

# Mapping 3.0 阶段性测试报告

<https://idriverplus.com>

智行者定位组

## 摘要

本文档描述了 9 月至 11 月 Mapping 3.0 的算法改进情况，重点描述了针对室内 ODD 拓展、开放起始点 GPS 等内容的改进项。同时，详细描述了 11 月的测试样例，总结目前算法的特点。总体而言，11 月建图版本相比先前有重要改进：允许室内室外混合建图，取消起始点 GPS 约束，对平面和坡道的处理更加智能，对重影和回环等问题提供了新的修正方法。

**关键词：**建图，定位，室内拓展

## 1 Mapping3.0 计划

### 1.1 整体计划

Project Mapping 3.0（以下简称 3.0）是为了针对既有 2.0 建图框架提出的新算法框架。该计划于 2019 年 7 月提出，作为定位组 2019 年下半年主要算法开发任务。按照 7 月份定位室整体规划，3.0 主要有以下几个里程碑：

1. 在 2019 年 7 月底，实现 2.0 的算法移植与重构，完成 2.0 的基础功能。
2. 在 2019 年 8 月底，实现流水线式自动建图过程，完成本地服务器部署。部分或完全地解决 2.0 遗留问题。

3. 在 2019 年 9 月底，完成 3.0 的调试工具，完全解决 2.0 存在的遗留问题。在云端部署 3.0 系统并取代 2.0，承接新的建图任务。

随着时间发展，3.0 的基本任务已达成。整个自动建图系统于 9 月 4 日部署至阿里云 OS 上，稳定运行两个月，目前已承接绝大多数建图任务。截至 11 月 21 日，已完成建图任务共 111 个，发布版本自 3.0.0 推进至 3.1.5，很大程度上减轻了建图侧的运营负担。

### 1.2 11 月任务列表

按照 11 月定位组计划，我们主要在 3.0 中实现以下功能：

- **ODD 拓展：**允许室内停止/出发，允许同层结构的室内建图与定位。
- **放开起始点 GPS 约束：**不再严格要求起始点的 GPS 和航向均有效。

以上两个目标对 3.0 整体算法影响较大，因此我们在 11 月对 3.0 进行完整的测试和算法改动说明。同时，回顾 9 月至 11 月的代码改动。

### 1.3 本报告结构

本报告首先描述针对 11 月任务的分解过程，然后描述各方向改动部分的原理介绍。第 3 章描述现有数据集上完整测试结果和室内场景专题测试结果，并给出几个典型例子。最后，总结本次报告，说明对外的改动项，并给出未来的展望。

## 2 11 月改进内容与方法

### 2.1 11 月内容与难点分析

11 月的两个大目标具有一定的共性：因为室内环境基本没有稳定 GPS 信号，要实现室内环境发车和停车，必然要求建图算法在完全无 GPS 信息下正常运行，也必然要求在起始点无 GPS 信号下采集地图。另一方面，由室内向室外出发（或者反过来）的过程，会造成轨迹起始点无 GPS，但运行至其他时间时又有 GPS 的情况。这与目前 3.0 的建图流程是不相



**图 1:** 室内结构与 11 月准备开放的 ODD。上层：准备开放的部分，如车棚、车库、展厅、站台；下层：暂不开放的部分：多层室内、多层车库。

容的。3.0 在预处理阶段会把 GPS 起点作为地图原点写入配置文件，后续轨迹将使用起点信息进行递推，导致整个建图流程强依赖于 GPS。所以，放开 GPS 起始点约束，一方面要修改整个准入过程，一方面需要调整现有的优化手段。

室内结构的另一个难点在于：部分室内场景和室外并不在同一个水平面上。大部分车库位于地下，需要通过连接通道才能进入，甚至可能存在上下两层楼的情况。这不仅给建图算法带来了挑战，也给制图、规划等模块也带来了新需求。例如，目前智行者的制图软件 HAMO 是二维的，制图人员绘制的可通行区域、行驶路径等元素都只含有二维信息。要求制图人员绘制三维通道是比较困难的。在决策与规划层面，目前也不具备“导航至另一层楼”这样的三维规划能力。因此，在 11 月测试功能中，我们主要针对**室内同层结构**的建图任务。

**室内同层结构**是指，室内场景与室外场景位于高度相差不大的水平面上。严格地说，我们要求**俯视视角下，室内区域与室外区域不存在重叠部分**。这是目前建图、制图、决策规划共同要求的。符合目前的场景主要有以下几类（图1）：

- 纯室内场景。例如：百度大厦单层地下车库，众创空间停车库，大部分展览厅，等等。

- 室内发车/停车场景。例如：停车棚、站台、大部分建筑物一层室内。
- 室内外混合场景。例如：建筑物间连接区域、天台等。

针对室内同层结构，在运营部门的合作努力下，我们一共采集了个数据，构成室内数据集。我们将此数据集分为“纯室内”、“半室内”、“室外无 GPS”三类，并进行分别测试。测试结果参见实验章节。

从算法层面来说，室内环境对目前建图算法的挑战可归为以下几点：

- 由于缺乏 GPS，现有的建图算法对地图没有整体姿态的约束，但 HAMO 制图软件假设了地图水平。按照目前版本的建图，室内区域容易出现从俯仰和滚转不符合实际、地面不水平、上下坡过大等情况。
- 由于缺乏 GPS，难以得知多个采集包轨迹的位置信息。若采集数据不连续，将无法拼接地图。
- 同样，由于缺乏 GPS 的全部位置观测信息，Lidar 里程计和 DR 的累计误差难以消除。若长时间在室内采图，容易出现累计误差过大导致闭环不准的情况。
- 室内区域的连接通道通常形状过于简单，特征较少，容易导致激光退化。一旦激光退化，只能依

赖 DR 信息，而目前版本 DR 是 3 自由度的。若该通道同时存在一定坡度（例如地库的出入口），容易导致建图失败。

因此，我们对上述问题采取了以下若干措施：

- 放开准入部分的 GPS 检测，使得室内和强制采图数据可以通过准入；
- 将 DR 改写为六自由度以应对上下坡场景；
- 增加场景的层级分析以应对潜在的坡道和多层次场景；
- 在后端优化中加入同层水平面优化以保证场景水平；
- 优化前加入 GPS/DR/Lidar 三轨迹的 SE(2) 对准，以保证在部分区域有 GPS 时能够满足此区域的 GPS 位置要求；
- 增加 GUI 闭环界面，允许系统闭环失败时进行人工闭环；

除此之外，作为 3.0 的正常研发部分，也进行了一定的算法升级：

- 在仿真阶段使用与车端更相近的融合定位，并进行加速，缩短仿真时间；
- 增加地图扩展与局部更新逻辑接口；
- 增加建图 UI 以适配将来的现场建图，将报告修改成中文以方便现场人员阅读；
- 在服务器端增加守护进程和反爬虫机制以保障服务器端稳定运行。
- 在测试数据集中增加了 9-11 月的建图任务。

在第 2 章中，我们将主要从方法层面介绍这些改进项的具体做法。在实验章节，我们针对特定的改进项，介绍一些对比实验。

## 2.2 DR 的三维化

DR 即 Dead Reckoning，即，使用上一时刻的状态递推下个时刻的计算过程。Mapping 3.0 原先使用的 DR，人为固定了车体的 roll 角和 pitch 角为零，使得 DR 整体轨迹位于平面上。然而，为了进行层级分析，需要 DR 带有三维信息。于是，11 月份 DR 由二维递推改进为三维递推，明显提高了 DR 的精度，以下是对 DR 状态估计和递推的数学描述。

### 2.2.1 初始话

本文档中所有的计算都是基于东-北-天坐标系，IMU 输出三轴角速度和三轴加速度数据，当车辆处于静止状态时，根据 IMU 输出的加速度可以计算得到车辆当前的水平姿态角，为了获得比较准确地初始水平姿态，一般取一段时间内的加速度均值（记为  $\mathbf{f}_m^b = [f_{mx}, f_{my}, f_{mz}]$ ）来计算水平姿态的初始值，如下式所示：

$$\begin{cases} \text{roll} = \arctan(-f_{mx}, f_{mz}) \\ \text{pitch} = \arcsin(f_{my}/g) \\ \text{yaw} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $g$  为当地重力加速度，roll 为车辆横滚角，pitch 为俯仰角，yaw 为航向角，初始时置零。

由上式可获得车辆当前的水平姿态和航向角，然后采用下式完成四元数的初始化。

$$\begin{cases} q_0 = \cos\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) \\ q_1 = \cos\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) + \sin\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) \\ q_2 = \cos\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) - \sin\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) \\ q_3 = \cos\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \sin\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) - \sin\left(\frac{\text{yaw}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{pitch}}{2}\right) \cos\left(\frac{\text{roll}}{2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

假设初始化时车辆处于静止状态，采用下式完成位置和速度初始化：

$$\begin{cases} v_e = v_n = v_u = 0 \\ p_e = p_n = p_u = 0 \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2.2 四元数与速度更新

由上式可得四元数的初始值。记三轴陀螺仪输出的角速度  $\omega^b = [\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b]$ ，记 IMU 采集时间间隔为  $\Delta T$ ，那么可由下式计算一个采样时间内的角度增量：

$$\Delta\theta = \omega^b \Delta T = [\theta_x, \theta_y, \theta_z] \quad (4)$$

四元数更新由下式描述：

$$\begin{cases} \Delta\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2 + \theta_z^2} \\ \mathbf{Q}_v = \left[ \cos \frac{\Delta\theta}{2}, \frac{\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\theta} \theta_x, \frac{\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\theta} \theta_y, \frac{\sin(\Delta\theta/2)}{\Delta\theta} \theta_z \right] \\ \mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_{k-1} \otimes \mathbf{Q}_v \end{cases} \quad (5)$$

根据上一时刻的四元数  $\mathbf{Q}_{k-1}$  和上一时刻到当前时刻的角度增量，更新得到当前时刻的四元数  $\mathbf{Q}_k$ ，再根据

当前时刻的四元数获得当前时刻的姿态矩阵  $\mathbf{C}_n^b$ , 记三轴加速度计输出的加速度  $\mathbf{f}^b = [f_x^b, f_y^b, f_z^b]$ , 由下式完成速度更新:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{k-1} + (\mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^b + \mathbf{g}) \quad (6)$$

其中  $\mathbf{V}_{k-1}$  为上一时刻速度矢量,  $\mathbf{V}_k$  为当前时刻速度矢量,  $\mathbf{g}$  为当地重力加速度矢量。

### 2.2.3 位置更新

采用轮速计输出的车速  $v^b$  和当前时刻的姿态矩阵  $\mathbf{C}_n^b$ , 完成位置更新:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} + \mathbf{C}_n^b [0, v^b, 0]^T \Delta T \quad (7)$$

### 2.2.4 误差修正

选取状态量  $\mathbf{X} = [\phi_e, \phi_n, \phi_u, \delta v_e, \delta v_n, \delta v_u]$ , 其中  $[\phi_e, \phi_n, \phi_u]$  为失准角,  $[\delta v_e, \delta v_n, \delta v_u]$  为东北天向速度误差, 建立误差模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{W} \\ \mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \end{cases} \quad (8)$$

上式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ (\mathbf{C}_n^b \mathbf{f}^b) \times & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_n^b & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_n^b \end{bmatrix},$$

$\mathbf{W}$  为 IMU 噪声矩阵,  $\mathbf{H} = [\mathbf{0}_{3 \times 3}, I_{3 \times 3}]$ ,  $\mathbf{V}$  为观测噪声, 即轮速计速度测量噪声。

建立如上所示的误差模型, 以轮速计输出的当前车速  $v^b$  作为当前速度观测, 与式(6)更新得到当前车速, 做差:

$$\delta \mathbf{V} = \mathbf{V}_k - \mathbf{C}_n^b [0, v^b, 0]^T \quad (9)$$

根据(8),(9)进行卡尔曼滤波完成误差量的估计, 失准角用来修正式(5)更新得到的四元数, 速度误差用来修正式(6)更新得到的速度, 再由修正后的四元数根据式(10)得到当前准确的姿态角。

$$\begin{cases} \text{roll} = \arctan(-2(q_1 q_3 - q_0 q_2), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \\ \text{pitch} = \arcsin(2(q_0 q_1 + q_2 q_3)) \\ \text{yaw} = \arctan(2(q_1 q_2 - q_0 q_3), q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) \end{cases} \quad (10)$$

