

目录

环宇-东风技术中心 SHARINGVAN 标定方案 V1.0.....	2
一 . 方案概述.....	2
二 . 摄像头与激光雷达标定.....	4
三 . 激光雷达与激光雷达标定.....	8
四 . 激光雷达与 GNSS 系统标定.....	8
五 . 激光雷达与车体坐标系的标定.....	9

武汉环宇智行

环宇-东风技术中心 SHARINGVAN 标定方案 V1.0

一、方案概述

东风技术中心现有的 SHARINGVAN 车辆的自动驾驶系统必须依赖高可靠的感知和定位系统，为了保证不同工况、场景系统能够稳定运行，传感器的布设采取了全方位、多层次以及冗余设计。整体系统的传感器布设方案如图 1-1 所示：

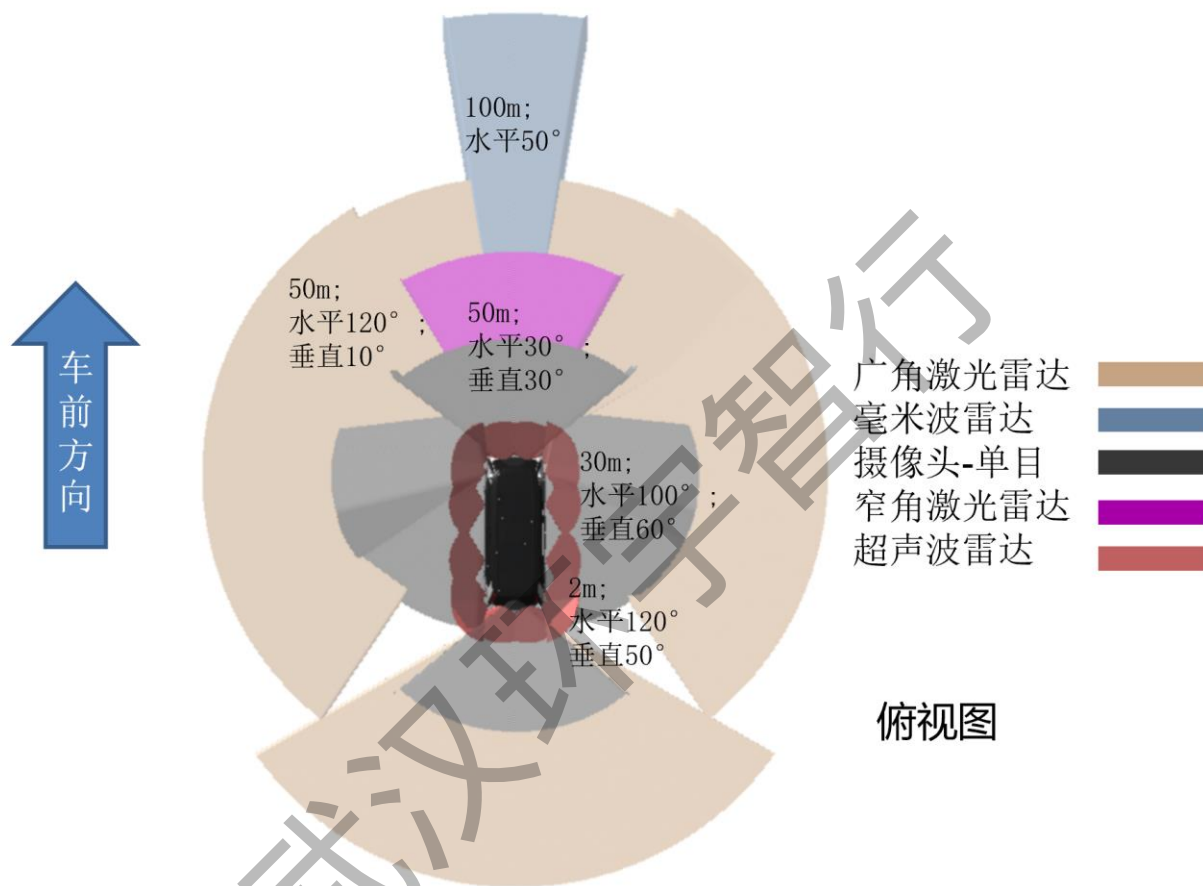


图 1-1 车辆整体传感器布设示意

SHARINGVAN 目前的车辆传感器布设方案如图 1-1 所示，感知传感器主要包括摄像头、激光雷达、超声波雷达以及毫米波雷达；定位传感器主要包括 GPS+IMU 的 GNSS 系统。摄像头使用前需要先进行内参的标定，摄像头厂家会先进行初始的标定，在使用过程中会根据实际情况利用棋盘格进行再次标定；毫米波雷达内参默认厂家已经标定好，我们需要标定毫米波雷达相对于车体的外参数，该外参数一般可以安装位置或者是基于运动目标进行后标定；激光雷达内参数默认厂家已经给出，扫描式激光雷达运动过程中的补偿不属于此标定文档的范畴，激光雷达还需要进行与车体的外参标定；超声波雷达也需要进行相对于车体的外参标定，该标定工作也暂时未列入此文档。

整车传感器的标定与具体的应用紧密联系，系统在设计上需要考虑单个传感器部件可以单独进行感知和定位的输出。例如前向摄像头需要能够单独相对于车体坐标系的车道线信息以及输出单目的障碍物信息，因此需要标定前向摄像头与车体坐标系之间的外参关系；前向广角激光雷达

(镭神 32 线半固态)、前向窄角激光雷达 (Livox-MID40)、左侧广角激光雷达 (镭神 32 线半固态)、右侧广角激光雷达 (镭神 32 线半固态) 以及后侧广角激光雷达 (镭神 32 线半固态) 都需要能够单独输出相对于车体坐标系的障碍物信息以及进行基于高精度地图的定位, 所以需要得到每个激光雷达相对于车体坐标系的外参数; 基于 GPS+IMU 导航系统位姿的定位与规划避障功能需要知道 GPS+IMU 系统相对于车体坐标系的外参数; 基于单毫米波雷达的障碍物输出需要知道毫米波雷达相对于车体的外参数; 基于单超声波雷达的障碍物输出需要知道超声波雷达相对于车体坐标系的外参数; 联合摄像头+激光雷达+超声波雷达的结果级融合结果需要知道摄像头、激光雷达与超声波雷达的两两的外参标定关系; 融合激光雷达+GPS+IMU 的建图与定位模块, 需要知道各激光雷达与 GPS+IMU 系统的外参关系。综上所述, 结合 SHARINGVAN 车辆本身的传感器部署数量和特征, 表 1-1 将列出所需要标定的标定需求。

