

基于 LIO-SAM 轨迹的高精地图生成方法

孙弘选

哈尔滨师范大学，黑龙江哈尔滨，150000；

摘要：高精地图是无人驾驶和辅助驾驶系统的关键基础，其中 OpenDRIVE 格式的地图因其标准化和高精度特性，被广泛应用于自动驾驶场景的仿真与测试。然而，传统高精地图的生成存在成本高、周期长等问题，难以满足快速迭代更新的需求。本文提出了一种基于 LIO-SAM (Lidar Inertial Odometry – Smoothing And Mapping) 轨迹的快速生成 OpenDRIVE 格式高精地图的方法。该方法利用 LIO-SAM 生成的轨迹数据，通过 B 样条插值对轨迹进行拟合，拟合后采用滑动窗口法分割出轨迹中的转弯段，并对其进行针对性优化处理。使用生成的结果与 GPS 真值进行对比，生成的高精地图已经达到了分米级的精度，能够满足园区低速无人车自动驾驶的需求。

关键词：高精地图；自动驾驶；LIO-SAM；OpenDRIVE；B 样条插值

DOI：10.69979/3041-0673.25.01.089

1 绪论

1.1 研究意义

本文章实验的应用场景主要聚焦于园区低速无人车的有图方案自动驾驶。该系统基于 LIO-SAM 轨迹生成 OpenDRIVE 格式的高精地图，通过简单且快速的部署方式，有效应对低速自动驾驶应用中对地图精度和部署时间的高要求。实验方案充分利用现有的传感器数据，避免了人工绘制高精地图的繁琐和潜在风险，同时也降低了对高精度传感器的依赖，确保了系统的简单性和可靠性。针对 LIO-SAM 在转弯处精度下降的问题，实验通过算法分割出转弯段并进行重新拟合。该方法有效减少了转弯过程中产生的精度误差，从而提高了整体轨迹的精度和稳定性。总体而言，该方法为无人驾驶场景下的快速地图更新提供技术支持，从而显著提升自动驾驶地图生成的效率，具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

在国内，自 2013 年起，中国高精度地图行业逐步建立了生产线。目前已有三家主要厂商完成了约 30 万公里高速公路的 L3 级采集，并进入了场景验证与商业化阶段。预计在 2020 年，这些厂商将完成城市道路的采集工作。百度依托 Apollo 自动驾驶战略，在高精地图技术领域布局较早，主要聚焦全国 30 万公里的高速公路场景。凭借强大的 AI 能力，百度实现了高精地图生产全环节的高度自动化。自 2013 年以来，积累了 3200 余万公里的测试里程和 4000 余件专利。

四维图新通过自主设计的高精度地图采集车和编辑平台，目前可生产出绝对精度 20cm 的地图数据，整体目前已经处于量产阶段。Momenta 高精度地图采用基于视觉感知和众包部署的建图与更新方案，通过与车厂或出行服务公司合作，获取众包数据用于高精度地图制作与更新。

在国外，Waymo 最早于 2009 年启动自动驾驶项目并开发高精地图技术，结合激光雷达、摄像头和雷达生成厘米级精度地图。其地图覆盖美国多个城市，并通过动态更新支持自动驾驶服务。Waymo 的高精地图产品广泛应用于 Waymo One 和物流配送领域。2014 年，荷兰 TomTom 推出 RoadDNA 技术。该技术通过将 3D 地图数据压缩为 2D 视图，显著减少了数据量，同时保留关键的道路信息。借助相关系数计算，RoadDNA 可快速定位车辆位置，极大提升了自动驾驶车辆处理道路信息的速度和精度。2016 年，美国 Civil Maps 推出了 Atlas Dev Kit 和 Edge Mapping™ 技术。这项技术结合传感器套件和人工智能算法，实现了高精度地图的快速生成。Edge Mapping™ 技术通过去除冗余数据，以小数据量实现众包更新，为经济高效的自动驾驶定位和导航提供了解决方案。