## 2.3 轨迹层级分析与水平面优化

在室内环境或者弱 GPS 区域, 由于 GPS 无法提供准确的全局约束信息, LidarOdom 和 DR 的长时间递推一定会带来较大的累积误差, 尤其是在高度和俯仰角上, 当误差大到一定程度, 我们便无法正确建出高质量的地图。当场景拓展到多层结构的室内环境是, 这个问题将会更加凸显。因此提前对轨迹进行层级分析和检测, 可以将识别的层级信息应用在后端的水平面优化策略中, 解决无 GPS 区域的高度误差问题, 同时为多层结构连接区域激光匹配退化提供一定的解决思路。

轨迹的层级关系目的在于通过每条轨迹的 DR 推算结果来对场景的“楼层”和“连接通道”进行检测, 并整合多个轨迹的检测结果, 构造完整场景的整体层级关系, 并给到后端优化作为水平面约束, 从而解决高度和俯仰角的累积误差。

### 2.3.1 轨迹连接通道检测

当车辆行驶在角度和高度变化较大的坡度上时, 相比二维平面场景, DR 和 LidarOdom 递推的结果在俯仰角和高度上均有一定的变化, 利用俯仰角和高度的变化率可以检测出水平“楼层”间的“连接通道”, 因此场景层级关系的关键是对“连接通道”的有效检测。由于三维化的 DR 递推的结果在全局特性上比 LidarOdom 的更加准确, 尤其是俯仰角上的误差相对较小, 因此根据 DR 计算的轨迹进行“连接通道”的检测。在检测连接通道时, 将会面临以下实际问题:

- 水平面上局部区域由于减速带等导致的俯仰角和横滚角变化较大会作为连接通道检测时的噪声;
- 连接通道上局部区域角度变化不明显, 但仍属于连接通道的一部分;
- 同一个场景有多个连接通道;
- 不同的连接通道角度和高度变化不同。

为了能够较为准确的识别出连接通道, 检测算法需要剔除不是连接通道但变化率较大的噪声, 需要填充连接通道变化率较小的部分, 需要一个适配各种连接通道的变化率计算公式等等, 由于轨迹点均以关键

帧序号表示，所以检测的连接通道的最终表达形式是确定起始关键帧和终点关键帧的序号。以下简单介绍单条轨迹的连接通道检测原理。

- 将轨迹在水平面上切分成 3 米长的线段，计算每条线段的高度、俯仰角和横滚角的变化；
- 通过以下公式计算每条线段的变化率：

$$\text{ratio} = |\Delta\text{roll}| + |\Delta\text{pitch}| + 5 * |\Delta\text{height}|, \quad (11)$$

- 将超过设定阈值的变化率对应的线段作为连接通道的候选线段；
- 根据空间连续和时间连续的特点，剔除不属于连接通道的候选线段，并填充空间隔断的相邻候选线段，计算出最终连接通道的曲线。

### 2.3.2 轨迹层级关系构造

每个数据包的轨迹完成连接通道的检测后，构造其层级关系，并将多条轨迹的层级关系整合，构造整个场景的层级关系。对每条轨迹进行层级构造时，我们根据检测出来的连接通道区域可以筛选出非连接通道区域，将连接通道区域定义为“Connection”，非连接通道区域为“Floor”，根据 Connection 两端的高度差，计算与其向量的两个 Floor 的 ID，进而判断其是否为同一层。每个 Floor 会记录多个属于该 Floor 的区间，每个区间由关键帧的 ID 的范围描述；每个 Connection 同样会记录属于自己的区间，同时也会记录与其相连的 Floor 的 ID。

在每条轨迹的层级关系构造完毕之后，需要对多条轨迹计算出来的层级关系进行拼接。考虑到每条轨迹的不同检测结果，在构造整个场景的层级关系时，需要考虑图 2 所示的四种情况，当出现 (a) 图所示情况时，我们假设后一条轨迹的第一层 Floor 与前一条轨迹的最后一层的 Floor 在同一层，即高度统一，同样的，对于 (d) 所示的 Connection 也需要进行统一。因此要求采集的轨迹之间在物理空间上不能间隔太远。

构造完层级关系后，后端优化可以利用层级结构增加高度约束，减少俯仰角的畸变。

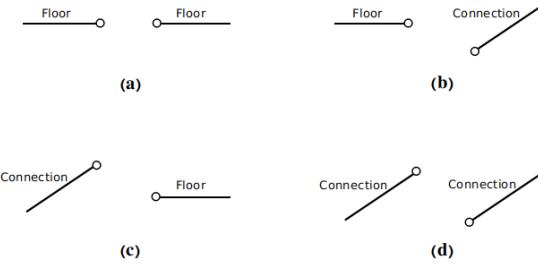


图 2：轨迹层级拼接四种情况示意图

### 2.3.3 水平面优化

在分析完层次结构后，为保持每层的地面水平，我们将统计每层的平均高度，然后约束该层内关键帧的高度值。设关键帧  $k$  的位姿为  $\mathbf{T}_k \in \text{SE}(3)$ ，其平均高度约束为  $h_k$ ，那么施加在上方的约束为：

$$e_{\text{height}} = \mathbf{t}_{k,3} - h_k, \quad (12)$$

其中  $\mathbf{t}_{k,3}$  为  $\mathbf{T}$  平移部分取第 3 个维度（即高度）。由于 g2o 对位姿使用  $\text{SE}(3)$  上的右乘更新，设更新方程为  $\mathbf{T}_k \leftarrow \mathbf{T}_k \Delta \mathbf{T}_k$ ，其中  $\Delta \mathbf{T}_k \in \text{SE}(3)$ ，于是该约束项的雅可比矩阵为：

$$\frac{\partial e_{\text{height}}}{\partial \Delta \mathbf{T}_k} = [\underbrace{\mathbf{0}}_{\Delta \mathbf{R} \text{部分}}, \underbrace{\mathbf{R}_{k,3}^T}_{\Delta \mathbf{t} \text{部分}}], \quad (13)$$

其中  $\mathbf{R}_{k,3}^T$  为  $\mathbf{T}$  的旋转矩阵第 3 行的元素。

施加该约束后，同层的位姿将变得更加水平，高度统一。并且，由于高度被水面约束，某些 GPS 高度不准确的地方将出现较大的 GPS 误差，导致 GPS 信息被认作异常值（但此时水平位置是有效的）。为了防止这种情况出现，我们同时增大了 GPS 高度值噪声，使 GPS 自带高度信息减弱。

### 2.4 GPS/DR/Lidar 的 SE2 对齐

由于 LidarOdom 和 DR 的递推轨迹都存在各自的累积误差，当场景规模大到一定程度或者半室内场景起点位置无 GPS 信号时，两者的轨迹和 GPS 真值之间存在较大的偏差，这个偏差在进行后端优化时会使

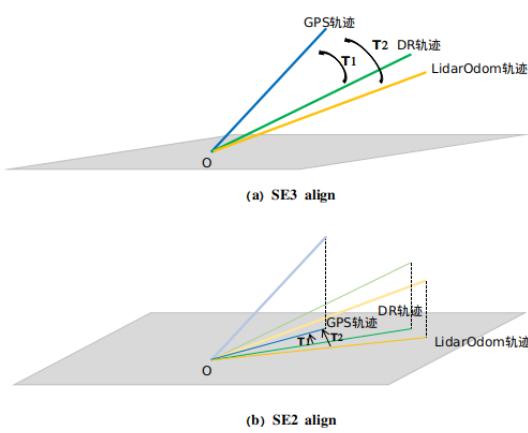


图 3: SE3 对齐 (a) 和 SE2 对齐 (b) 示意图

得一些可用的约束被判定为，导致最终地图在全局和局部上产生一定的冲突。在进行优化之前，先将 DR 和 LidarOdom 的轨迹与 GPS 轨迹进行对齐，基于对齐后的 DR 和 LidarOdom 的优化会更加合理的判断异常值和正确值，进一步提升优化的合理性，以保证在部分区域有 GPS 时能够满足此区域的 GPS 位置要求。

常用的对齐方式是 SE3 对齐，两条轨迹对齐可以认为是 3D-3D 的点集匹配位姿估计问题，可以通过 SVD 分解或者非线性优化的方式求解 ICP 问题来分别实现 DR 和 LidarOdom 轨迹与 GPS 的对齐。但是由于我们实际采集数据的路线很可能是一条直线，这种路线对应的轨迹对齐将会导致在一个自由度上匹配退化的情况，这就使得对齐后的 DR 和 LidarOdom 轨迹在横滚角上有较大的偏差，造成地图不可用。为了防止这种情况出现并结合车辆实际在地面上行驶的事实，我们假设在高度、横滚角和俯仰角 3 个自由度上，轨迹的性质一样，因此只对轨迹在航向角和平面 2 维位置进行对齐，即 SE2 对齐。如图 5 所示，(a) 是 SE3 对齐，(b) 是 SE2 对齐，将 GPS 轨迹、DR 轨迹和 LidarOdom 轨迹投影到水平面上，基于 2D 轨迹进行轨迹对齐。

SE2 对齐采用非线性优化的方式进行求解，利用 G2O 优化器进行求解。我们定义：

- 求解的 SE2 相对位姿变换作为顶点，表示为  $\mathbf{T}_{\text{align}} \in \text{SE}(2)$ ；

- GPS 轨迹作为真值，DR 轨迹或 LidarOdom 轨迹作为观测值，两者之间的误差作为边，这个边是由于顶点只是一个位姿变换，因此该边是单元边。设关键帧  $k$  的 GPS 二维坐标为  $\mathbf{P}_k = [x_k, y_k]^\top$ ，对应的观测值的二维坐标为  $\hat{\mathbf{P}}_k = [\hat{x}_k, \hat{y}_k]^\top$ ，则误差项为：

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{P}_k - \mathbf{T}_{\text{align}} \hat{\mathbf{P}}_k, \quad (14)$$

所以最小二乘目标函数为：

$$\min \sum_{n=0}^N \mathbf{e}_k^\top \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{e}_k, \quad (15)$$

进行 SE2 对齐后的 DR、LidarOdom 和 GPS 轨迹在水平面上，更加全局统一，高度和俯仰角可以结合场景的“层级关系”进一步提供相关约束，这样的后端优化便可以在合理地处理各个传感器提供的位姿约束的同时在高度上也不会有太大的偏差。

## 2.5 采图约束的修改与轨迹间拼接

当建图场景是室外时，要求采集数据的起始点 GPS 信号可用，从而可以在预处理阶段把 GPS 起点作为地图原点，同时多个数据包之间也可以依赖 GPS 信号进行较为准确的轨迹拼接。但是当建图场景拓展到室内和半室内场景时，由于采集数据的起始点无 GPS 信号，多个数据包之间的拼接便需要其它手段进行拼接，从而保证场景轨迹间的合理性，便于后端优化对多条轨迹进行正确的处理。

### 2.5.1 采图约束的修改

为了能够同时兼容纯室外、半室内和纯室内三类场景，地图采集约束在之前针对纯室外单一场景的基础上进行了相应的拓展，对 GPS 的相关要求见[准人改动章节 \(2.6\)](#)，本章节主要针对轨迹拼接功能提出相应的采图约束的修改。

为了保证在弱 GPS 区采集数据包之间能够正确计算出两者之间的相对位姿变换，我们要求数据包首尾之间不能有过大的空间间隔，同时车辆朝向不易相差太大，我们要求这个空间间隔不超过 3 米，并且角度不超过 30 度，如图 4 所示。

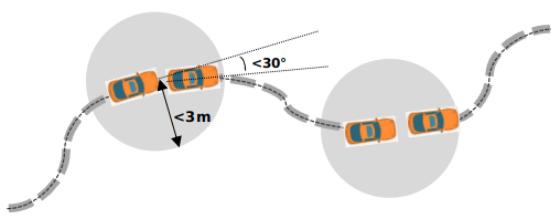


图 4: 采图轨迹间约束图

有时室外场景下往往由于实际的复杂工况不得不将多个数据包分开在不同区域进行采集，这就使得不同的数据包无法像图 4 所示在首尾间相连，此时我们要求按照之前纯室外场景的采集约束要求，即数据包的起始点处 GPS 信号必须可用，而针对室内场景，我们必须要求采集约束按照图 4 进行采集。