表 1-1 整车传感器标定需求分析

标定对象	标定需求	本文档是否覆盖	方法与精度要求
前左摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
前中摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
前右摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
左前摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
左后摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
右前摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
右后摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
后摄像头	相机内参标定	否	棋盘格标定 --- 高
前左摄像头 前广角激光雷达	相机与激光雷达 外参标定	是	Co-Normal 棋盘格标定 --- 高
前中摄像头 前广角激光雷达	相机与激光雷达 外参标定	是	Co-Normal 棋盘格标定 --- 高
前右摄像头 前广角激光雷达	相机与激光雷达 外参标定	是	Co-Normal 棋盘格标定 --- 高
前中摄像头 前窄角激光雷达	相机与激光雷达 外参标定	是	Co-Normal 棋盘格标定 --- 高
后摄像头 后广角激光雷达	相机与激光雷达 外参标定	是	Co-Normal 棋盘格标定 --- 高
前广角激光雷达 车体坐标系	车体外参标定	是	Lidar_Align_Tool 地面+标志物 --- 中
前广角激光雷达 前窄角激光雷达	激光雷达间外参标定	是	SLAM 建图匹配标定 --- 高
前广角激光雷达 左广角激光雷达	激光雷达间外参标定	是	SLAM 建图匹配标定 --- 高
前广角激光雷达 右广角激光雷达	激光雷达间外参标定	是	SLAM 建图匹配标定 --- 高
前广角激光雷达 后广角激光雷达	激光雷达间外参标定	是	SLAM 建图匹配标定 --- 高

