 实时预览中出现空洞或缺口，而你确定走过那里。
- 轨迹上出现明显的、与实际不符的折角。
- 开阔环境下 RTK 处于伪固定解超过 30 秒（你会看到坐标大幅跳变）。
- 有人在扫描仪前方走动了好几秒钟。
- 扫描仪报告异常。不要勉强继续扫描。10 分钟的重扫远胜过 2 小时的返场。

7.3 正确使用续扫（Resume Scan）

续扫功能让你从上一次扫描停止的地方接着扫。以 Tersus 的 SLAM 产品为例，需要固件 v1.0.3 及以上版本。

✓ 建议这样做

- 回到上一次扫描中特征丰富的路段（不要选空荡荡的走廊）。
- 与之前的轨迹至少重叠 5–10 m。
- 续扫段的初始化要求与全新扫描完全一样（按 2.10 的要求执行）。
- 所有续扫段保存到同一个项目文件夹。

✗ 不要这样做

- 零重叠续扫，各段将无法拼接。
- 指望全局回环闭合能在两个独立的续扫项目之间找到匹配。以 Tersus 的 SLAM 产品为例，目前不支持跨项目回环闭合。
- 在长走廊出口处续扫并指望立刻拼上。先走回特征丰富的几何里。

⚠ 警告：接缝区域可能出现轻微的点云分层。对精度要求极高的项目，规划路线时，让续扫接缝落在便于在后处理中裁掉或重扫的墙面或细部上。

7.4 停止扫描后的 10 秒保存流程

按下“停止”时：

1. 保持扫描仪静止。
2. 观察指示灯变为黄色（正在保存）。
3. 等待 App 显示“保存成功”。
4. 在保存确认出现之前不要关机。
5. 等待 ≥ 1 分钟再开始下一项任务。

跳过这套流程是文件损坏最常见的原因。

7.5 地面控制点（GCP）布设与最佳实践

GCP 是把一次“还不错”的扫描变成测量级交付成果最有力的工具。它也是本意良好的操作员最容易在无意中毁掉自己数据的地方。所以下面这一节写得很长。

7.5.1 GCP 对点云究竟起什么作用

GCP 是一个已知真实坐标的点（通常由 GNSS RTK 流动站或全站仪测得，或者是已有的测量标石）。在扫描中采集一个 GCP，就是在告诉后处理软件：“此刻我正好站在坐标为 (X, Y, Z) 的那个点上。”有了至少三个不共线、坐标已知的 GCP，后处理软件就能解算出一个刚体变换（旋转 + 平移），把整个点云最优地放入真实坐标系。GCP 多于三个时，解算器用最小二乘法还能诊断内部变形、标记粗差点，并给出逐点残差，告诉你这次扫描与真实世界的吻合程度。

GCP 改善三件事：

1. 绝对精度。整个点云被平移和旋转，使已知点与其真实坐标对齐。
2. 倾斜改正。参见 9.1 原因 B，一次远端已发生倾斜的漂移扫描，可以被分布良好的 GCP 拉平。
3. 可核查性。残差给你一个可以写进报告的数字。“相对 GCP 的绝对 RMS：18 mm”是站得住脚的表述；“我看着挺好”不是。

7.5.2 布置的常识性规则

六条规则覆盖了 90% 你需要做对的事。每条都有直观的解释，不需要数学。

规则 1——不要把 GCP 布成一条直线

为什么

一条直线上的三个点不能唯一确定三维旋转。点云可以绕这条线转动，而三个点的残差都不会变化。解算器仍然会给出一个答案，但这个答案不唯一，而且离这条线较远的部分会因为任何一点测量噪声而大幅摆动。

实际做法

退后一步，在场地平面图上看你规划的 GCP 位置：它们应当围成一个多边形，而不是一条线。哪怕是一个很扁的三角形，也远比一条直线好得多。

✗ 不要把五个 GCP 全部布在建筑的同一侧。

✗ 不要把所有 GCP 都布在长直道路的中线上。

✓ 场地本身是线状的（如道路、管线），就把 GCP 布成之字形，在中线左右交替。

规则 2——GCP 要覆盖整个场地范围

为什么

解算器在 GCP 包络范围之外是外推的。包络（所有 GCP 的凸包）之内是内插，误差小；包络之外是外推，误差随离包络的距离增大而增大。

实际做法

- 把 GCP 推到场地的角点和边缘，不要只放在内部。
- 如果场地是一个 100 m × 60 m 的园区，在四个角附近都布 GCP，中间再加至少一到两个。
- 如果 GCP 只覆盖了半个场地，另一半就会自由漂移。