2 理论基础

2.1 LIO-SAM

LIO-SAM 是一种基于因子图优化的激光雷达与惯性导航融合算法框架。该框架专注于实时姿态估计与高精度三维点云建图，其核心在于通过紧耦合方式融合激光

雷达数据和惯性测量单元（IMU）数据，同时引入 GPS 等全局约束，进一步提升定位与建图的精度。系统结构主要分为前端和后端两个部分，前端主要负责对激光雷达点云和惯性测量单元（IMU）数据进行时间同步与预处理，通过提取特征点和 IMU 预积分计算初步位姿估计，以点到平面 ICP 算法获得高质量的初始值。后端则基于因子图优化。LIO-SAM 的后端优化采用因子图优化，融合激光里程计因子、IMU 预积分因子、GPS 因子和回环因子，通过非线性优化方法（Levenberg-Marquardt）生成全局一致的轨迹，并在优化过程中动态修正局部误差与累计漂移，从而提升定位与建图的精度与一致性。

2.2 B 样条插值

B 样条插值（B-Spline Interpolation）是一种基于 B 样条函数的平滑插值方法，广泛应用于计算机图形学、路径规划和数据拟合等领域。1971 年由法国雷诺汽车公司 Bezier 提出，该技术使得计算机进行曲线或曲面设计真正得以使用。B 样条插值通过一组基函数实现，这些基函数由阶数决定，能够灵活调节曲线的平滑度和复杂性。曲线的位置由一个参数化变量决定，该变量在特定范围内变化，用于计算曲线上各点的坐标。因此，通过选择基函数和控制点，B 样条插值可以生成平滑的 B 样条曲线。在数学定义上，B 样条曲线是由 $P_0, P_1, \dots, P_n (n > 3)$ 共 $n + 1$ 个控制点以及 1 组非递减的连续变化的矢量节点 u_i 定义的 k 阶样条曲线。通过这些控制点和节点的组合，每个区间内具有局部平滑性，能够有效避免整体性误差的扩展。

2.3 滑动窗口法

滑动窗口法是 SLAM 中广泛应用的一种关键优化策略，其核心在于将优化范围限定于当前窗口内的局部数据（如关键帧或传感器读数），从而显著降低计算复杂度并提升系统的实时性能。该方法通过在窗口内进行非线性优化，精准调整位姿和地图信息，同时对窗口外的数据进行边缘化处理，有效减少存储需求和计算负担。

给定点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ，两点之间的距离 d 可以通过欧几里得距离公式计算：

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

给定三点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 。定义向量 $\vec{v}_1 = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1)$ ， $\vec{v}_2 = (x_3 - x_2, y_3 - y_2, z_3 - z_2)$ 。两向量之间的夹角 θ 由以下公式给

出：

$$\cos \theta = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| \cdot |\vec{v}_2|} \quad (2)$$

滑动窗口分段的判定：

每个窗口内计算出平均夹角 $\bar{\theta}$ 和平均距离 \bar{d} ：

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} \theta_i}{n-2} \quad (3)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} d_i}{n-2} \quad (4)$$

其中：

θ_i 是窗口内第 i 个点的夹角。

d_i 是窗口内第 i 个点到下一点的距离。

n 是滑动窗口的点数。

3 SLAM 轨迹的拟合与优化

3.1 SLAM 轨迹的拟合

3.1.1 生成节点向量

根据控制点数量 n 和样条阶数 k ，构建节点向量，这是定义 B 样条曲线的关键步骤之一。节点向量长度为 $n + k + 2$ ，由起始部分、结束部分和中间均匀分布的值组成。起始部分由 $k + 1$ 个零值构成，表示曲线在起点的重叠。结束部分由 $k + 1$ 个 $n - k + 1$ 值构成，表示曲线在终点的重叠。中间部分节点值依次递增，表示均匀分布。