前广角激光雷达 GPS+IMU 系统	激光雷达与 GNSS 系 统外参标定	是	SLAM 建图匹配+量测 --- 中
GSP+IMU 系统 车体坐标系	车体外参标定	否	量测法 --- 低
前左摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
前中摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
前右摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
左前摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
左后摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
右前摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
右后摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中
后摄像头 车体	相机车体外参标定	否	车道线+标志物 --- 中

*以上表格对于标定的需求分析并不覆盖对应的毫米波雷达与超声波雷达应用，相关的方案文档详情咨询环宇相关人员；

*以上表格对于可以通过递推的方式确定的标定关系的需求并未列出，比如可以通过标定前广角激光雷达与车体的外参关系以及前广角激光雷达与后广角激光雷达的外参关系，间接求出后广角激光雷达相对于车体的外参关系，因此后广角激光雷达与车体坐标系的标定需求未列出。

以上，传感器之间的标定思路往往有多种并且存在冗余标定，根据实际情况，我们会优先选择精度高的标定，尽量避免低精度的标定发生相应的误差传播的问题，而在尽可能的情况下避免间接标定而选择直接标定。

二、摄像头与激光雷达标定

摄像头与激光雷达对客观世界的感知具有互补性，摄像头有更加丰富的颜色纹理信息、更高的空间分辨率、以及对目标有更多的区分识别能力；而激光雷达点云不容易受到光照条件的影响、具有直接精确的几何距离信息，因此将两者进行融合，得到图像上给定像素处的对应的激光点云，可以进一步将影像和激光点云进行前处理或者是后处理，进一步提高感知与定位的效果。

实现图像与激光点云的对应关系关键是求取满足针孔模型的摄像头与对应的激光雷达之间的 SE3 的 4x4 的变换矩阵，该矩阵可以被以欧拉角方式描述的 $[\delta_x, \delta_y, \delta_z, \text{roll}, \text{pitch}, \text{yaw}]$ 等 6DOF 标量描述，也可以通过李代数 se3 来刻画。求取摄像头与激光雷达的外参的方法总体而言包括以下三类：1) 基于 SLAM 方法：分别对视觉以及激光雷达进行 SLAM，通过所建地图以及轨迹做匹配从而确定外参数，该方法严重受限于前段 SLAM 的精度并且与环境有重大联系，因此标定精度一般不高，且不够鲁棒；2) 基于有标定物的方法：该方法通过棋盘格或者是自制的特殊的

标定物，通过自动、半自动或者全自动的方法，寻求图像和激光点云中的同名点、同名平面、同名边缘等对象，构建投影残差方程，优化得到最终的外参参数；3) 基于无标定物的方法：主要是基于激光雷达反射率与图像灰度值之间的相关性或者是基于图像边缘与激光雷达边缘之间的相关性等现象，构建残差方程进行优化得到相应的外参，这种方法需要依赖激光雷达的反射率，一般对激光雷达的线数和点云质量要求比较高，并且需要有比较高质量的初参。

在本设计方案中，我们采用第二种设计思路，设计了一种基于同名法向量的方法，优化求取摄像头与激光雷达的外参数。

我们的标定工具基于 MATLAB 的 toolstrip 框架代码开发，拥有丰富的插件库，能够提供完备易用的用户界面实现影像与激光雷达点云的外参标定。软件框架示意图如图 2-1 所示：