✗ 不要把 GCP 集中在入口处而忽略场地后部。

✗ 如果容易到达的位置都集中在同一个区域，不要只在这些位置采集。

✓ 场地的每个“区域”内部或边缘都应至少有一个 GCP。

规则 3——包含高程差异

为什么

所有 GCP 都在同一高程的点云，水平约束强，垂直约束弱。扫描可以绕 GCP 所定义的水平面“倾斜”，而解算器可能察觉不到。

实际做法

- 多层建筑至少在两个楼层布设 GCP（最少是底层加顶层）。
- 有地形起伏的场地，把 GCP 布在不同的地面高程上（坡顶、坡底、坡中）。

规则 4——最少要几个，多少才算“够”

最少 4 个：稳健解算的硬性要求（3 个在数学上足够，但没有多余观测来剔除粗差点）。推荐的基准数量：小型场地（范围 < 50 m）6 个，典型建筑规模的项目 8–12 个，园区规模或高精度作业 12–20 个以上。

可以这样理解：只有 4 个 GCP 时，一次采集失误就毁掉整个解算；有 8 个 GCP 时，一个粗差点会被自动标记并剔除。

规则 5——把 GCP 布设在真正能干净采集的地方

定位底板的中枢需要一小块干净、平整的区域，才能把扫描仪稳稳地放在 GCP 上。一个坐标很好、却位于灌木丛生、无法到达的山坡上的 GCP 毫无用处。

✅ 适合的 GCP 表面：硬化地面、混凝土基座、路面标线、能够到达的建筑角点、稳定的人工地物。

❌ 不适合的 GCP 表面：松软土壤（底板下沉）、草地（底板晃动）、沙地、会移动的碎石、金属格栅（不平整）、松动的地砖。

💡 提示：如果现场缺少天然的 GCP 表面，带几个钉头标靶（或者在稳定的路面上画一个 X）。在控制测量之前布好，用全站仪或 RTK 流动站测出坐标。这样它们就成了已知坐标点，扫描时可以用扫描仪采集。

规则 6——GCP 在整个扫描期间必须保持稳定

一个在“测定已知坐标”和“扫描仪采集”之间发生了移动的 GCP，比没有 GCP 更糟，它会主动把解算拉向错误的答案。

❌ 不要用可能被人踢到的交通锥。

❌ 不要用贴在草地上的胶带。

❌ 不要用松动的钉头标靶。

✅ 使用固定、不可移动、并且在整个测量窗口内明显未被扰动的标靶。

7.5.3 如何测量 GCP 本身

点云的精度不可能超过用来约束它的 GCP 的精度。所以 GCP 坐标必须比 SLAM 交付成果的目标精度更高。

交付成果目标	所需的 GCP 来源
仅要求相对精度（不要求绝对精度）	不强制要求 GCP
绝对精度 ≤ 5 cm	RTK 流动站固定解，每点单次观测
绝对精度 ≤ 2 cm	RTK 固定解两次观测，或全站仪

交付成果目标	所需的 GCP 来源
绝对精度 $\leq 1\text{ cm}$	全站仪并做检核观测

记录每个 GCP 由哪台仪器、在哪次作业、什么条件下测得。

沿用既有控制点前，务必核查它们的来历：谁布设的，用什么方法测的，坐标值是否仍然有效（是否为最新成果），坐标值属于哪个坐标系或大地参考框架。混用来源与质量不同的控制点可能带来隐患，你可能会看到残差很差并出现粗差点。如果要使用既有控制点，最稳妥的做法是连同新布设的 GCP 一起重新观测。

7.5.4 扫描中采集 GCP——详细操作流程

1. 正常走向 GCP，保持扫描运动，不要遮挡 LiDAR。
2. 把定位底板的对中锥精确放在 GCP 标记上。扫描仪必须装在底板上，不要拆下。
3. 保持完全静止约 10 秒。身体不动，双手不要挪动。缓缓呼气并保持姿势。App 采集 GCP 期间的抖动会破坏这次采集。
4. 在 App 中点击“添加控制点”（Add Control Point）。
5. 等待确认。App 显示 GCP 已采集之前不要移动。
6. 目视检查对中锥没有滑动、底板没有晃动、扫描仪位置符合预期。
7. 平稳地继续走向下一个标靶。