## 2.5.2 轨迹间拼接

轨迹间拼接模块处理的是多个采集数据包轨迹间的连接关系，通过计算能够判断出前后采集的数据对应的轨迹在物理上是否连续。因此要求在室内或半室内场景下，该模块能够通过激光匹配计算出轨迹首尾间的相对位姿，并更新关键帧所属的轨迹 id，同时更新关键帧对应的 DR 位姿。在室外场景下，会结合 GPS 数据判断轨迹是否连续，如果连续，同样对轨迹 id 和轨迹上的 DR 位姿进行更新；如果不连续，则需要利用 GPS 数据作为轨迹起点，保证数据包的轨迹在全局上的是统一。

**室内和半室内场景轨迹间拼接** 由于采图约束要求采集的多个数据包首尾会在一定范围内连接，因此针对室内和半室内场景，轨迹拼接应该能够拼接成功并提供轨迹间的相对位姿。

拼接计算主要依赖基于 NDT 的“scan to local map”匹配方法。我们称前一条轨迹为目标轨迹，当前轨迹为输入轨迹，拼接计算发生在目标轨迹的 LidarOdom 之后，目标轨迹尾部的 30 帧关键帧根据已经计算的 matching 位姿基于最后一帧关键帧传感器坐标系计算局部点云地图，根据提供的预测值，输入轨迹的第

一帧关键帧和局部地图进行匹配。当 NDT 匹配后的相似性分数高于我们设定的阈值时，则认为匹配成功，轨迹是连续的。影响匹配能否成功的取决于预测值的准确性，我们先假定轨迹是完全无缝连接的，即输入轨迹的第一帧关键帧和目标轨迹的最后一帧在物理空间上是同一位置，所以预测值是单位矩阵，进行初次匹配，如果匹配成功，则认为轨迹是连续的，如果匹配不成功，则进入基于广域搜索的 NDT 匹配。由于采图约束规定输入轨迹的其实位置和目标轨迹的终点处在 3m 范围内，角度在 30 度内，所以在目标轨迹的最后一帧关键帧位置的周围设定  $7 \times 7$ 、分辨率为 1m 的  $3m \times 3m$  的栅格搜索窗口，在每个栅格处进行  $(-30^\circ, 30^\circ)$  分辨率为  $10^\circ$  的角度搜索，共  $7 \times 7 \times 7 = 343$  次匹配计算，取相似性最高的匹配结果作为轨迹间的相对位姿变换。

计算出轨迹间的相对位姿变换后将输入轨迹中所有关键帧的轨迹 id 更新为目标轨迹的 id，同时由于每条轨迹的 DR 位姿的起始位姿是  $4 \times 4$  单位矩阵，所以会根据轨迹间的相对位姿变换去更新输入轨迹所有关键帧的 DR 位姿。

**室外场景轨迹间拼接** 室外场景或者半室内场景的室外区域经常会遇到在不同区域进行数据采集，这就导致数据包的起点无法满足在空间上和前一个数据包的终点处是连接的，此时由采图约束会保证数据包起点的 GPS 可用。因此轨迹间拼接模块需要在能够计算首尾相接的轨迹间相对位姿的同时，也能够处理室外轨迹首尾不相接但起点 GPS 可用的情况。

一般情况下，室外输入轨迹和目标轨迹首尾不相接但起点 GPS 可用时，我们认为激光匹配结果较差，并直接将输入轨迹的起始点位姿设定为 GPS 位姿即可。但也存在“室外场景输入轨迹和目标轨迹首尾实际不连接，但激光匹配相似性较高的误匹配问题，比如大面积广场等场景，在这种情况下，我们需要额外的通过 GPS 信息来剔除”误连接“的情况。在激光匹配相似性较高且首尾 GPS 可用的情况下，如果首尾间的 GPS 水平位置间距较大 ( $> 3m$ )，我们则认为输入轨迹和目标轨迹不连接，是两条独立的轨迹，进而

不对输入轨迹的 id 和 DR 位姿进行更新。

为了能够同时兼容室内、半室内和室外场景，轨迹间拼接的整体算法流程如下表所示：

---

**Algorithm 1** 轨迹间拼接算法流程

---

- 1: 激光匹配
  - 2: 计算目标轨迹尾部局部地图；
  - 3: 使用单位矩阵为默认预测值进行输入轨迹首帧点云和局部地图的 NDT 匹配，如果相似性分数大于 2.4，则匹配成功，执行步骤 5；反之，执行步骤 4；
  - 4: 在目标轨迹尾部搜索窗口进行  $3m \times 3m$  和  $(-30^\circ, 30^\circ)$  的搜索匹配计算，取相似性分数最高的结果；
  - 5: 判断 GPS 是否可用，如果不可用，执行步骤 7；反之，执行步骤 6；
  - 6: 如果输入轨迹和目标轨迹的首尾处水平位置间隔大于 3m，则执行步骤 10；反之，执行步骤 7；
  - 7: 更新输入轨迹
  - 8: 更新轨迹 id；
  - 9: 更新 DR 位姿；
  - 10: 返回
- 

## 2.6 准入改动

原 mapping3.0 建图约束中，GPS 有效性是及其重要一项，为此建图 odd 中对于运营环境 GPS 有效性有较强的约束，要求运营环境非室内，并且采图起始点的 GPS 位置及航向均需要超过 30 秒的有效时间。起始点 GPS 约束既对运营地图采集增加了较大工作量，增加了适配时间，又限制了运营场地的拓展。为拓展建图 ODD 场景，放宽 GPS 约束，允许室内发车，同时对于建图准入约束，建图算法等方面进行优化及改动。建图算法方面的优化在别的章节中叙述，本章主要针对建图准入约束。

建图准入部分改动主要针对 GPS 约束部分，放开原准入部分 GPS 有效性强制约束，并针对弱 GPS 和无 GPS 情形进行了处理。下述是几项主要改动：

1. 修改准入部分 GPS 检测项，由检测要求 GPS 初始位置有效航向有效修改为检测 GPS 数据完整性，只要 GPS 数据完整，无论 GPS 定位状态如何均予以通过；
2. 根据 GPS 定位状态对当前场景进行分类。对当前场景所有建图数据包所有 GPS 数据进行位置有效性检测及航向有效性检测，采用全程最优 GPS 状态进行分类。目前场景共分为 5 类：GPS 最优为位置及航向同时有效；GPS 最优为位置及航向在不同时段有效；GPS 最优为位置有效但航向始终无效；GPS 最优为浮点解或单点解；GPS 全程无解。将检测出的五类状态实时写入地图配置文件，该状态可供后端使用。实际上，当 GPS 全程无解时，认为该场景为室内场景；当 GPS 处于其他分类时，认为该场景为半室内或全室外。
3. 根据 GPS 最优状态确定地图偏移量。当场景为半室内或全室外时，GPS 存在定位解，直接以最优状态位置经纬度解算当前 UTM 位置作为偏移量；当场景为全室内时，目前偏移量为固定位置，后续可由大数据导入。
4. 弱 GPS 数据噪声的设定。当最优 GPS 状态为浮点解或单点解时，为保证地图与 GPS 的基本对应，除了前面做的轨迹对齐，修改弱 GPS 定位输入的协方差。根据 GPS 误差模型，统一设定浮点解或单点解时 GPS 位置误差为 50.0 米，以此施加 GPS 对最终优化的影响。

## 2.7 仿真与准入的检测项改动

较原 mapping3.0 而言，此次更新主要包含仿真效率、检测项以及检测指标。

1. 仿真效率提升：从初始化方式和激光匹配频率两方面逆行优化；初始化方式的选择主要依赖数据包类型以及上一个数据包定位状态而定，如建图数据包优先采用功能点初始化，自动分包优先采用上一个包的最后一个点进行初始化等。仿真在不同阶段激光匹配频率有所差异，在进行激光初始化定位时，激光匹配频率为 10Hz，而在初始化完成后，其匹配频率为 2Hz，理论上仿真时间减

少至原仿真时间的四分之一。

2. 检测项：新增地图高度、横滚以及俯仰、GMM 地图、硬件以及激光退化；其中地图高度、横滚以及俯仰等均为地图问题，激光退化为定位警告问题，各检测项分布如下：

**表 1:** 检测项说明

检测项	环节	8月版本	11月版本
硬件问题	仿真	无	有
地图问题	仿真	无	有
激光退化	仿真	无	有
定位问题	仿真	有	有
采集不规范	仿真/准出	有	有
仿真数据完整性	准出	有	有
仿真数据质量	准出	有	有
GMM 地图	准出	无	有

3. 检测指标：根据新增的检测项设置相应的检测指标，若融合输出的 IMU 安装角度超过 2 度，便视为地图高度有问题；同一时刻，激光匹的配 yaw、roll 或者 pitch 与融合定位的 yaw、roll 或者 pitch 相差 6 度，或者任意时刻与初试时刻，融合定位的 yaw、roll 或者 pitch 相差 30 度，则视为地图构建问题；若发生激光退化现象，则视为定位警告（此地图实际运营时，会出现定位丢失风险）；通过特定的检测手段对 odom 和 imu 原始数据进行检测，数据不满足正常条件，则视为硬件存在问题。

除了上述优化或者改动外，在原 mapping3.0 中，修改了定位策略，新增了融合定位策略，仿真过程便便出现两次初始化和两类定位。

两次初始化：1、激光初始化：较上一版新增数据包结束点初始化方式，最大初始化时间增加至 30s，初始化时激光频率为 10Hz，2、融合初始化（要求车辆是静止状态，由于自动分包时间和空间存在连续性，因此将时间和空间进行相应的变换，实现两数据连续处理），最大初始化时间 10s，此时激光匹配的频率为 2Hz，注意的是：在进入融合初始化时，必须是完成激光初始化。

两类定位：1、融合定位，前提是前面两次初始

化均未出现问题，此时激光匹配频率为 2Hz，整个融合定位过程中激光匹配的状态没那么重要，但是不能出现误匹配以及 10s 以上定位丢失情况。2、纯激光定位，进入该定位模式的前提是融合定位丢失或者融合初始化失败，并记录上述相关问题。

准出环节较上一个版本改动很小，对输出显示做了简单调整，

**表 2:** 检测输出状态详细变

检测项	是否显示
硬件问题	是
地图问题	是
定位警告	是
定位问题	是
采集不规范	是
未知原因	是
轨迹平滑	是
轨迹偏差	否

## 2.8 人工闭环/修图的 GUI 调试界面

在缺少 GPS 信息时，DR 和 Lidar Odom 不可避免地会出现累计误差。对于大型室内场景，很容易出现闭环无法正确计算，或者出现共视重影的情况。但是，Lidar 数据特征简单，本身并不便于自动计算回环，所以我们在 11 月提出了人工闭环和修图的概念，并实现了一套配套的程序（debug-ui）。该程序主要用于处理回环失败的情况，也可以用于调整关键帧位姿，减少地图重影的效果。

debug-ui 是基于 Qt5 的可视化程序，运行界面如图 5 所示。该程序主要有三列面板组成：

左侧面板可以指定要读取的数据库文件和对应的关键帧轨迹文件。读取后，点云信息会在中央 3D 窗口显示。3D 窗口是一个 QVtkWidget，集成了 PCL\_Visualizer 的功能，可以通过鼠标拖动查看点云内容，同时会显示建图轨迹、当前帧点云等额外信息。在读取地图后，当前关键帧会以白色高亮显示出来，用户可以通过左侧面板逐个查看关键帧位置姿态，而且可以直接对关键帧进行微调。