3.1.2 计算基函数值

基函数 $N_i, k(u)$ 是 B 样条的核心，计算基函数 $N_i, k(u)$ 的值。递归公式如下：

$$N_i, k(u) = \alpha N_{i-1}, k-1(u) + \beta N_{i+1}, k-1(u) \quad (5)$$

其中， α 和 β 为权重因子，定义为：

$$\alpha = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} \quad (6), \quad \beta = \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} \quad (7)$$

3.1.3 生成曲线点

遍历参数 u ，计算对应的曲线点，最终形成光滑的 B 样条曲线。给定控制点 P_0, P_1, \dots, P_n ，B 样条曲线可表示为：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_i, k(u) \cdot P_i \quad (8)$$

其中：

$N_i, k(u)$ ：第 i 个控制点的 k 次基函数。

P_i ：第 i 个控制点坐标。

u ：曲线的参数， $u \in [u_k, u_{k-1}]$ 。

k ：基函数的阶数（插值为 $(k - 1)$ 次多项式）。

通过对参数 u 的等间隔取值，可得到完整的曲线点集，从而生成平滑的曲线。

3.2 转弯处提取

在滑动窗口法中，窗口被定义为包含一定数量连续点的区间，窗口大小由预设的参数确定。对于每个滑动窗口，计算两条向量之间的夹角，判断该段是弧段还是直线段。遍历点云数据，逐步计算每个窗口内的向量夹角，以此判断轨迹点的性质。通过计算得到的夹角 θ ，引入角度阈值 α 来判断当前路径段是弧段还是直线段，若夹角大于角度阈值，即 $\theta \geq \alpha$ ，则认为当前路径段是弧段。若夹角小于角度阈值，即 $\theta < \alpha$ ，则认为当前路径段是直线。

4 高精地图的生成

4.1 OpenDRIVE

OpenDRIVE 是由德国自动化及测量系统标准协会制定并推广的智能驾驶场景模拟仿真测试标准之一，用于描述道路网络的几何形状、车道、交通标志及其他道路特征。目前，OpenDRIVE 是自动驾驶仿真领域最常用的路网编辑格式之一，被广泛应用于自动驾驶功能开发与测试、交通仿真等领域，它提供了一个通用格式，使得不同仿真平台和自动驾驶系统能够共享道路数据，促进了自动驾驶技术的研发、测试和验证。OpenDRIVE 文件采用 XML 格式存储数据，其包含道路的纵向和横向几何信息，能够精确地描述道路的结构和特性，以帮助模拟车辆在不同道路条件下的行为，如车道宽度、道路曲线、交叉口、标线及交通标志等。

4.2 实验数据集

实验使用 KITTI 数据集。KITTI 数据集是由德国卡尔斯鲁厄理工学院和丰田美国技术研究院联合创办的，可用于多种自动驾驶场景下的视觉算法的评测，如立体图像评测、光流、深度估计、二维/三维目标检测、目标追踪等，是目前使用最广泛的一个公开数据集。该数据集包含大量真实驾驶场景的数据，涵盖了图像、激光雷达（LiDAR）、GPS、IMU 等多种传感器数据，广泛用于评估自动驾驶算法。该数据集是汽车在具有动态对象和植被的各种道路环境中驾驶期间捕获的，例如高速公路、乡村道路和城市区域。实验中，生成的道路结构被定义为双向单车道，并带有行人肩道，这种结构常见于城市道路，并与 KITTI 07 数据集中的场景相符。

4.3 结果输出

在 OpenDRIVE 中，道路的几何形状通过参考线（Reference Line）定义，该参考线由一系列几何元素组成，主要包括直线（Line）、圆弧（Arc）和螺旋线（Spiral）。这些元素用于描述道路的形状及其过渡关系，并在 OpenDRIVE 文件的<geometry>标签中表示。每个几何段都有明确的起始位置和参数定义。