7.5.5 常见 GCP 错误及其典型表现

常见 GCP 错误	最终点云中的典型表现
所有 GCP 共线	点云沿 GCP 连线方向看似正确，但离开该线后出现倾斜或扭转
GCP 集中在一个区域	该区域拟合很好，场地其余部分自由漂移
所有 GCP 在同一高程	平面拟合很好，但建筑整体呈现倾斜
采集时操作员移动	某个 GCP 残差很大，被标记为粗差点
标靶在控制测量与扫描之间发生移动	某个 GCP 残差很大；若多个标靶移动则多个 GCP 残差大
输入了错误的坐标	该点残差极大；有时整体解算失败
GCP 位于松软地面	残差可能只是中小量级，但该局部区域整体带有偏差

常见 GCP 错误	最终点云中的典型表现
GCP 少于 4 个（只有 3 个）	解算无粗差保护；结果看起来正常但不可信

7.5.6 扫描中高效的 GCP 采集顺序

规划路线时，让 GCP 的采集顺序不浪费多余的走动：

- 第一个 GCP：在起点附近、扫描稳定后尽早采集（开始后 2–3 分钟最理想）。
- 中途的 GCP：分布在整条路线上。如果计划有 8 个 GCP、扫描 30 分钟，大约每 3–4 分钟就应采集一个。
- 最后一个 GCP：在最终回环闭合前不久采集，为扫描的末端提供锚定。
- 不要试图在开头把所有 GCP 都采完，否则扫描的末端会从它们那里漂走。
- 不要把所有 GCP 都留到最后，否则扫描的开头没有锚定。

7.5.7 室内 GCP 的几点特别提示

上面的 GCP 指导大多针对室外场地和 RTK 测量的标靶。纯室内项目：

- 用全站仪从室外已知坐标的测站引测室内 GCP。每层至少测 4–8 个室内点。
- 或者在墙上贴大幅打印的标靶纸，并测出其位置。它们就成为室内 GCP。
- 多层建筑的室内 GCP 应覆盖所有楼层（只锚定一层时，跨层漂移很常见）。
- 记住规则 3：室内 GCP 也要有高度差异，而不只是地面位置。贴在 1.5 m 高度的墙面标靶很有帮助。

7.5.8 实例

场景：80 m × 50 m 的两层办公楼，室内外一体扫描，要求通过 GCP/标靶达到 3 cm 绝对精度。

推荐的 GCP 布设：

- 室外 4 个 GCP，布在建筑四角（RTK 固定解测量）。
- 室内一层 2 个 GCP（打印标靶，全站仪测量）：一个在大堂，一个在最远端。
- 室内二层 2 个 GCP：一个在楼梯附近，一个在二层最远端。
- 屋顶出口处 1 个 GCP（如果能上去，用 RTK 测量），提供高程差异。

- 合计：9 个 GCP，平面分布均匀，分布在三个高程上，冗余充足。这个布设干净利落地满足了规则 1–6 的检查项：不共线、覆盖全范围、有高程差异、满足“至少 4 个”的最低要求、位于稳定表面，并且在出问题时有剔除一个粗差点之余地。

7.6 读懂后处理报告

在后处理软件中处理完成后，报告会告诉你：

- 是否检测到回环闭合？有的话，会列出哪些路段相互匹配。没有的话，说明这次扫描没有闭合，漂移没有得到改正。
- 是否存在 RTK 伪固定解时段？后处理软件会标记 RTK 位置流中的可疑跳变。
- 有没有跟踪中断？这些是前端丢失跟踪的时刻。标记出来做检查。
- 相对 GCP 的最终绝对误差估计。导入了 GCP 时，后处理软件会给出逐点残差。

如果报告显示没有识别出回环闭合，可选的做法是：

1. 用更好的重叠重扫（首选）。
2. 接受漂移（用于非正式或预览性质的交付成果）。
3. 使用 GCP 把点云拉入绝对坐标系，即使没有回环闭合。

8 · 从原始数据到交付成果——后处理

后处理是把扫描仪的原始数据变成交付成果的环节。本章涵盖：处理环境、各处理模式之间的选择逻辑、GCP 与 RTK 在后处理中的作用，以及 3DGS 的采集方法。

8.1 处理环境

电脑的最低配置和推荐配置因产品而异，但有一条现场通用的规律：后处理的计算量很大，尤其是大回环、高密度点云、影像赋色和 3DGS。

- 使用现代多核 CPU。
- 若软件使用 GPU 加速重建，配置符合厂商要求的 NVIDIA/AMD 显卡。
- 内存按预期最大项目配置，而不是只够跑演示数据。
- 工作目录放在 SSD（固态硬盘）上。
- 保持显卡驱动为最新版本。
- 长时间处理任务期间关闭系统休眠。
- 除非软件明确支持非英文路径，否则项目路径使用纯英文路径（不含中文或特殊字符），以获得最大兼容性。