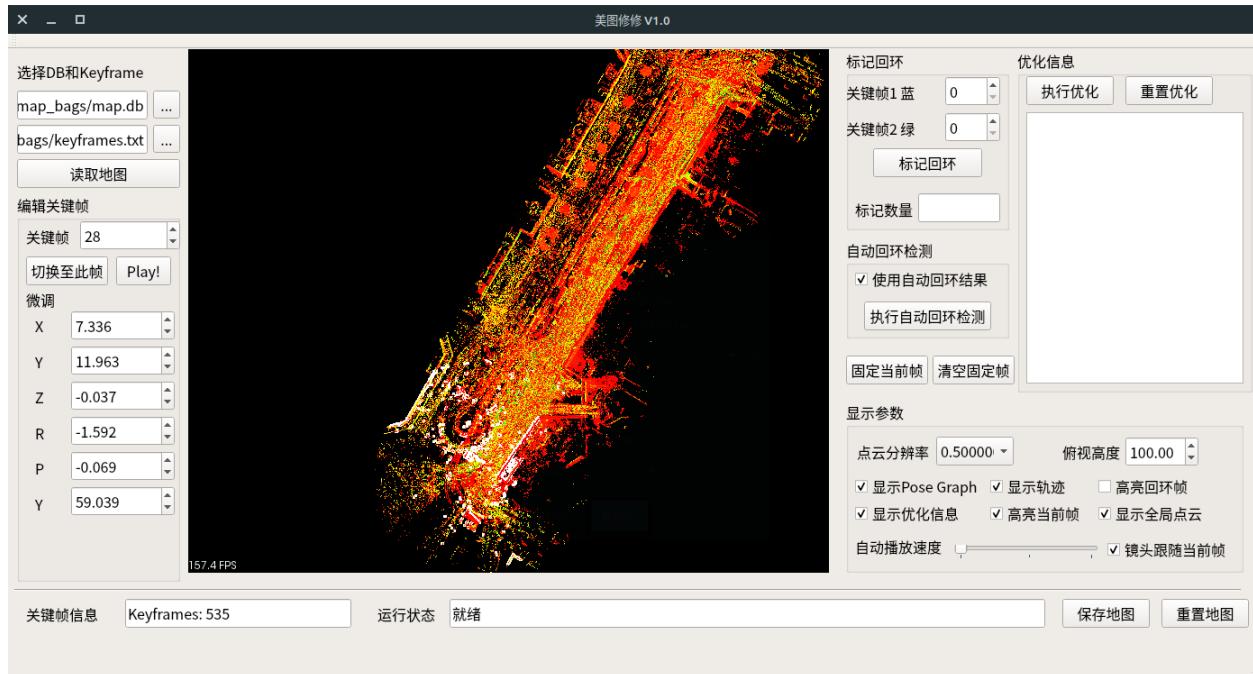


图 5: Debug-ui 图形界面

右侧面板是该程序几个主要的功能：主动闭环和交互式优化。在主动闭环功能中，用户可以打开回环帧高亮，显示两个回环的候选帧。然后，通过主动微调其中一个，提示系统对该回环进行优化。在确认回环后，点击执行优化即可启动后端优化。优化对轨迹进行更新后，会重新渲染整个点云地图。

右下面板可以对显示参数进行调整。用户可以调整显示点云的分辨率（默认支持 0.05, 0.2, 0.5 三级分辨率）。在自动播放轨迹时，可调整镜头高度和镜头是否跟随当前关键帧。同时，还可以开关一些高亮显示部分。本报告的3.2.3节将演示如何使用该软件进行回环修复的过程。

## 2.9 地图的新增与更新

### 2.9.1 地图新增

地图新增模块主要目的是在对已经建立地图的场景进行区域拓展时，在不重新建图和制图的情况下完成新增区域的建图任务，使得新增地图和已建地图能够完美的拼接。我们称已建地图为目标地图，新增

地图模块主要流程如下：

1. 创建任务；
2. 读取目标地图的原点信息作为自身原点；
3. 按照建图流程正常建图；
4. 获取并导入目标地图的结果文件；
5. 基于目标地图添加新增地图的位姿信息，拓展构优化图；
6. 对目标地图和新增地图进行地图间的闭环检测，并将闭环结果添加到优化图中；
7. 执行非线性优化，输出最终地图；
8. 基于最终地图进行仿真和准出检查。

考虑到正常建图的最后一个 **refine** 环节会将一帧点云进行一定的删减，以至于在新增地图和目标地图进行闭环检测时由于点云稀疏导致检测不出正确的闭环，所以实际情况下，地图间的闭环检测是基于 **refine** 之前存储的地图进行的。

### 2.9.2 地图更新

地图更新模块主要是为了解决局部环境变化后导致地图失效，激光定位误差增大的问题。当运营场

地局部环境发生变化后，目前激光定位算法可能会发生如下问题：

1. 正常行驶过程中，地图与实际环境偏差大导致实际匹配分值降低，无法满足设定阈值，激光定位认为不可用，长时间激光失效可能会导致停车。
2. 初始化时，地图与实际环境偏差大导致实际匹配分值降低，激光初始化无法达到设定阈值，可能会导致激光初始化失败，弱 GPS 环境下会导致定位初始化失败；
3. 初始化或正常行驶时，环境变化可能会导致实际点云与地图误配准，误匹配将导致定位实际输出位置有误。

地图更新主要针对环境变化场地，修复地图局部点云分布，处理上述可能导致问题。通过地图更新方式修复地图可以节省场地重新采图适配的时间及成本，保障场地运营快速恢复。实际运营场地中，导致激光失效的环境变化一般有两类：实际环境新增建筑物或草木增长迅速；实际环境建筑或植被大量减少或位置变化。为处理这两类环境变化，采用基于栅格检测的点云地图更新方案，将原始点云地图文件进行冗余点的删减后再叠加至重采集局部地图文件中。

基于栅格检测的点云地图更新方法，主要包含以下几部分：地图数据的采集与关联，局部地图与原始地图对齐，重叠区域栅格检测，原始地图的更新与校验。

第一步，地图数据的采集与关联。在某场地环境变化导致定位效果减弱后，局部地图更新需提前获取两类数据：环境变化区域局部传感器区域，对应区域原始地图成果数据。局部地图更新采集方案与正常采图方案有所区别，局部数据采集对于起始点的状态有特殊需求，既要保证完整覆盖变更区域又要保证采集数据中包含完整定位数据。局部数据与原始数据的对应可通过相关人员在 APP 端进行采图类型分类与场地关联选择，此功能由大数据推进，目前可由建图人员通过参数进行配置。

第二步，局部地图与原始地图对齐。局部地图与原始地图对应分为两阶段：关键帧提取与位姿估计，待更新关键帧与原始地图对齐。关键帧提取与位姿估

计方式与正常建图流程类似，不重复描述。待更新关键帧与原始地图对齐采用关键帧与原始地图配准方式。基于第一步可获取原始地图参数，首先将待更新关键帧与原始地图变换至统一坐标系下（原始地图坐标系）；变换后各关键帧从理论上应与原始地图对应位置点云对应，比较各关键帧与有效定位数据姿态差异，再进行一轮姿态差变换，更新各关键帧估计位姿，保证局部地图初始关键帧的对齐。以更新后的各关键帧估计位姿为基础，以上一轮关键帧与实际匹配偏差实现位姿补偿，通过补偿位姿作为预测进行点云配准，使用 NDT 进行关键帧和原始地图精确对齐，记录并更新局部地图激光关键帧的实际配准姿态。

第三步，重叠区域栅格检测。局部地图与原始地图对应完成后，局部地图各关键帧点云与姿态已知，各关键帧点云应该与相同位姿的原始地图采集点云完全对应。随着环境变化，当前点云与原始点云无法绝对对应，我们检测不对应区域的方式称为重复区域栅格检测。重复区域栅格检测的流程如下：

1. 通过待更新地图的地图矩形大小提取原始地图的待更新区域。
2. 将原始待更新地图划分为 1 米的小栅格，统计各栅格内原始点的数量  $N_1$ ；
3. 局部地图按照各关键帧位姿同样投影至栅格网络，同样计算各栅格内更新点的数量；
4. 比较对应栅格内点数量并判断非局部地图区域栅格。当点的数量差别较大且位于局部地图范围内，说明该栅格环境变化，删除原始点云对应栅格内所有点，保留局部对应栅格所有点，记录待更新栅格的位置。

第四步，原始地图的更新与校验。已知待更新栅格的位置后，局部地图各关键帧计算各点的位置，保留各帧对应位置的所有点，其他位置的点均删除。获得处理后的原始地图与处理后的局部地图关键帧后，将二者进行合并作为新地图文件输出。为保证输出地图的有效性，需使用不同数据对输出地图进行定位测试，分析定位的稳定性及定位轨迹平滑性。

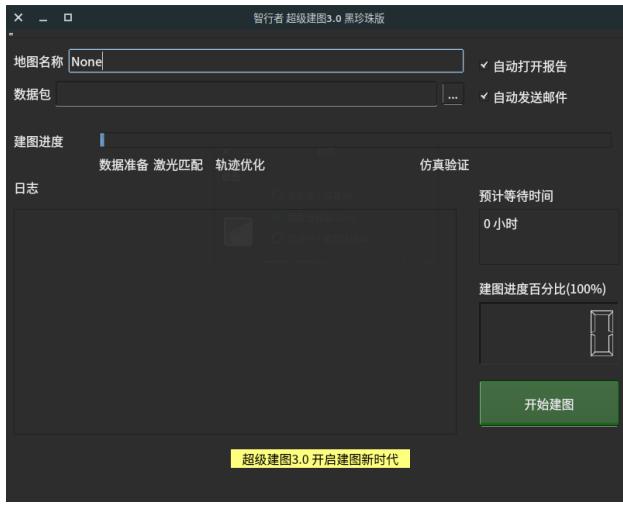


图 6: 3.0 建图图形界面

## 2.10 现场建图支持

为了在 12 月份适配现场建图人员，现在为 3.0 增加了一个图形化调用界面。该界面与软件是松耦合的，可以通过 mapping-ui 启动。界面参见图 6。

mapping-ui 是一个基于 Qt5 的应用程序。将来现场建图人员可以通过该程序输入建图数据包和地图名称，然后点击“开始建图”按钮进行建图。该程序后台和 3.0 保持一致，同样会建立一个建图服务端，然后和云端一样执行建图任务。mapping-ui 会随着 3.0 软件包一同发布，用户可自行选用图形界面或者命令行界面。图形界面主要是为了方便不熟悉 Linux 命令行的操作人员而设计的。

为了方便现场人员查看建图结构，3.0 将报告的默认语言改成了中文，要求服务器端安装对应的中文字体。中文报告首页见 7，其中简报部分会描述整体建图情况。现场建图人员只需通过简报部分查阅建图信息即可。

## 2.11 服务器端改动

服务器软件层面进行了以下改动：

- 添加了中断恢复功能。3.0 现在每隔 2 秒钟会把自身所有流水线信息写入一个 happy 的文件。当重启时，会尝试读取这个文件，并恢复成中断前的状态。

## beijing qinghuazhansi 建图报告

建图软件版本 3.1.5, 联系方式: [mapping@idriverplus.com](mailto:mapping@idriverplus.com)

November 21, 2019

### 1 简报

Table 1: 综合信息

地图名称 (ID)	beijing qinghuazhansi			
用时	1 分 21.7 秒	有效包数	2	数据量
场景类型	Outdoor	ODD	ODD 内	难度
长度	83.9m	推算面积	839 平米	是否成功
准出	失败	失败理由 (若有)		关键帧数
地图数据	<a href="http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/map.db">http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/map.db</a>			
视频链接	<a href="http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/simulation.flv">http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/simulation.flv</a>			
GMM 地图链接	<a href="http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/gmm.zip">http://127.0.0.1:8000/beijing_qinghuazhansi/gmm.zip</a>			

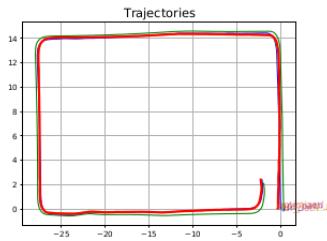


Figure 1: 轨迹

### 2 详细报告

data fetching: file already exist, skip downloading.