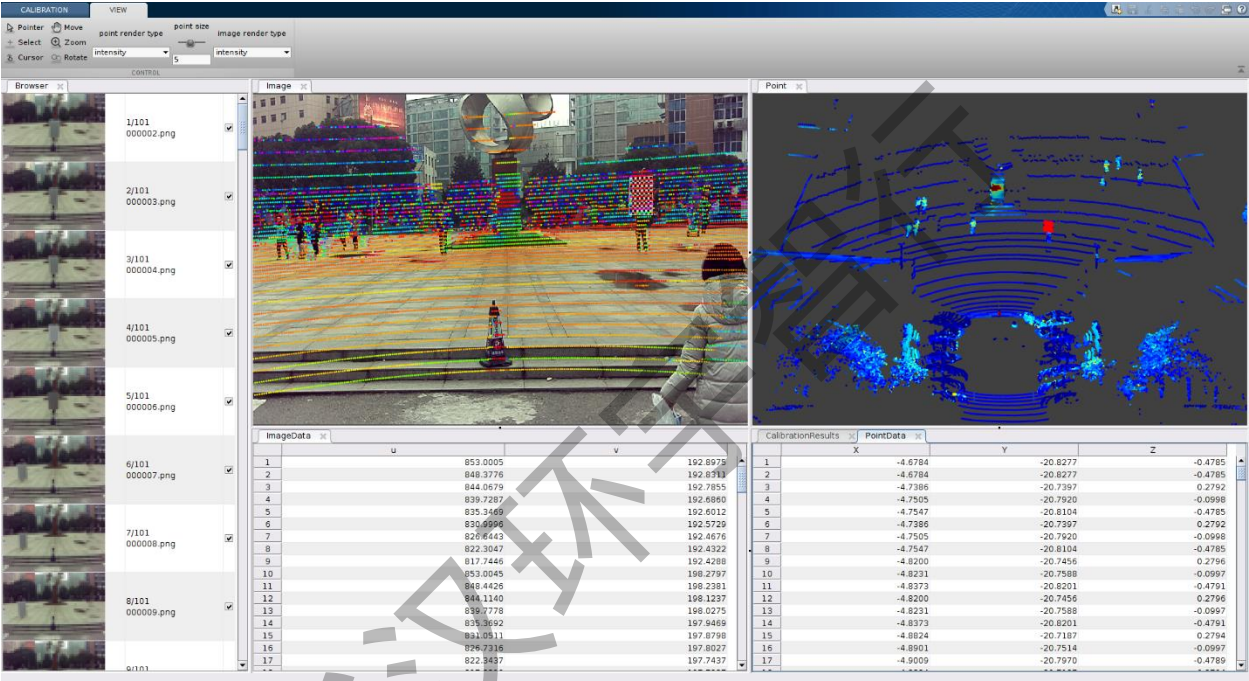


图 2-1 图像与激光雷达点云标定软件示意图

图像与激光雷达点云进行标定需要录制一组满足标定条件的包含有激光点云与图像的数据包，一般我们建议采用 ROS 框架录制相应的数据包，并利用我们的切分工具包实现对数据的同步以及筛选，然后利用图 2-1 所示的工具进行外参数的估计，并评估外参数估计的准确度，对于发生错误的数据帧可以人工干预进行删除然后重新标定，知道标定的精度满足条件。以下表格 2-1 为标定的流程以及相应的注意事项：

表 2-1 基于棋盘格标定物的同名法向标定方法流程及注意事项

1. 采集含有棋盘格标定板的包含有给定激光雷达点云 topic 以及给定摄像头数据 topic 的 ROSBAG 包，对数据包的图 2-2 会进一步加以解释和说明；
2. 通过 ros_data_multiBag_image_point 工具包（该工具包与以上工具包为同一框架开发的 MATLAB 界面工具），实现对点云与激光雷达的同步切片分包，得到 N 对含有棋盘格目标的激光点云和图片文件。
3. 通过图 2-1 所示工具将图像-激光点云对载入，设计相应的外参初始值，浏览观察图像与激光雷达点云是否符合标定要求，有无破损残缺等；

4. 点击标定按钮，通过非线性最小二乘方法实现外参的进一步调优；
5. 观察棋盘格渲染图以及整个图片点云渲染图，判断标定的精度，对于不满足精度要求的观测样本值通过勾选框去除，重新标定知道满足标定结果；
6. 确定标定参数满足标定结果后，点击导出按钮，将外参数保存到文件中。

*



图 2-2 标定数据包对棋盘格观测位置姿态的要求

如图 2-2 所示，为了使得同名平面的姿态向量构成的矩阵的秩尽可能满，我们需要每个位置处的棋盘格相对摄像头和激光雷达要有不同的姿态角，一般我们建议在每个观测点左偏 30 度以内、右偏 30 度以内、上偏 30 度以内、下偏 30 度以内以及正对姿态等五个观测姿态；在摄像头的视场扇面上，不同视场角和距离处尽可能有观测值，如图 2-2 所示。

为了进一步的提高自动化水平，我们采用了差分的方法将棋盘格的部分点云通过作差的方式提取出来，然后通过 RANSAC 的方式提取了平面方程和法向量，原理如图 2-3 所示：