8.2 安装与授权

大多数桌面端 SLAM 软件都需要安装程序、授权账号、在线授权或加密狗、或者激活服务。把授权当作项目准备工作的一部分。

1. 如有需要，先安装驱动或授权工具。
2. 安装后处理软件。
3. 激活授权、加密狗或账号。
4. 在正式项目之前，先启动软件并打开一个示例项目。
5. 在项目记录中写明软件版本、授权状态和所用的处理模式。

8.3 预处理检查

如果软件提供预处理或完整性检查功能，先运行它。用它来：

- 验证原始数据的完整性。
- 报告被截断或缺失的文件。
- 标记跟踪中断。
- 标记可疑的 RTK 跳变或伪固定解时段。
- 推荐处理模式，或提示该扫描需要重扫。

✓ 在启动耗时的重建之前，先做最省时的质量检查。它能在几个小时的处理开始之前发现问题。

8.4 处理模式——选择逻辑

不同产品的模式名称不同，但逻辑是相通的。

- 标准模式（默认模式）。用于特征适中的典型混合场景。
- 开阔模式（弱特征模式）。用于广场、空旷的停车场、长直道路、河岸、滨水区、林中空地等局部几何特征薄弱的场景。
- 狭窄模式（受限空间模式）。用于狭小室内、地下车库、走廊、矿井、管沟和综合管廊。

何时切换模式：如果默认模式出现点云分层、层间错位或配准失败，先选择与场景几何相匹配的模式再处理一次，不要急于判定该扫描无法挽救。

8.5 正确导入 GCP

最常见的 GCP 导入错误是“假 CSV”：把 .txt 或 .xlsx 直接改后缀为 .csv，并不能把它变成 CSV 文件。正确做法：

1. 在 Excel 或文本编辑器中打开坐标列表。
2. 使用“另存为”→“CSV（逗号分隔）(.csv)”。不要只改文件名。
3. 检查文件编码。除非软件另有规定，UTF-8（无 BOM）通常最稳妥。
4. 确认列顺序：点名、X、Y、Z，或严格按项目模板。
5. 导入前用文本编辑器预览。应看到以逗号分隔的纯文本，而不是电子表格的二进制内容。

8.6 处理时间预期

处理时间与原始数据量不是线性关系。具体比例因产品而异，但趋势是一致的：

- 时长短、扫描规范的作业，处理速度远快于时长长、回环未闭合的作业。
- 回环多、影像多、大量使用 GCP、包含 3DGS 的大型项目，处理时间会明显更长。
- 原始数据质量差，可能迫使软件多次迭代，或需要人工检查。

对客户的预期要如实。大项目承诺“当天交付”而做不到，是客户不满的常见来源。

8.7 输出格式与适用场合

常见交付成果包括：

- LAS/LAZ。测量级点云交付成果，GIS/CAD/BIM 软件支持广泛。
- PCD/PLY。机器人、科研和开源处理流程。
- RCP/RCS 或其他厂商专有 BIM 格式。Autodesk 与 BIM 集成工作流。
- 带相机位姿的全景影像。贴图、360° 查看、质量检查和下游可视化。
- 3DGS 或网页可视化包。客户虚拟漫游、市场展示和周边环境可视化。

处理之前，务必确认所需的坐标系、单位、文件格式、抽稀、赋色和精度报告要求。

8.8 3DGS——是什么、不是什么、以及如何为它采集

三维高斯泼溅（3DGS）是当前版本中最容易被误解的功能。本节的目的，是让客户和操作员对它有一致的认识。

8.8.1 3DGS 是什么

3DGS 是一种从多角度拍摄的大量照片中重建出照片级真实感、可渲染三维场景的技术。它不像点云那样把几何存成离散的点，而是把场景表示为大量微小的三维高斯基元（splat）的集合，每个基元都有自己的位置、大小、朝向、颜色和不透明度。从任意视点渲染时，这些基元相互融合，生成接近照片效果的图像。