1

## 图 7: 中文报告示例

- 添加了守护进程。若由于内存问题或其他原因导致建图软件崩溃时，守护进程将自动重启建图服务器。守护进程每 2 分钟向操作系统查询建图软件状态，若发现不在运行则会重启程序。
- 增加了反爬虫机制。由于建图服务器含有 http 服务以供下载结果和报告数据，需要在公网开放 IP。自 9 月份以来，收到几个固定 ip 的爬虫访问。例如：93.174.93.136 每 4 个小时发送一个 HTTP 请求，162.216.19.219 会发送空指令，85.14.245.149 会发送一个 ctrl-c，120.224.7.72 会发送一个 fuck，等等。现在 3.0 接收到非法指令时，会把来源 IP 放入黑名单，且不会响应黑名单中的请求。

## 3 实验

在实验部分，我们描述本月对 3.0 的测试工作。测试由两部分组成：整体实验和专题实验。

在整体实验中，我们历史建图数据进行整理和归类，在8月数据集的基础上，增加了9-11月的建图数据以及超ODD数据。ODD内数据按照地图大小进行分类，分为minimal, standard, large三大类；ODD外的数据，按照纯室内、纯室外（取消起始点GPS，即强制采图）、半室内三类来分。各类数据数量参见表3。整体实验结果参见3.1节，专题实验结果参见3.2节<sup>1</sup>。

表3：数据集说明

数据集名称	8月个数	10月个数
Minimal	41	110
Standard	25	34
Large	16	25
Outdoor enforce	0	6
Half Indoor	0	6
All indoor	0	5
总计	82	186

## 3.1 整体实验

### 3.1.1 整体实验指标

在整体实验中，我们对完整数据集进行测试，给出综合测试结果，并计算一些统计指标。在此之前，我们说明统计过程中的一些处理方法。

首先，由于历史数据存在一定的协议上冲突，使得旧数据不一定能够适配新的建图算法，尤其是检出部分。在测试数据中，主要存在以下几类情况：

1. 部分旧数据缺少功能点的，目前检出算法不允许缺少功能点的情况；
2. 部分数据中Z包划分不合理，起始处未静止、起始处在地图外的；

在统计指标中，如果出现上述情况，那么我们将此类视作建图通过<sup>2</sup>。所以，统计指标主要评价建图算法的改动，而不考虑历史数据的兼容。同8月报告，仿真可能给出PASS、CHECK、FAIL三种结论。

<sup>1</sup>由于时间原因，Large数据集未完整测试。

<sup>2</sup>由于时间原因，部分大型地图问题尚未测试，该结果仅代表11月29日版本的测试结论。

1. 对于仿真给PASS的，地图将直接通过。
2. 对于仿真给FAIL的，地图将直接失败。
3. 对于仿真给CHECK的，由建图员确认地图是否可以通过。如果建图员认为无建图问题的，地图仍记为SUCCESS，此时我们不计人工介入。如果建图员存在建图问题，但是可以通过调整建图参数，重建后可以通过的，也记为建图成功，但计一次人工介入。如果调试之后仍认为地图不可通过，则记为建图失败，将给出失败原因分析和改进建议<sup>3</sup>。

根据这个逻辑，我们定义结果指标为：

$$\begin{aligned} S_{\text{PASS}} &= \frac{\text{仿真 PASS, 建图成功}}{\text{有效地图数}} \\ S_{\text{CHECK}} &= \frac{\text{仿真 CHECK, 建图成功}}{\text{有效地图数}} \\ S_{\text{AUTO}} &= \frac{\text{没有人工介入, 建图成功}}{\text{有效地图数}} \end{aligned} \quad (16)$$

并称为通过率，CHECK率，自动建图成功率，其中有效地图数指排除数据包不完整、格式不正确地图之后的数量。对于本次测试，这三个指标为：

$$\begin{aligned} S_{\text{PASS}} &= 75.6\% \\ S_{\text{CHECK}} &= 20.5\% \\ S_{\text{AUTO}} &= 95.7\% \end{aligned} \quad (17)$$

前两者之和称为建图成功率，指仿真给PASS或CHECK时建图的成功比例：

$$S_{\text{SUCCESS}} = S_{\text{PASS}} + S_{\text{CHECK}} = 96.1\% \quad (18)$$

指标与8月测试大体持平，但11月测试引入了更多的数据集，测试指标更有说服力。

同样，我们计算建图耗时与地图面积、数据包大小的对比图，见图8和9。在11月开发中，仿真部分得到了较大的效率提升，因此我们只统计仿真用时和总体用时。从这两个曲线中可以估算目前的建图效率：

$$v_{\text{area}} \sim 4.4 \text{ 分钟/千平米} \quad (19)$$

<sup>3</sup>注意目前“建图成功”和“地图可发布”两个概念存在细微差别。“地图可发布”要求在“建图成功”基础上，需要通过所有贴边包的仿真测试。而仿真数据可能由于各种物理原因（数据卡顿、车辆静止）导致中途仿真丢失，但此类不能算入建图问题。

或：

$$v_{\text{data}} = 13.2 \text{ 分钟/GB} \quad (20)$$

相比 8 月份，建图效率主要在大型地图中提升较明显，而小型地图本身用时很短，提升比例较小。

### 3.1.2 整体实验总结

下面我们简单对整体实验结果进行评述。首先，在超 ODD 的几个数据集中，目前我们都能够正常建图。不过，由于超 ODD 数据采集有时不太完整（无功能点或无 Z 包），所以目前仿真给出了较多的 CHECK，但不影响建图。可以认为，对于车库规模的全室内、半室内场景，我们现在具备建图能力。而对更大的场景，则有待进一步验证。

对于几个建图失败的例子，我们简单总结其原因：

1. 长沙梅溪湖是 8 月测试时已知的一个异形建筑案例。该例中，由于建筑形状特殊，激光给出了错误但是高置信度的匹配结果，导致建图出错。这个例子可以通过手工降低激光权重来解决。
2. 有个别地图是分层算法分层出错导致的。这类错误通常出现于大型地图中，本质原因是 DR 轨迹在大地图中存在较大累计误差，使得分层算法将本来同层的地图区分成了两个不同层，最后导致地图出现不应存在的分层情况。
3. Bag 包间轨迹拼接算法在部分退化场景可能出错，例如深圳市民中心的一个 Bag 起点不正常。
4. 由于仿真的改动，目前旧数据上出现了较多仿真的问题。

对于建图失败的案例，我们会继续调整现有算法，使其适应室内室外所有场景。但是由于时间关系，本轮测试报告中仍保留这几个失败例子。

## 3.2 专题实验

### 3.2.1 三维 DR

三维 DR 在增加了速度观测后，全局横滚角和俯仰角精度有了较大提升，可以实时的修正横滚角和俯仰角误差，有效的抑制陀螺零偏带来的姿态测量偏差，

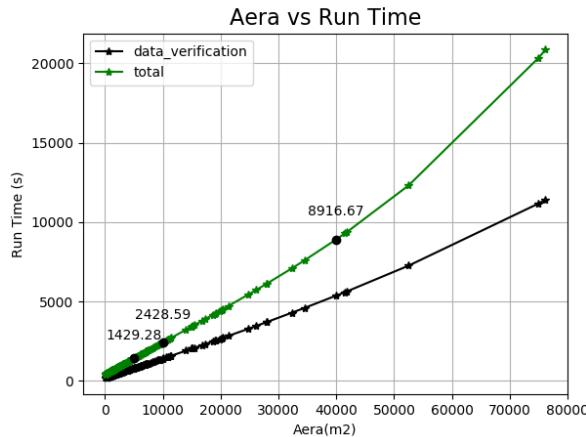


图 8：地图面积与运算时间对比

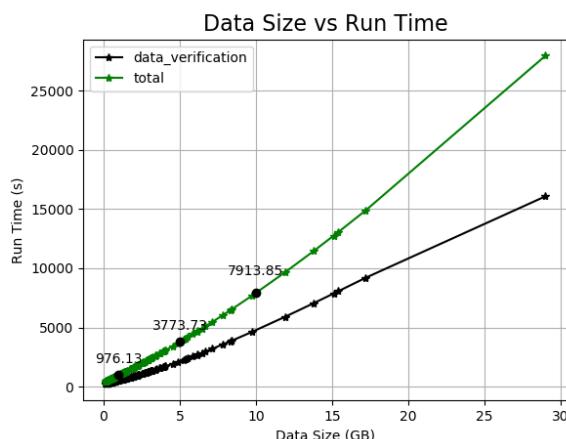


图 9：数据包大小与运算时间对比

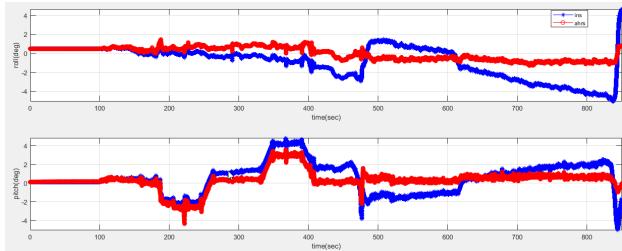


图 10: 3 维 DR 的横滚角和俯仰角对比示例图

提高水平姿态测量精度, 增加滤波前后的横滚角和俯仰角对比如图 10 所示。

在图 10 中, ins 表示之前的 DR 模块中计算得到的横滚角和俯仰角, ahrs 表示增加误差修正之后的 DR 模块计算得到的横滚角和俯仰角, 不难看出增加滤波之后的 DR 模块可以有效的抑制横滚角和俯仰角的发散, 保证水平姿态的测量精度。

### 3.2.2 层级分析

增加了对场景层级关系检测和构造的能力后, 针对无 GPS 的单层或多层室内结构, 3.0 可以解决俯仰角偏差较大的问题。单层地下停车场示例如图 11 所示, 我们给出增加层级关系前后的地图对比图 12。

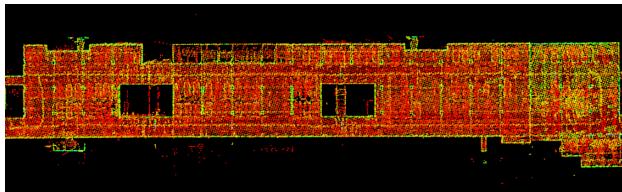


图 11: 中关村地库示例俯视图

图 12 (a) 由于未加入层级约束, 点云地图侧视图可以看出地图明显“上翘”, 俯仰角累积误差较大, 通过下方的轨迹曲线图亦能看出, 红色曲线代表的是最终优化后的轨迹, 在高度和俯仰角上发生明显畸变; 在加入层级约束后, 单层结构的室内场景高度统一, 地图不再发生畸变, 如 (b) 所示。

对于多层结构的室内的场景, 同样可以充分利用层级结构关系解决每一层的高度累积误差, 同时不同层级之间的地图也可根据不同层级对应的不同高度而不受彼此的影响, 两层之间的连接通道这种

“激光匹配退化”的场景也可以通过层级关系中的 Connection 属性转而利用 DR 约束代替 LidarOdom 约束, 从而整体上保证多层结构的合理性和准确性。多层结构作为后期的研发重点, 本报告不再赘述。

### 3.2.3 修图示例

在这个实验中, 我们演示一个成功修图的案例。该案例来源于众创空间地库的一次数据采集。在这个例子中, 采集员从地库入口处, 先由南向北走至尽头, 再由北向南行走, 但未回到原点。随后, 采集员又采集了南侧的通道, 随后回到入口处, 最后又采集了一段从入口向北的通道数据。此时由于递推轨迹较长, 累计误差较大, 又缺少 GPS 信号, 导致轨迹无法闭合, 地图出现两个明显错位的情况, 可以从图 13 (a) 中看出。该图蓝色和绿色示意的结构应该为同一个, 但由于轨迹偏差, 出现了重影。

注意这种情况在目前 3.0 建图中是无法修复的。3.0 的回环检测在第一轮优化后进行, 要求第一轮优化后轨迹应该有大致不错的结果。在室外地图中, 由于 GPS 信号的存在, 我们通常能够给出回环处的大致估计, 但这点在室内区域是不可行的。如果没有人工调整, 此类地图就无法发布。

现在我们演示如何对该图进行修复。首先, 建图员可以在发现地图重影时, 可以通过播放 GUI 界面播放关键帧轨迹, 判断重影区域的关键帧编号。通常, 一处地图重影代表至少两个轨迹片段在此处采集到了点云。在本例中, 我们以关键帧 11 和 1148 为例, 点击高亮回环帧后, 这两帧的点云就以绿色和蓝色高亮显示出来, 可以看到它们显然有重复的结构(墙角、墙边等), 但轨迹出现了偏差。