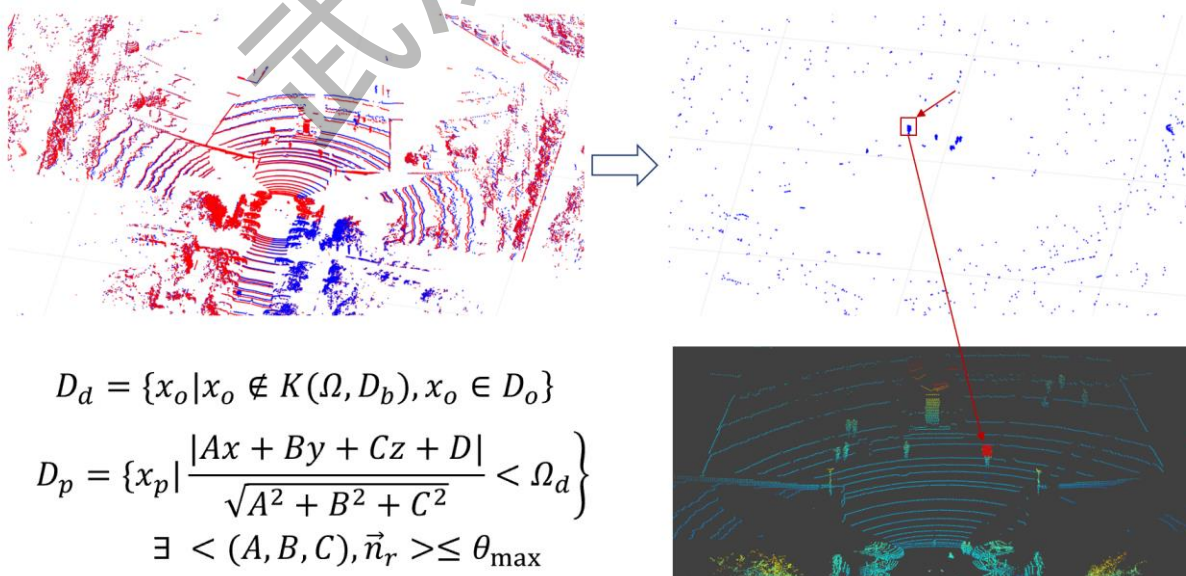
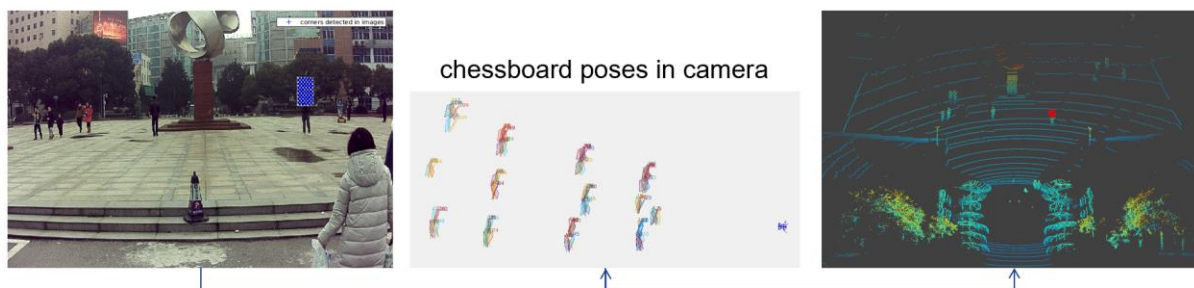


图 2-3 差分法提取棋盘格点云并使用 RANSAC 方法优化平面方程

得到一组棋盘格在相机坐标系以及激光点云坐标系内的坐标与法向量后，我们通过构造图 2-4 所示的残差方程，实现外参的估计。



$$R^* \cdot N = M$$

$$R^* = (M \cdot N') \div (N \cdot N')$$

$$(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)^* = \underset{(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)}{\operatorname{argmin}} \sum_i \sum_j ((R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot p_i + T(x, y, z) - q_{i,j})' \cdot (R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot n'_i))$$