得到的场景可以走进去、可以放大、可以渲染，用于可视化、虚拟漫游、市场展示和客户汇报时效果非常出色。

8.8.2 3DGS 不是什么

- 不是测量工具。3DGS 重建不保证厘米级几何精度。不要在 3DGS 交付成果上标注 “< 1 cm”。
- 不是“点云美化器”。扫得很差的点云，不会因为跑了一遍 3DGS 就变成好的 3DGS 场景。这两种成果的输入不同，失败方式也不同。
- 不等于带颜色的点云。彩色点云是每个点的 XYZ + RGB；3DGS 从多个视角建模外观，能表现随视角变化的效果（高光、反射），这是点云做不到的。

⚠ 警告：这两种成果的成功标准相互独立。同一次扫描，点云可以很好而 3DGS 一般，反过来也可能。把它们当作两种独立的交付成果，各自遵守各自的采集规范。

8.8.3 高质量 3DGS 的采集规范

要让 3DGS 效果好，相机需要在稳定光照下、从多个角度、用大量照片看到每一个重要表面。这比点云采集路线的要求高得多。四条原则：

1. 更多角度。每个目标表面至少从 3–4 个不同方向拍到。沿一面墙单向走过一次是不够的，要绕着它走。
2. 更多照片。在 App 中缩短拍照间隔（例如从 1 s 改为 0.5 s）。同一区域多走几遍。
3. 饱和覆盖路线。不要只走一条线性路线，而是用相互重叠的回环覆盖场景，形成“交织路线”。以建筑立面为例：先近、再远、再中距离，然后从两端各走一遍。
4. 光照稳定，运动可控。强烈的阴影与阳光交界会产生飘浮伪影（floaters，悬浮的高斯基元伪影）。行走速度必须均匀；任何运动模糊都会严重破坏特征匹配。

8.8.4 饱和覆盖路线——怎么理解

点云采集走的是一条路线。3DGS 采集走的是一张路线网，这些路线合起来从多个角度覆盖每一个表面。

8.8.5 含 3DGS 项目的实际安排

- 为点云采集和 3DGS 采集分别安排时间预算。一个典型场景大约是：点云 20 分钟 + 3DGS 40–60 分钟。
- 使用均匀、稳定的光照。阴天的自然光最理想；强烈的定向阳光会把生硬的阴影“烘焙”进模型。
- 走得慢，3DGS 采集时低于 1 m/s，并尽量端稳扫描仪。
- 同一个 3DGS 项目里，不要在一天中相差很大的时段扫同一位置，光照差异会干扰重建。

8.9 精度手段的组合——优先级

当项目需要最高精度时，按以下优先级组合各种手段：

1. 干净的扫描（参见第 5、6 章）。扫描本身出了根本性问题，再多后处理也补不回来。
2. 地面控制点（参见 7.5）。单一手段中对精度提升最强的一项。
3. RTK 校正。GCP 不可用而 RTK 全程稳定时使用。
4. 处理模式选择（参见 8.4）。让求解器与场景相匹配。
5. 后处理清理。对玻璃、水面、动态物体做人工过滤。

9 · 异常图谱与恢复

本章按“用户看到了什么”来组织，而不是按软件报了什么错。对每一种可见症状，我们给出：它长什么样、通常由什么引起、按什么顺序排查、以及如何处理或预防。

关于错误代码。本扫描仪的软件栈与厂商其他产品线相互独立，错误代码和提示文字各不相同。本章聚焦于按现象诊断，不依赖具体后处理软件的版本。

9.1 倾斜 / 偏斜

典型表现

本应竖直的墙明显倾斜；本应水平的地面向一侧翘起；整个点云相对于重力方向像被“转了一下”。有三种根本原因，各自的处理方法不同。

原因 A——IMU 标定异常

典型特征

倾斜从扫描一开始就存在。即使是站在水平地面上静止扫描的一段数据，也是倾斜的。

自检步骤

1. 把扫描仪放在一个完全水平的表面上（用水准气泡或水平尺确认）。
2. 保持完全静止。
3. 启动一次 1 分钟的扫描。期间完全不要移动扫描仪。
4. 停止、保存，导入后处理软件。
5. 在查看器中检查扫到的地面是否水平。如果静止扫描得到的地面也是倾斜的，几乎可以肯定是 IMU 标定出了问题。

处理方法

通过经销商或常规支持渠道联系厂商技术支持。处理方式是远程 IMU 标定：由工厂把 IMU 标定参数重新写入设备。不需要把设备寄回。

原因 B——未闭合回环导致的漂移

典型特征

近端数据（扫描初期）看起来正常；远端数据（接近结束）逐渐倾斜。倾斜量随着与起点距离的增加而增大。

处理方法

1. 重扫，并有意识地安排回环闭合：不要让扫描仪走得太远还不回到已扫过的区域。
2. 或者在扫描“倾斜”的那一端布设 GCP，后处理软件的 GCP 校正会把点云旋转到正确的坐标框架中。