现在, 为了修复此处重影, 我们对其中一个进行调整, 使它和另一个对齐。当然, 调整蓝色帧还是绿色帧是任意的, 这里以调整绿色帧为例。我们把当前帧切换至绿色帧所在编号, 再通过左侧面板调整其位置和姿态。当前帧的点云会以白色显示, 所以我们只要调整白色帧, 使之与蓝色帧对准即可, 如图 13 (c) 所示。

此时, 人工对准的结果相当于给出了这两个帧的

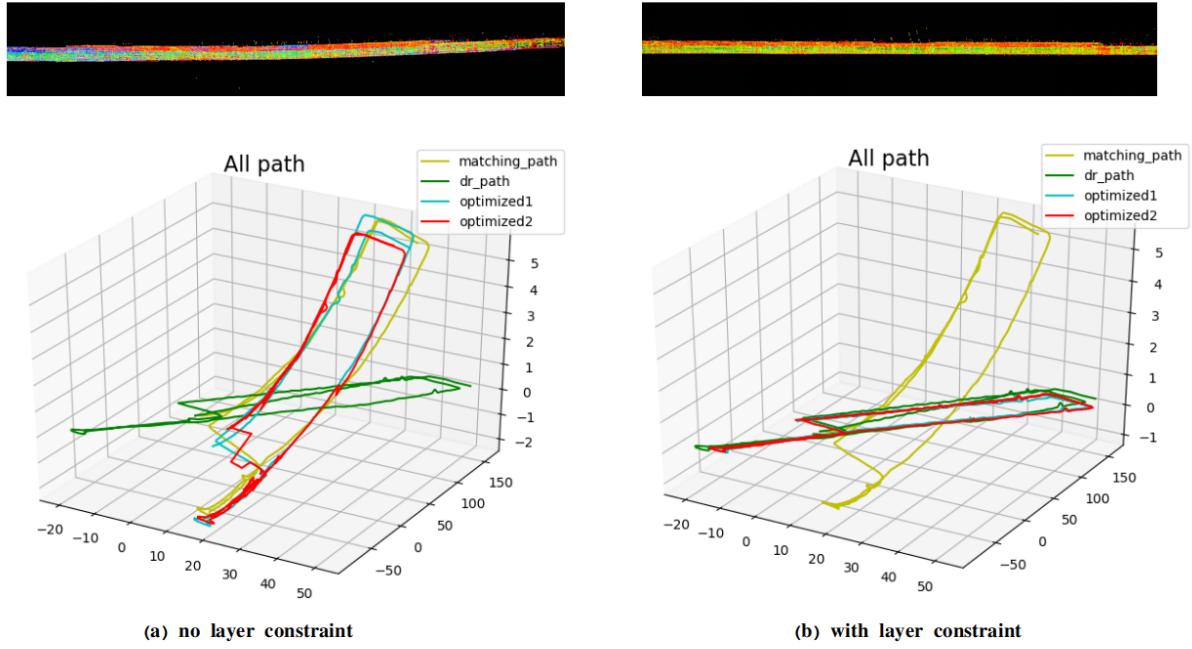
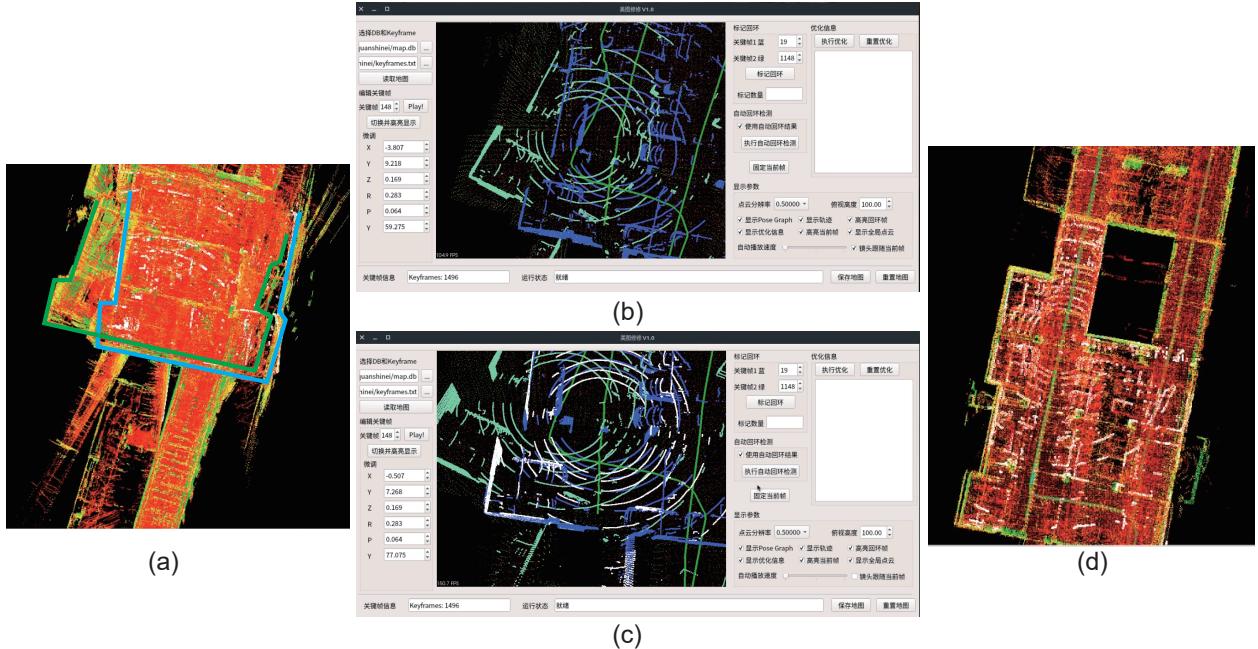
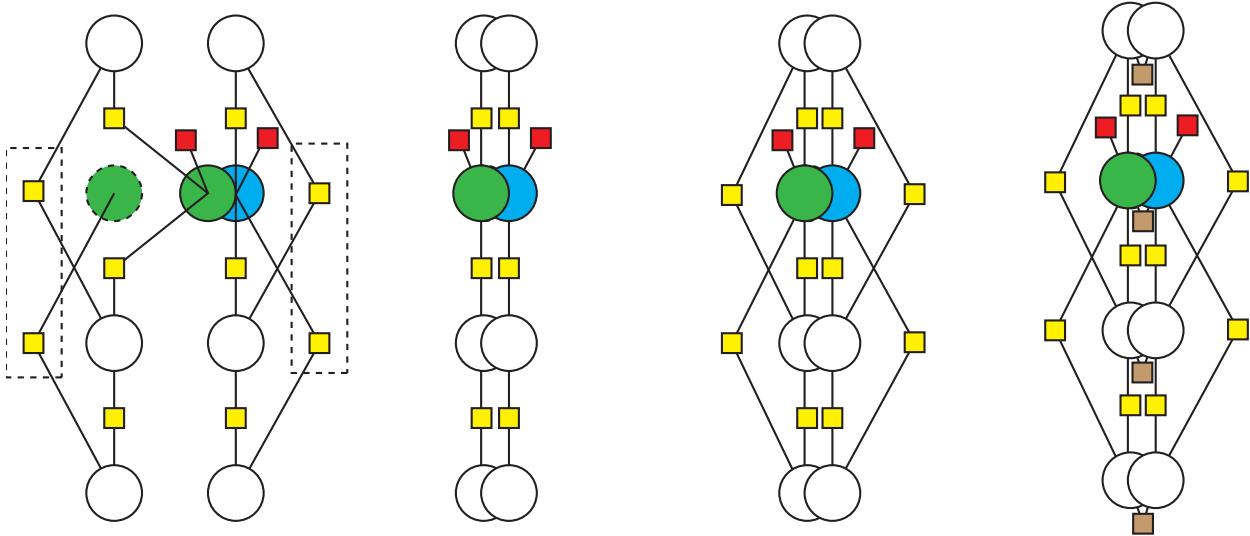


图 12: 层级约束有无对比示例



**图 13:** 修图示例: (a) 由于未成功闭环, 地图显示出两个明显的重复区域; (b) 我们通过对建图轨迹进行分析, 选取两个可能的回环帧 (绿色和蓝色标记的点云); (c) 调整其中一个 (本例为绿色) 至正确位置, 调整后白色轨迹和蓝色轨迹对齐; (d) 利用交互式优化, 得到正确的地图



**图 14:** 主动闭环对应的后端逻辑示意图。圆形：优化变量，正方形：因子（黄色：相对运动因子，红色：全局位姿因子，棕色：闭环因子）。从左至右：第 1 步，给主动闭环的两帧加上全局位姿约束，然后取消非相邻帧的连接因子；第 2 步，优化后，由于全局 Pose 的因子，两个回环帧附近的整段轨迹被拉至一起；第 3 步，加回之前取消的非相邻帧的连接因子，再次优化，以保证局部结构的正确性；第 4 步，使用自动回环检测加上其他帧的回环约束，再次优化

期望位姿，接下来需要把该信息放入后端优化中。UI 界面的右侧面板是交互式优化模块。为了纠正闭环，需要完成以下操作，其对应的 Pose Graph 因子图变化示意图见 14：

1. 点击“固定关键帧”，这会给人工选择的两个回环帧加上全局位姿约束。在优化中，实际上会加入这两个顶点的 6 自由度约束，且信息矩阵取较大值（目前使用对角线为  $10^6$  的信息矩阵）。
2. 点击“执行优化”，以运行一次后端优化。此时后端优化的逻辑如图 14 左侧所示。首先，约束两个回环帧的全局位姿，同时删去非直接相邻的相对运动因子。这是因为，人工调整只能确定单帧的正确位姿，而难以操作它局部其他帧的位姿，所以局部看来，当前轨迹就像是“平滑轨迹上有一个异常远的关键帧”。优化算法会倾向于认为该关键帧为异常值，但现在这个异常值反而是正确的值。跨过被调整帧的那些相对运动因子倾向于保持原有的局部结构，所以我们首先把它们删掉。删掉之后，Pose Graph 变成链状的，优化算法能够将局部轨迹进行修正。优化完毕后，再把之前删除的非相邻帧因子加回至优化，以保证局

部结构的最优性，如图 14 第 3 列所示。

3. 然后，建图员点击“标记回环”，此时回环检测算法根据当前轨迹状态，检测两个候选帧附近的回环情况。如果回环检测成功，就给 Pose Graph 中所有附近的回环帧加上回环约束，得到更好的回环结果。
4. 再次点击“执行优化”后，就会代入正确的回环结果，得到修正后的轨迹，如图 13 (d) 所示。

整体而言，主动回环对应的后端有一个“先减后增”的操作方法，该方法是我们在实际过程中摸索出来的一套行之有效的办法。它能够处理复杂的室内回环逻辑，也能够处理“共视重影”类问题，为重影问题提供了解决办法。

## 4 结论

### 4.1 11 月成果总结

本月我们对建图算法有若干处重要改进：在准入时取消了 GPS 起始信号检查，并要求采集轨迹连续；在算法层面，引入了三维 DR 以处理分层情况，引入

了层次分析以计算正确的坡道角度，引入 SE2 对准以处理起始点航向未知的问题，引入融合定位以检测实际地图的定位情况，增加了主动闭环和修图功能。通过目前的测试，可以认为：