修正后的 SLAM 轨迹可用作 OpenDRIVE 的参考线（Reference Line）。在参考线的几何定义中，直线路段使用 Line 元素表示，以准确反映轨迹的直线部分；弯道部分采用 Arc 和 Spiral 元素的组合，其中 Arc 用于表示具有固定曲率的弯道，Spiral 则用于平滑连接直线与弯道，或连接两段不同曲率的圆弧。通过这种方法，精确地重建修正后的轨迹，生成的 OpenDRIVE 格式地图如下图所示：

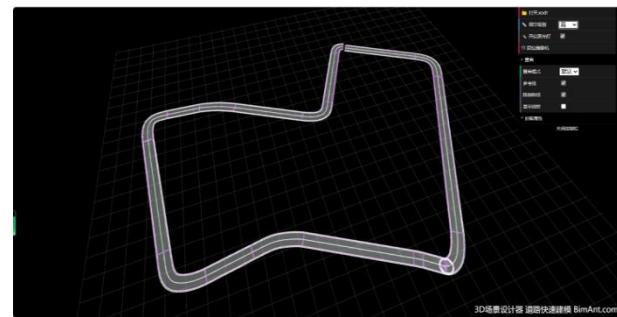


图 1 生成 OpenDRIVE 格式地图

4.4 精度验证与结果分析

在本实验中，将生成的 OpenDRIVE 车道中心线作为参考线与 GPS 真值进行对比，评估其精度。通过计算两者之间位置误差，分析车道参考线与实际道路的匹配程度。全局位置误差如图所示：

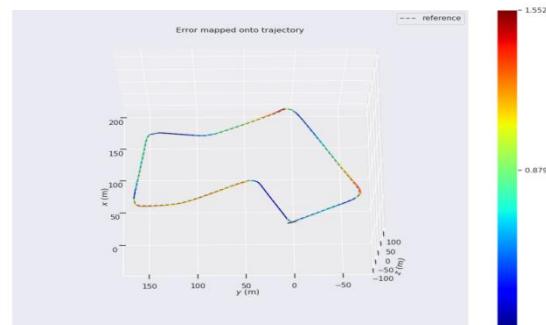


图 2 生成 OpenDRIVE 地图参考线与 GPS 的对比

图中，虚线代表 GPS 轨迹，作为参考基准，彩色实线则表示生成的 OpenDRIVE 地图参考中心线。从误差分析来看，最低误差为 0.205m，最高误差为 1.552m。整

体而言，转弯处的误差较大，而在直线路段，误差相对较小。综合来看，生成的高精度地图能够达到米级精度，部分区域已经达到分米级精度，该精度基本满足园区低速无人车自动驾驶的需求。

参考文献

- [1] 赵明珠. 车载导航到自动驾驶电子地图发展综述 [J]. 测绘通报, 2023, (06): 6-10+92.
- [2] 黄华东, 李冉, 马宏阳, 等. 基于车载移动测量系统的高精地图制作 [J]. 资源导刊, 2024, (02): 26-30+34.
- [3] 任好玲, 吴江东, 林添良, 等. 基于多传感器紧耦合的工程机械定位与建图系统 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 323-333.
- [4] 李赛赛. 我国高精地图技术创新的路径及演化分析 [D]. 石家庄铁道大学, 2023.
- [5] 李庆建. 自动驾驶地图发展路线探析 [J]. 智能网联汽车, 2020, (04): 86-93.
- [6] 梁宗正, 童杨. 高精度地图国内外发展现状及对策 [J]. 科技中国, 2021, (01): 13-16.
- [7] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究 [D]. 南京航空航天大学, 2011.
- 作者简介：孙弘选（1998.07-），男，汉，辽宁大连人，在读硕士研究生，研究方向：高精地图生成、激光雷达SLAM、点云语义分割，单位：哈尔滨师范大学。