图 2-4 基于同名平面法向的外参估计残差损失函数

其中 R, T 分别是相机坐标系到激光雷达坐标系之间的变换，其中 p 对应着棋盘格中心点在相机坐标系中的坐标， q 对应着激光雷达坐标系中棋盘格上的点的三维坐标， n 对应着棋盘格在相机坐标系中的法向量。

整体的算法流程如图 2-5 所示：

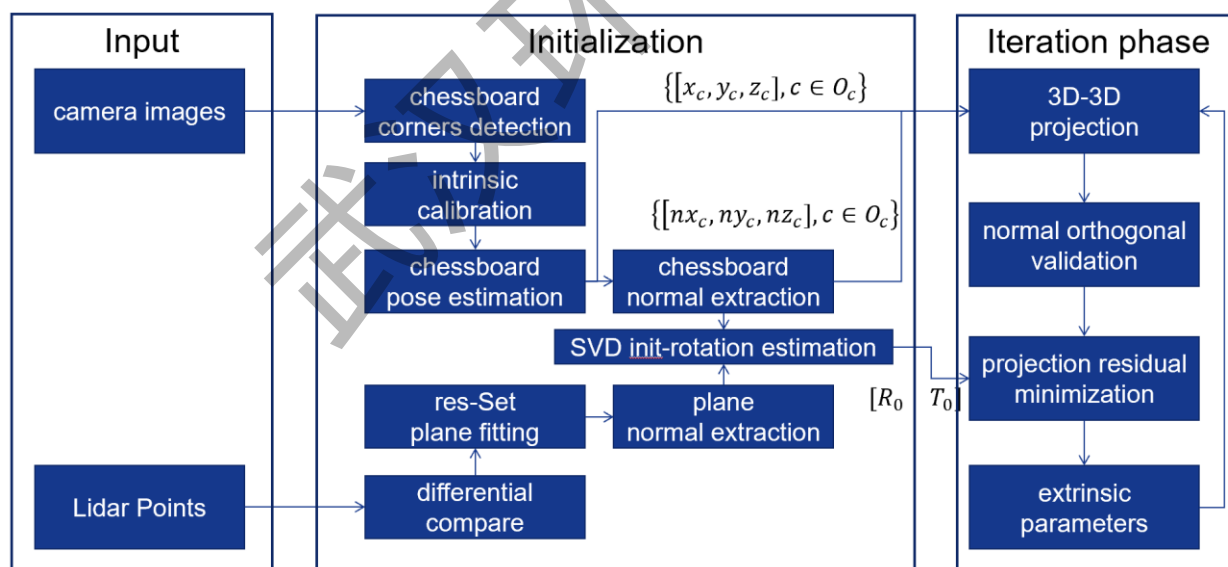


图 2-5 基于同名棋盘格平面法向量的激光雷达与摄像头外参估计整体流程图

三. 激光雷达与激光雷达标定

激光雷达与激光雷达之间的标定指的是找到激光雷达之间的 $se3$ 的表换关系，通过该变换关系可以将不同激光雷达坐标系下的点云数据变换到统一坐标系下。

激光雷达坐标系之间的标定原则上只要找到同一物体在不同激光雷达坐标系下的对应坐标即可优化对应外参，但是由于激光雷达点云的稀疏性以及受激光雷达视场的影像，往往比较难以通过自动或者手动的方式找到不同激光雷达坐标系下对应于同一物体的三维坐标，因此我们采用不同激光雷达点云的 NDT 的变换的相似性来求解其变换外参。

为了应对没有重叠视场以及稀疏激光点云之间的标定，本方案拟采用通过局部 SLAM 的方式获得不同激光雷达点云的局部的稠密的精确的激光点云地图，然后对该点云地图进行相应的基于 NDT 的匹配，从而求取精确的外参数。

获取局部激光点云地图本方案拟采用基于 LEGO-LOAM 的方案，该方案主要维护了一个高频次的 $frame2frame$ 的帧间的激光里程计以及低频次的 $frame2map$ 的优化了的激光里程计，最后对于数据包中可能的 GPS+IMU 数据进行了一定的融合，具体的方案如图 3-1 所示：