原因 C——环境本身就是倾斜的

典型特征

数据与环境完全一致，只是你预期它应该是“水平”的。这种情况见于已经沉降的老建筑、正在浇筑的施工现场，以及地面本身就不平的场合。

处理方法

以 GCP 或 RTK 为参考。以绝对坐标作为真值依据，而不是点云内部的几何关系。

9.2 点云分层 / 层间错位

典型表现

墙面表现为两层或多层平行的面。地面上方或下方出现一层“幽灵”地面。室外扫描的地面分成两层。

 深入理解：大多数点云分层并不是扫描仪的能力上限，而是可控的原因造成的。

根本原因（按出现频率从高到低）：

根本原因 A——环境因素（最常见）

- RTK 伪固定解。城市峡谷、林冠下、狭窄山谷。RTK 报告固定解但位置是错的；SLAM 被喂进了错误的锚点，地图随之扭曲。
- 玻璃 / 水面 / 镜面反射。玻璃后面的虚假几何形成第二“层”。

- 动态物体。移动的车辆或行人被短暂地当作几何记录下来。

根本原因 B——操作行为

- 移动过快、急停、手腕转动（参见 2.9）。
- LiDAR 被遮挡（参见 2.8）。
- 初始化不稳定（参见 2.10）。

根本原因 C——路线规划

- 没有回环闭合，或回环重叠 $< 5\text{ m}$ 。
- 单条长距离线性扫描，中间没有中间回环。
- 长直走廊没有进侧房增加特征变化。

根本原因 D——设备边界（最少见）

- 极端退化场景：长隧道 + 完全无特征的墙面 + 没有 GCP。

恢复流程：

步骤 1——切换处理模式

大多数分层可以通过这一步解决。

- 场景特征稀少时，先试开阔模式。
- 场景为狭小室内 / 地下时，试狭窄模式。
- 重新处理并检查结果。

步骤 2——切换模式无效时做根因分析

- 查看后处理报告：是否检测到了回环？
- 查看 RTK 日志：是否有长时间的伪固定解时段？
- 查看轨迹图：是否有折点或跳变？
- 查看时间线：是否有一段时间存在遮挡或快速移动？

步骤 3——做出决定

- 快速移动或遮挡导致的折点 → 用续扫功能重扫该段。
- 伪固定解 → 关闭 RTK 重扫，或加 GCP 并在后处理中禁用 RTK 校正。
- 未检测到回环 → 按规范闭合回环重扫。
- 设备极限情况 → 这类情况通常无法修复；据此向客户如实说明预期。

 提示：经验是真正拉开差距的因素。处理的数据越多、迭代得越多，你就越能一眼看出点云分层的原因。把每一次失败都当作学习素材。

9.3 鬼影

典型表现

特征以很小的偏移重复出现。在细小部位最明显：椅子腿、栏杆、薄墙。

原因

- 动态物体过滤不完整（有人或车辆短暂进入扫描）。
- 扫描仪在高振动环境中快速移动（行走不平稳）。
- 离墙太近（在扫描仪最小量程以内）：鱼眼边缘畸变与近距离几何问题叠加。

处理方法

- 动态物体：在后处理中人工过滤（第三方软件）。
- 运动引起的鬼影：放慢速度重扫。
- 距离太近引起的鬼影：条件允许时与墙面保持 $\geq 1\text{ m}$ 。

9.4 颜色拖尾 / 错位

典型表现

颜色越过正确的几何边界。一把红椅子在身后的墙上留下红色“光晕”。

原因

- 物体靠近相机视场边缘时的鱼眼镜头边缘畸变。
- 行走过快造成运动模糊。
- 多遍覆盖不完整：某个表面只被一台相机看到，颜色无法融合。

处理方法

- 放慢行走速度。
- 多走几遍，尤其是做 3DGS 时。
- 清洁镜头（参见 4.2）。

9.5 “幻影”人像

典型表现

最终点云中出现若隐若现的人形轮廓。

原因

有人穿过扫描区域，而没有被过滤掉。

处理方法

- 旁人保持 ≥ 20 m 距离的规则。
- 对有人使用的场所，协调安排安静的时间窗口再扫。
- 在后处理中人工过滤。

9.6 玻璃与水面噪点

典型表现

玻璃后面出现虚假点（“幻影房间”），水面上方出现飘浮噪点。

处理方法

采集阶段接受它。在后处理中人工清理（后处理软件的裁剪功能，或 CloudCompare 等第三方工具）。这是全行业的共性限制，目前没有任何常规商用 LiDAR 能在采集时解决。