1. 现有的建图算法可以适应起始点无 GPS 的情况，包括室内室外场景；
2. 对于同层结构的室内外混合场景，借助一定的修图手段，目前已具备室内建图能力；

## 4.2 定位侧对外改动总结

本轮 ODD 拓展主要针对放宽采集起始点 GPS 约束，允许同层室内发车，开发及测试均已完成。针对产品 ODD，定位侧拓展两项：

1. 地图采集起始点允许为弱 GPS 或无 GPS 区域；
2. 允许车辆室内发车及运营，但要求场地为同层结构，具体放开场地参考图1。

为顺利实施上述两项拓展，需对运营地图采集约束修改如下：

1. 针对 d 包采集起始点，约束修改如下：允许车辆弱 GPS 或无 GPS 环境作为采图起始点。若车辆运营场地为半室内，既需要同时采集室内数据及室外建图数据，要求车辆由室外开始采集；当车辆运营场地为全室内时，车辆可从室内选定位置开始。
2. 当采集地图过程中由于各种原因需要重新开始采集时，约束如下：车辆初始摆放位置需与上一轮采集终止时车辆摆放位置尽量保持相同，要求两次车辆摆放位置偏差不超过 3 米，两次车辆摆放朝向偏差不超过 30 度（左右均不超过 30 度），参考图4。
3. 设定采集贴边路线 z 包起点时，约束如下：第一个 z 包采集起始点车辆摆放位置和朝向需要与第一个 d 包采集起始点车辆摆放位置和航向基本保持一致，要求两次位置偏差不超过 3 米，两次车辆摆放朝向偏差不超过 30 度（左偏或者右偏均不得超过 30 度）。保证第一个 z 包起始位置后，再按照 z 包要求正常采贴边。
4. 针对 d 包采集路线，增加约束如下：要求采集 d

数据包时，拓展人员记录采集起始点位置，最终采集完成终止点需回到起始点位置，终止点车辆位置与起始点车辆位置偏差不超过 3 米。

## 4.3 挑战与展望

在下月，我们将继续改进现有的算法，主要改进项包括：

- 调整分层算法以适应更多复杂情况。目前分层算法比较依赖于 DR 轨迹，但大型地图或标定参数不准时，DR 轨迹存在明显累计误差，可能导致分层算法有一定的误判率；
- 调整现有的仿真方法以降低 CHECK 率。由于地图问题和数据问题都可能使仿真算法使用的融合定位丢失，使得我们难以从仿真结果去推断具体是建图问题还是定位或数据问题，进一步会影响出图结果。未来我们希望有更好的仿真策略以应对现场各种数据采集方面的问题。
- 推广现场建图制图，该开发项属于 3.0 后续目标的一部分。

## 附录

### A 完整实验结果

完整实验结果参见以下部分，表 4 为超 ODD 部分结果，表 5 至 7 为 ODD 内部分。注意该表未删除几个无效数据，因此数量稍多于第 3 章描述的实验。

**表4: 完整实验结果 (超 ODD 部分)**

序号	场景	仿真耗时	总耗时	室内/室外	大小(GB)	面积	仿真结果	建图结果	是否人工介入	备注
1	上海临港-闭环	93	240	室内	0.538	746	PASS	SUCCESS	NO	
2	腾讯众创-闭环	489	1150	室内	1.98	7100	PASS	SUCCESS	NO	
3	重庆大唐-非闭环	42.34	89	室内	0.153	467	PASS	SUCCESS	NO	
4	百度_03_l00	139	367	室内	0.628	2390	PASS	SUCCESS	NO	
5	中关村_03_r00	151	444	室内	0.647	2380	PASS	SUCCESS	NO	
6	清华附小-由内向外-闭环	52.1	132	半室内	0.344	601	PASS	SUCCESS	NO	
7	成都 IFS-闭环	196	313	半室内	0.902	1760	CHECK	SUCCESS	NO	
8	上海临港-闭环	107	323	半室内	0.604	1340	CHECK	SUCCESS	NO	
9	深圳 IFS-闭环	110	215	半室内	0.47	1030	PASS	SUCCESS	NO	
10	雄安-闭环	68.2	131.2	半室内	0.48	221	PASS	SUCCESS	NO	
11	山东青岛开放大学-闭环	35.6	87.3	半室内	0.187	428	PASS	SUCCESS	NO	
12	百度大厦-强制采图	64.8	119.6	室外 (强制)	0.199	952	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
13	清华附小-强制采图	60.7	112	室外 (强制)	0.264	708	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
14	上海创智汇-强制采图	127	214	室外 (强制)	0.64	1290	PASS	SUCCESS	NO	
15	中关村-强制采图	71.5	113	室外 (强制)	0.199	714	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
16	通州武夷融御-强制采图	90	146	室外 (强制)	0.235	1290	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
17	西安西北国金-单包	158	348	室外 (强制)	0.587	2980	PASS	SUCCESS	NO	

表 5: 完整实验结果 (ODD 内)

序号	场景	仿真耗时	总耗时	室内/室外	大小 (GB)	面积	仿真结果	建图结果	是否人工介入	备注
1	北京亦庄	129	316	室外	0.377	912	PASS	SUCCESS	NO	
2	北京京环	197	399	室外	0.377	1460	PASS	SUCCESS	NO	
3	北京世园会	/	/	室外	0.377	/	/	/	NO	老协议导致功能点缺失 采集数据不规范, 初始车辆未静止
4	北京海淀双榆树	354.388	585.691	室外	0.760	1580	PASS	SUCCESS	NO	
5	北京清华展示	167.033	299.228	室外	0.285	839	PASS	SUCCESS	NO	
6	北京电信	167.099	316.513	室外	0.495	854	PASS	SUCCESS	NO	
7	北京牡丹园科技楼	225.057	414.545	室外	0.549	1240	FAIL	FAIL	NO	Z 包在边界外, 数据采集问题
8	北京腾讯众创空间东	198.051	363.319	室外	0.468	828	PASS	SUCCESS	NO	
9	北京首钢冰球馆	480.169	1191.048	室外	0.512	3250	PASS	SUCCESS	NO	
10	重庆凯瑞特种车	371.122	633.808	室外	0.702	1980	PASS	SUCCESS	NO	
11	重庆大唐	130.491	165.838	室外	0.243	241	PASS	SUCCESS	NO	
12	福建东湖小镇 2	743.183	1210.55	室外	1.12	3560	PASS	SUCCESS	NO	
13	广东中山南桂园	618.177	876.259	室外	1.3	2570	PASS	SUCCESS	NO	
14	广东中山佰利山	565.217	979.794	室外	1.27	2350	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
15	广东佛山碧桂园总部	123.922	295.246	室外	0.25	6370	PASS	SUCCESS	NO	
16	广东佛山碧桂园物业	137.12	222.168	室外	0.33	444	PASS	SUCCESS	NO	
17	广东奥科齐 2	105.195	295.571	室外	0.228	626	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
18	广东广交会	730.372	1448.094	室外	1.35	7820	PASS	SUCCESS	NO	
19	广东广州科学中心 1	900.983	1611.37	室外	1.47	7520	PASS	SUCCESS	NO	
20	广东广州科学中心 2	1359.336	2264.35	室外	1.79	4910	PASS	SUCCESS	NO	
21	广东广州科学中心 3	1349.241	2463.63	室外	2.02	5950	PASS	SUCCESS	NO	
22	广东广州香雪	955.264	1447.725	室外	1.47	3100	PASS	SUCCESS	NO	
23	广东珠海湿地	1048.607	1500.199	室外	1.21	4170	PASS	SUCCESS	NO	
24	广东黄浦区朱雀智能	218.142	465.513	室外	0.573	1030	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
25	广东科美清洁	201.085	360.344	室外	0.328	1200	PASS	SUCCESS	NO	
26	贵州观山湖	458.538	843.609	室外	0.767	2390	PASS	SUCCESS	NO	
27	贵州移动大厦	77.083	143.96	室外	0.169	397	PASS	SUCCESS	NO	
28	河北保定百里峡	1292.575	2107.644	室外	1.44	5700	PASS	SUCCESS	NO	
29	河北秦皇岛天下第一关	/	/	室外	/	/	/	/	NO	采集数据不规范, 初始车辆未静止
30	河南许昌北邮	443.109	814.333	室外	0.748	2710	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
31	香港国际机场巴士站	287.112	421.22	室外	0.756	1490	PASS	SUCCESS	NO	
32	湖南长沙梅溪湖	404.238	685.416	室外	0.639	2130	CHECK	SUCCESS	YES	异形建筑, 需要人工介入
33	江苏徐庄高新区管委会	1035.305	1859.225	室外	1.4	5300	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
34	江苏苏州城管局 2	735.461	1255.059	室外	1.11	5170	PASS	SUCCESS	NO	
35	内蒙古满洲里套娃 1	248.097	438.484	室外	1.14	870	PASS	SUCCESS	NO	老协议导致功能点缺失
36	内蒙古满洲里套娃 2	676.076	1061.132	室外	0.759	4010	PASS	SUCCESS	NO	
37	陕西西安大唐不夜城	981.715	1738.484	室外	1.3	4900	PASS	SUCCESS	NO	
38	陕西西安西京学院	1075.519	2016.597	室外	1.28	7380	PASS	SUCCESS	NO	
39	上海中国移动 1	1073.995	1777.672	室外	1.92	5920	CHECK	SUCCESS	NO	无摄像头数据
40	上海绿地中央广场	785.753	1277.325	室外	1.03	4620	PASS	SUCCESS	NO	
41	四川成都天府新区兴隆湖	233.802	361.353	室外	0.352	2600	CHECK	SUCCESS	NO	激光退化警告
42	浙江杭州西湖	1775.063	3897.794	室外	1.74	1270	PASS	SUCCESS	NO	
43	陕西大雁塔 B 区	274.176	593.278	室外	0.439	1970	PASS	SUCCESS	NO	
44	河北石家庄裕西公园	/	/	室外	/	/	/	/	NO	缺少标定文件
45	四川成都兴城人居	566.15	926.064	室外	1.31	1400	PASS	SUCCESS	NO	
46	上海创智汇	383.211	596.513	室外	0.568	1290	PASS	SUCCESS	NO	
47	江苏无锡物联网	55.546	819.196	室外	0.120	158	PASS	SUCCESS	NO	
48	四川绵阳科技博览会	64.174	93.537	室外	0.149	13.3	PASS	SUCCESS	NO	
49	浙江宁波移动	73.125	112.724	室外	0.107	339	PASS	SUCCESS	NO	
50	浙江宁波移动重采集	75.593	112.082	室外	0.107	339	PASS	SUCCESS	NO	
51	河南中国武装警察指挥学校	2300.884	3901.774	室外	1.76	1150	PASS	SUCCESS	NO	
52	四川成都天府兴隆湖 A 区	337.531	694.134	室外	0.411	3210	CHECK	SUCCESS	NO	激光退化警告
53	福建淮安半岛一期	342.626	553.262	室外	0.773	1540	PASS	SUCCESS	NO	
54	辽宁营口港务 A 区	365.92	544.803	室外	0.885	136	PASS	SUCCESS	NO	
55	四川中国联通	87.348	200.995	室外	0.192	371	PASS	SUCCESS	NO	CHECK
56	北京中关村环保园重采集	1533.69	2183.077	室外	1.45	6380	PASS	SUCCESS	NO	
57	浙江德清五西村	209.084	414.819	室外	0.473	987	PASS	SUCCESS	NO	
58	北京牡丹园全贴边	1992.79	3093.307	室外	1.95	8190	PASS	SUCCESS	NO	
59	河南郑州交通局	253.305	565.158	室外	0.386	1460	PASS	SUCCESS	NO	
60	湖北咸宁合嘉	867.472	1822.373	室外	1.56	5380	CHECK	FAIL	NO	融合丢失
61	陕西西安大雁塔	2010.798	3740.79	室外	2.94	10600	CHECK	PASS	NO	融合丢失 (地图分层) 已修复
62	山东潍坊高密	397.631	792.18	室外	1.11	5080	PASS	SUCCESS	NO	
63	河南郑州数字展会	141.635	310.757	室外	0.218	851	PASS	SUCCESS	NO	
64	浙江德清智能生态	455.108	798.336	室外	0.679	2190	PASS	SUCCESS	NO	
65	陕西宝鸡蟠龙公园东	412.406	848.792	室外	0.644	2750	PASS	SUCCESS	NO	
66	陕西宝鸡蟠龙公园西	1151.103	2365.748	室外	1.19	1210	PASS	SUCCESS	NO	
67	北京 BOBO 自由城	124.862	247.904	室外	0.224	457	PASS	SUCCESS	NO	
68	北京顺义国展中心	154.133	265.049	室外	0.146	1280	PASS	SUCCESS	NO	
69	内蒙古呼和浩特环卫局	110.281	171.481	室外	0.238	265	PASS	SUCCESS	NO	
70	四川成都 IFS 金融中心	160.897	275.626	室外	0.513	968	CHECK	SUCCESS	NO	激光初始化失败
71	四川成都 IFS 玻璃广场	109.426	174.485	室外	0.257	375	PASS	SUCCESS	NO	
72	北京众创 A 座前广场	507.72	873.69	室外	0.741	1810	PASS	SUCCESS	NO	