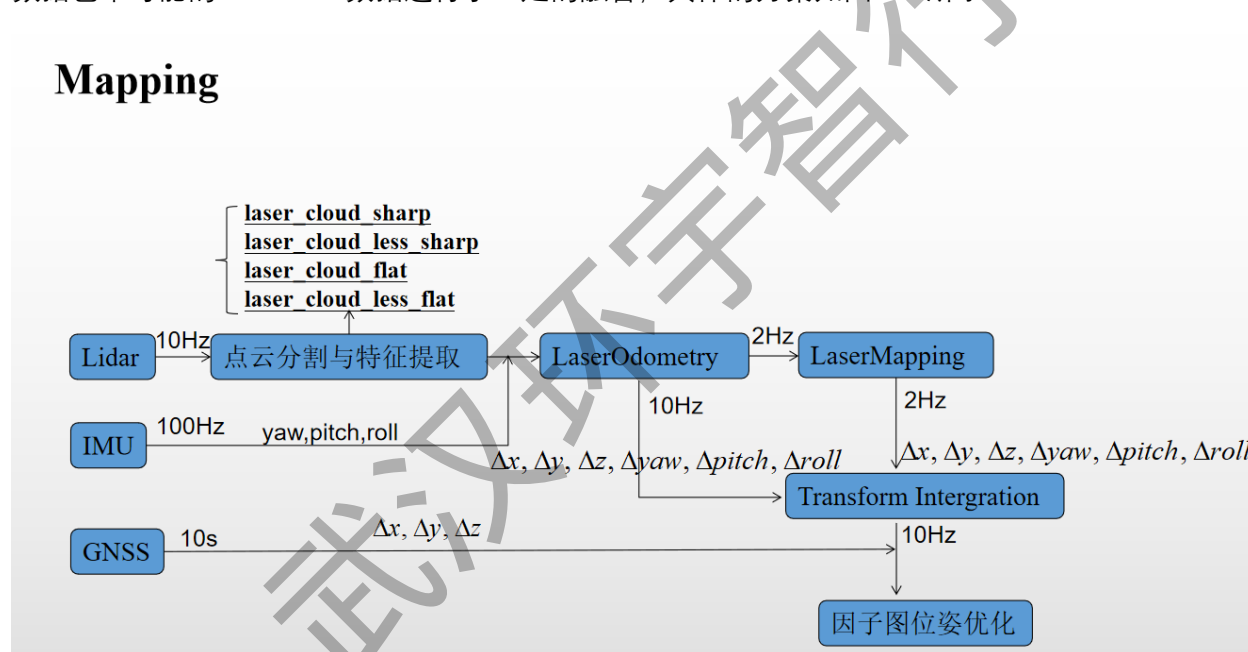


图 3-1 基于 LEGO-LOAM 框架的局部激光点云建图

得到了不同激光雷达的局部地图之后，我们根据获得的初始参数，在初始参数的基础上进行基于 NDT_MATCHING 的匹配，从而得到准确的激光雷达之间的外参数。

四. 激光雷达与 GNSS 系统标定

激光雷达与 GNSS 坐标系之间的标定，拟采用激光里程计的方法获得激光雷达局部的轨迹，然后通过激光雷达轨迹与 GNSS 轨迹之间进行匹配，从而优化外参。

如图 4-1 反应的就是东风技术中心的前向激光雷达所建的局部地图以及在建图过程中输出的轨迹，蓝色是激光雷达所输出的轨迹，红色是 GPS+IMU 所输出的轨迹。从图上可以看出，正因为激