9.7 室内外颜色不一致

典型表现

墙面在室内偏蓝、室外偏黄，交界处有明显的接缝。

处理方法

通常在软件层面解决。升级到最新版后处理软件并重新处理。若问题依旧，上报技术支持，这类情况大多在较新的处理流程中已得到解决。

9.8 硬件异常与自检

9.8.1 物理损伤

症状

开机不正常、扫描中断、LED 指示灯异常、LiDAR 数据缺失、异常声响。

诱因

跌落（即使只是从腰部高度掉到硬地面）、挤压（放在背包里被重物压住）、进水。

处理方法

返厂维修。不要自行拆开设备：LiDAR、相机和 IMU 之间的精密对准关系无法在现场恢复。

9.8.2 IMU 标定异常

自检方法参见 9.1 原因 A。处理方法是厂商技术支持进行远程 IMU 重新标定。

9.8.3 数据拷贝不完整

症状

文件出现在拷贝目标位置，但无法在后处理软件中打开。文件大小比预期小。后处理软件报告数据缺失或损坏。

诱因

拷贝被中断（电脑休眠、USB 断开、读卡器接触不良）。TF / microSD 卡存在坏扇区。

9.8.4 镜头污染

症状

全景影像出现明显的色块或模糊区域。3DGS 失败或伪影严重。部分区域点缺失或颜色错误。

处理方法

用随机附带的擦镜布清洁（参见 4.2）。若可见明显划痕，联系技术支持。

10 · 从新手到认证操作员

培训用户与交付硬件同样重要。本章定义一个四级能力模型，以及帮助人员逐级提升的课程体系。

10.1 四级能力模型

级别	能力要求	达到所需时间	考核方式
L1 观察者	能在旁观看一次扫描；能识别设备的主要部件；能说明什么是点云	接触 1 小时	口头讲解扫描仪各部件
L2 操作员	能在熟悉的场地上，无需他人协助，独立完成一个标准的室内或室内外混合项目，从开始直到交付成果	约 2–3 天，含练习扫描	在一栋已有测量成果的建筑内独立完成一个项目，使用 GCP，精度在允许范围内
L3 高级操作员	能处理复杂 / 特殊 / 混合场景（林业、隧道、船舶、文保）；能目视诊断倾斜和点云分层，并通过切换处理模式和路线规划挽救大多数项目；能执行 3DGS 采集规范	约 2–4 周，需接触多种类型的项目	在隧道/地下空间、林业、多栋建筑园区三类场景中各完成一个项目，并成功交付
L4 专家操作员	能培训 L1–L3；能根据扫描数据和后处理报告诊断任何失败的根本原因；能编写项目 SOP；能代表组织与客户进行技术层面的沟通	约 6–12 个月，需有实际教学和故障排查经验	培训至少两名操作员通过 L2 认证；发布至少两份项目失败的内部复盘报告，写明根本原因

10.2 各级课程

L1 课程（1 小时）

- 阅读第 0、1 章。
- 观看一次扫描。
- 熟悉本指南的符号约定。

L2 课程（2–3 天）

- 第 1 天上午：第 0–3 章。组装练习，第一次空扫。
- 第 1 天下午：在指导下完成第一次实地扫描。一起在后处理软件中检查结果。

- 第 2 天上午：第 4、5、7 章。用不同路线把同一个熟悉的空间扫三次，比较结果。
- 第 2 天下午：第 6 章中的两个场景（挑选与操作员今后工作最相关的）。GCP 采集练习。
- 第 3 天：在已有测量成果的场地上独立完成一个项目。对照已知真值检查交付成果。

L3 课程（2–4 周）

每周从第 6 章中选一个复杂项目完成，应包括：

- 隧道或深层地下空间。
- 林业或林冠茂密的场地。
- 带室内外过渡的多栋建筑园区。
- 文保 / 细节密集型场地，或水边场景。

每个项目都要：执行、检查交付成果、在自己的工作中至少找出一处错误并记录下来。

深入阅读 8.4 和 8.8。在一个简单场景上练习 3DGS 采集。

L4 课程（持续进行）

- 在一名现有 L4 的指导下，带一期 L1 到 L2 的培训班。
- 用真实客户数据做两次“失败深度剖析”，找出根本原因，写出纠正流程。
- 至少向内部培训体系贡献一项改进或一份场景作业手册。