表6: 完整实验结果 (ODD 内) 续 1

序号	场景	仿真耗时	总耗时	室内/室外	大小(GB)	面积	仿真结果	建图结果	是否人工介入	备注
73	广东深圳佳兆业	195.686	299.991	室外	0.554	593	PASS	SUCCESS	NO	
74	贵州贵阳贵黔国际总医院	68.222	110.25	室外	0.162	231	PASS	SUCCESS	NO	
75	贵州贵黔国际总医院健康管理中心	548.852	857.092	室外	0.872	2300	PASS	SUCCESS	NO	
76	安徽黄山屯溪依云郡	289.923	488.138	室外	0.591	1490	PASS	SUCCESS	NO	
77	四川德阳移动	53.906	81.903	室外	0.142	172	PASS	SUCCESS	NO	
78	上海杨浦滨江公园	761.331	1415.897	室外	1.41	3110	PASS	SUCCESS	NO	
79	河南许昌芙蓉产业园	663.988	1598.169	室外	0.874	4270	PASS	SUCCESS	NO	
80	江苏南京徐庄管委会二期	992.056	2029.327	室外	1.25	3870	PASS	SUCCESS	NO	
81	江苏南京徐庄管委会六期	714.179	1724.629	室外	0.740	6250	PASS	SUCCESS	NO	
82	上海杨浦滨水区 B 区	111.072	171.02	室外	0.218	478	PASS	SUCCESS	NO	
83	江苏南京徐庄管委会一期	856.263	2119.291	室外	0.887	5070	PASS	SUCCESS	NO	
84	安徽黄山宏村	1214.129	2174.004	室外	2	4630	PASS	SUCCESS	NO	
85	广东广州国际生物岛	1313.182	1894.58	室外	1.98	4680	PASS	SUCCESS	NO	
86	福建福州上江城 C 区	1302.48	2017.434	室外	1.81	4230	PASS	SUCCESS	NO	
87	山西阳泉政府大院阳光广场	665.978	1539.993	室外	0.742	3320	PASS	SUCCESS	NO	
88	广东深圳华强北欢乐谷	1023.393	1791.156	室外	1.78	281	PASS	SUCCESS	NO	
89	福建福州麦顶小学	490.119	1010.349	室外	1.3	1810	PASS	SUCCESS	NO	
90	海南三亚互联网双创中心	1134.819	1834.786	室外	1.93	4030	PASS	SUCCESS	NO	
91	上海长阳创谷新增	81.916	119.82	室外	0.192	141	PASS	SUCCESS	NO	
92	北京海淀公园	969.084	1560.755	室外	1.21	3950	PASS	SUCCESS	NO	
93	上海临港	109.685	171.49	室外	0.231	523	PASS	SUCCESS	NO	
94	北京水立方景区	741.747	1364.61	室外	0.800	4130	PASS	SUCCESS	NO	
95	四川成都万科云城	53.325	95.074	室外	0.126	224	PASS	SUCCESS	NO	
96	海南海口西星宇集团	135.089	230.241	室外	0.295	48.9	PASS	SUCCESS	NO	
97	海南海口智力运动产业基地	755.843	1206.264	室外	1.41	2800	PASS	SUCCESS	NO	
98	河北沧州高铁站	730.848	1184.263	室外	0.699	5500	PASS	SUCCESS	NO	
99	安徽黄山国际酒店	94.666	155.986	室外	0.207	296	PASS	SUCCESS	NO	
100	四川成都IFS 观景台	523.592	1105.47	室外	1.35	4160	CHECK	SUCCESS	NO	
111	海南海口美兰机场	255.622	450.831	室外	0.629	917	PASS	SUCCESS	NO	
112	广东深圳华强北欢乐谷 B 区	611.292	848.541	室外	1.36	1140	PASS	SUCCESS	NO	
113	河南郑州亿达科技	176.635	363.4	室外	0.462	826	PASS	SUCCESS	NO	
114	海南鲁能山海天	119.76	179.262	室外	0.298	390	PASS	SUCCESS	NO	
115	上海运河湾工业园	772.542	1298.445	室外	1.78	3650	PASS	SUCCESS	NO	
116	海南三亚海棠湾	123.459	3444.744	室外	0.272	501	PASS	SUCCESS	NO	
117	重庆大塘 2	105.319	164.725	室外	0.1875	483	PASS	SUCCESS	NO	
118	广东广州中科院先进院	562.446	858.324	室外	0.977	2250	PASS	SUCCESS	NO	
119	陕西西安天朗集团	206.912	360.355	室外	0.319	1250	PASS	SUCCESS	NO	
120	河南郑州河南国家大学科技园	427.288	898.989	室外	1.06	6620	PASS	SUCCESS	NO	
121	上海临港碧海蓝天	56.755	278.666	室外	0.867	1250	CHECK	FAIL	NO	融合丢失, 硬件 IMU 不对应
122	北京腾讯广场新	725.431	2049.179	室外	2.96	28000	CHECK	SUCCESS	NO	hardware problem
123	福建淮安半岛三期 A 区	857.558	2078.217	室外	3.74	10000	PASS	SUCCESS	NO	
124	福建福州万福中兴	976.666	1983.009	室外	2.31	9920	PASS	SUCCESS	NO	
125	福建东湖小镇 1	1145.044	1897.844	室外	2.16	5980	PASS	SUCCESS	NO	
126	广东中山雅居乐剑桥郡	656.702	1521.314	室外	2.69	4980	CHECK	SUCCESS	NO	z 包出边界
127	广东南沙蕉门	1244.698	2162.033	室外	2.54	6160	PASS	SUCCESS	NO	
128	广东珠海长隆	1646.1	2758.379	室外	2.85	11300	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
129	广西柳州环江滨自行车道	881.603	1760.77	室外	3.08	4160	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
130	海南呀诺	1167.21	2109.42	室外	2.23	4600	PASS	SUCCESS	NO	
131	江苏南京徐庄管委会二期	467.121	673.175	室外	3.93	11400	PASS	SUCCESS	NO	
132	江苏无锡恒生	1922.943	2671.174	室外	3.66	17400	PASS	SUCCESS	NO	
133	江苏昆山亭林	2017.193	3822.031	室外	3.91	40000	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
134	澳门鱼人码头	542.968	1196.563	室外	2.76	6640	CHECK	SUCCESS	NO	z 包出边界
135	内蒙古商贸 3	1027.975	2093.346	室外	3.12	16800	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
136	内蒙古万锦枫泽湾 2	771.911	1486.362	室外	2.28	6990	PASS	SUCCESS	NO	
137	陕西西安北站	1385.769	2760.333	室外	2.06	15100	PASS	SUCCESS	NO	
138	陕西西安大唐不夜城 2	1730.255	3122.357	室外	2.87	15400	PASS	SUCCESS	NO	
139	陕西西安大雁塔	1068.129	2321.89	室外	2.94	21300	CHECK	SUCCESS	NO	激光退化(定位质量警告)
140	陕西西安翻译学院 2	2099.187	3591.827	室外	4.05	20200	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
141	上海德邦	689.15	1758.23	室外	3.22	7070	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
142	上海提香别墅 2	1907.53	3581.829	室外	3.5	24800	PASS	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
143	上海华昌艺术宫	908.26	2385.433	室外	2.34	1140	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
144	北京通州武夷融御	1235.615	1891.583	室外	2.22	9420	PASS	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
145	北京 51VR 边界	874.878	1650.468	室外	2.6	6170	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
146	北京腾讯众创 2	765.288	1826.474	室外	2.18	7030	PASS	SUCCESS	NO	采集操作不规范, 功能点问题
147	北京龙熙苑二区	4497.824	6247.437	室外	3.16	18600	PASS	SUCCESS	NO	
148	陕西西安兵马俑	959.786	1873.062	室外	2.33	20400	PASS	SUCCESS	NO	
149	河南洛阳兴洛湖公园	733.622	1550.841	室外	2.17	5780	PASS	SUCCESS	NO	
150	内蒙古呼和浩特玉泉区大昭寺	2972.579	5169.324	室外	3.42	19000	PASS	SUCCESS	NO	
151	福建福州上江城 B 区	649.215	1649.117	室外	3.11	5160	PASS	SUCCESS	NO	
152	福建福州融侨檀府	1220.872	2192.756	室外	2.69	4880	PASS	SUCCESS	NO	
153	上海长阳谷创	1111.446	1985.317	室外	3.4	8790	PASS	SUCCESS	NO	
154	上海复旦大学附属肿瘤医院	705.729	1800.74	室外	2.53	6630	PASS	SUCCESS	NO	
155	陕西阳泉政府大院	1326.925	2420.782	室外	2.56	10100	PASS	SUCCESS	NO	

表 7: 完整实验结果 (ODD 内) 续 2

序号	场景	仿真耗时	总耗时	室内/室外	大小 (GB)	面积	仿真结果	建图结果	是否人工介入	备注
156	北京世界园艺	2628	4931	室外	7.12	34500	CHECK	SUCCESS	NO	融合丢失, 硬件问题
157	北京柳荫公园	976	2625	室外	6.13	19100	CHECK	SUCCESS	NO	激光丢失, GPS 区丢失
158	福建淮安半岛一期	716	1017	室外	9.78	3190	PASS	SUCCESS	NO	
159	福建飞凤山 1	2812	5162	室外	6.16	26100	CHECK	SUCCESS	NO	融合丢失, 硬件问题
160	福建飞科小镇 1	1369	2353	室外	5.55	9060	PASS	SUCCESS	NO	
161	广东中山雅乐居 1	4255	4255	室外	13.8	41900	CHECK	FAIL	NO	分层不正确
162	河北雄安市民中心	1405	2201	室外	3.97	10900	CHECK	SUCCESS	NO	
163	江苏常州中原	1510	2797	室外	5.85	8330	CHECK	SUCCESS	NO	Lidar 初始话问题
164	内蒙古商贸 2	6666	6666	室外	17.2	52500	CHECK	FAIL	NO	融合初始化失败, 存在地图问题
165	内蒙古大学 2	6446	6446	室外	15.4	75000	CHECK	SUCCESS	NO	融合定位丢失
166	内蒙古电子	4413	8635	室外	11.9	44100	CHECK	SUCCESS	NO	未知原因融合丢失
167	内蒙古万锦丰泽湾	2236	2236	室外	5.36	20200	PASS	SUCCESS	NO	
168	内蒙古伊利	2333	4507	室外	6.69	28000	PASS	SUCCESS	NO	
169	上海海湾科技园	1118	2349	室外	5.28	14000	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
170	内蒙古万锦领秀	1732	3507	室外	6.45	15000	PASS	SUCCESS	NO	
171	广东深圳华为总部	1067	2194	室外	4.55	7270	CHECK	SUCCESS	NO	采集操作不规范
172	广东深圳市民中心北广场	1544	3031	室外	5.36	15000	CHECK	FAIL	NO	建图轨迹起始点问题
173	广东中移通信	2016	3700	室外	8.42	10900	CHECK	SUCCESS	NO	存储贴边轨迹失败
174	广东广州国际生物岛 BC 区	1020	1879	室外	4.06	9470	PASS	SUCCESS	NO	
175	福建福州飞凤山	15953.9763	27691.837	室外	29	76200	CHECK	FAIL	NO	定位警告 (初始化失败, 融合丢失)
176	福建福州阳光城 2	31104.625	31104.625	室外	15.9	30900	PASS	SUCCESS	NO	
177	福建福州上江城 A 区	6091.152	7631.875	室外	4.87	9230	CHECK	SUCCESS	NO	融合偏差大
178	福建淮安半岛一期	17995.925	21693.615	室外	15.1	32300	CHECK	SUCCESS	NO	定位警告 (激光退化)
179	上海质子重离子医院	4651.673	7932.664	室外	7.84	19800	CHECK	SUCCESS	NO	定位问题
180	北京中关村环保科技园示范区	7971.814	12890.984	室外	8.32	41500	CHECK	FAIL	NO	采集操作不规范 (融合丢失, 地图高度不正确)