激光雷达与 GNSS 系统存在坐标系不统一的问题，使得对于同一个车辆的运动，两个不同传感器输出的轨迹形状相似，但是存在一个 $se3$ 的变换。

属性	初始值
l2b_tx	0
l2b_ty	0
l2b_tz	0
l2b_roll	0
l2b_pitch	0
l2b_yaw	0

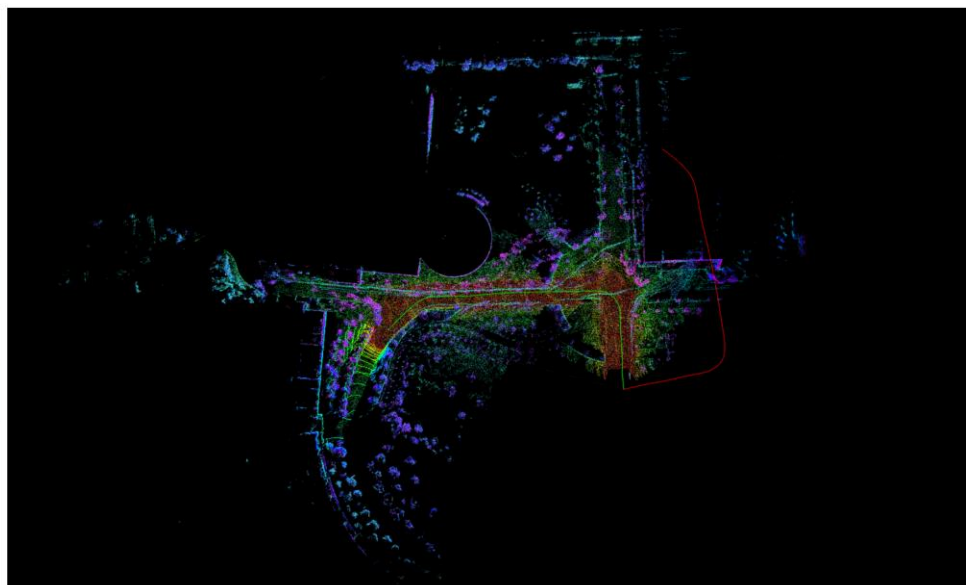


图 4-1 激光里程计轨迹与 GNSS 系统输出轨迹

得到激光雷达轨迹与 GNSS 轨迹后，可以通过优化重投影误差的损失函数，得到激光雷达与 GNSS 之间的角度的外参关系。如图 4-2 所示：

属性	值
l2b_tx	0
l2b_ty	0
l2b_tz	0
l2b_roll	3.1404
l2b_pitch	3.1145
l2b_yaw	1.6583

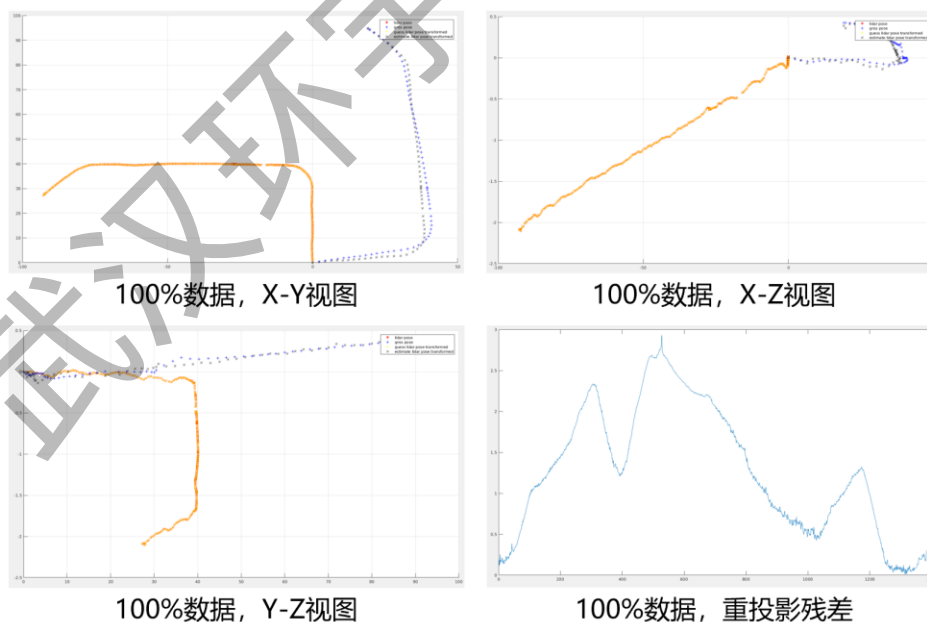


图 4-2 激光里程计轨迹与 GNSS 轨迹的配准示意

五、激光雷达与车体坐标系的标定

激光雷达与车体的标定往往比较复杂，由于车体本身不具备感知客观世界的能力，我们往往需要借助人工量测的方法放置一些位置已知的标定物或者是地平面来作为估计激光雷达与车体坐标系之间的参考，该部分我们通过 lidar_align_tool 手动标定估计，精度一般比较有限。