10.3 实训项目——建议清单

对于要建立手持式 LiDAR SLAM 培训体系的组织，以下实训项目按顺序逐步建立能力：

1. 单层办公室（室内基础项目）。
2. 多层办公楼（楼梯 + 多个楼层）。
3. 小型园区（室内外过渡 + 外部回环）。
4. 地下停车场（纯 SLAM）。
5. 林业样地（GNSS 信号弱 + 地形起伏）。
6. 线性道路 / 隧道（往返扫描回环纪律）。
7. 带 3DGS 交付成果的文保建筑内部（采集规范 + 后处理）。

8. 点云分层恢复演练：故意做一次质量差的扫描（快速移动、遮挡），然后通过切换处理模式和根因分析尽可能挽救。

附录 A1 · 外业检查清单

A1.1 采集前两分钟检查清单

- 设备已组装完毕并机械锁紧。
- 镜头和 LiDAR 视窗洁净。
- 电量充足；备用电池在手。
- 存储介质已插入；剩余空间已确认。
- 固件/软件版本满足所需功能。
- App/手簿已连接；实时预览可见。
- 室外作业时已确认 RTK 状态。
- 已选定初始化位置：稳固、水平、静止、特征丰富。
- 路线已预演：入口、回环点、GCP、出口。
- 室内作业时门已打开、门楔已放好、在场人员已告知。
- 已检查操作员站位，确保起始时 LiDAR 无遮挡。

A1.2 路线规划检查清单

- 每个主要区段是否都有回环闭合或往返重叠？
- 长走廊是否用侧房、侧向小回环或控制点打断？
- 大型开阔空间是否先沿边缘扫描、再做横穿？
- 室内外门口是否作为暂停点处理？
- 玻璃、镜面、水面、雨、粉尘、车流和人群是否已考虑在内？
- 单次扫描规模是否合理，还是应该拆分并用续扫衔接？

A1.3 地面控制检查清单

- GCP 不在一条直线上。
- GCP 覆盖整个作业区域范围。

- 场地有多层、楼梯、坡道或屋顶时，GCP 有高程上的分布差异。
- 至少有四个 GCP；小型场地宜有六个或更多，园区级或高精度作业需要更多。
- 每个 GCP 都位于稳固、可到达、干净的采集面上。
- GCP 坐标由精度高于交付成果目标精度的仪器测得。
- GCP 采集顺序让锚点分布在整个扫描过程中，而不只是集中在开头或结尾。

A1.4 停止 / 重扫决策检查清单

出现以下情况时，停止并重扫或续扫有问题的区段：

- 实时预览中出现空洞或缺口，而你确定已经走过那里。
- 轨迹上有与实际不符的明显折点。
- RTK 状态显示可疑跳变或伪固定解。
- 有人或有物遮挡了 LiDAR 数秒。
- 在关键过渡段，有人在扫描仪前方开门。
- 扫描仪报告异常。

A1.5 十秒保存流程

1. 端稳扫描仪。
2. 只在能保持稳定时才按下停止。
3. 观察保存指示。
4. 等待保存确认。
5. 保存完成之前，不要关机，也不要开始下一项任务。

附录 A2 · 推荐学习资源

A2.1 通用练习

- 把同一个空间扫五次，每次换一条路线。在后处理软件中比较五次结果。没有什么比亲眼看到自己的失误出现在点云里更能快速养成操作纪律。
- 记失败日志。每次扫描失败或结果不理想，写下你看到了什么、原因是什么、你是怎么补救的。积累 10 条后回头重读。
- 跟随有经验的操作员。观察他如何持握扫描仪、如何控制节奏、在门口如何停顿、如何处理 RTK 弹窗，以及何时决定停止。

A2.2 通用技术背景

想深入理解底层技术的操作员，可以在任何技术教材、课程或厂商中立的培训资料中自学以下主题：

- 手持式 SLAM 测量。
- 回环检测。
- LiDAR + IMU 紧耦合融合。
- RTK GNSS 基础。
- 地面控制与坐标系统。
- 三维高斯泼溅（3DGS）。

这些是任何手持式 SLAM 系统在学术界和行业内的共识基础。理解了它们，第 6 章的每个场景都会更容易规划，第 9 章的每种异常都会更容易诊断。