****

**硕士学位论文**

**无人车激光雷达/惯导组合定位系统研究**

姓 名： 康宇宸

学 号： 1731593

所在院系： 汽车学院

学科门类： 工程

学科专业： 车辆工程

指导教师： 熊璐 教授

二〇一九年三月

***同等学力硕士博士（打印时删除）***

****

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Automotive Engineering

**Research on Lidar/Inertial Combinatorial Positioning System for Autonomous Vehicle**

Candidate: Kang Yuchen

Student Number: 1731593

School: School of Automotive Engineering

Discipline: Engineering

Major: Automotive Engineering

Supervisor: Xiong Lu

March, 2019

|  |
| --- |
| **无人车激光雷达/惯导组合定位系统研究**  **康宇宸**  **同**  **济**  **大**  **学** |

**学位论文版权使用授权书**

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

**同济大学学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

**摘要**

**关键词**：动力学控制，道路阻力，侧偏刚度，加速度控制，条件积分方法，参数估计

**ABSTRACT**

**Key Words:** dynamic control, road resistance, cornering stiffness, acceleration control, conditional integral method, parameter estimation

目录

[第1章 绪论 1](#_Toc534453487)

[1.1 本文研究背景及意义 1](#_Toc534453488)

[1.2 国内外研究现状与分析 1](#_Toc534453489)

[1. 激光SLAM关键技术 1](#_Toc534453490)

[2. 融合定位方法 1](#_Toc534453491)

[1.3 本文技术路线与主要工作 1](#_Toc534453492)

[第2章 基于惯导的位姿推算与惯导预积分 3](#_Toc534453493)

[2.1 基于惯导的位姿推算 3](#_Toc534453494)

[2.1.1 坐标系与位姿变换(三维空间刚体运动) 3](#_Toc534453495)

[2.2 惯导预积分（离散化处理） 3](#_Toc534453496)

[2.3 误差状态估计 3](#_Toc534453497)

[2.3.1 状态方程 观测方程推导（协方差 雅各比） 3](#_Toc534453498)

[第3章 激光里程计 4](#_Toc534453499)

[3.1 激光雷达传感器 4](#_Toc534453500)

[3.1.1 传感器技术参数 4](#_Toc534453501)

[3.1.1 激光雷达坐标系与传感器模型 6](#_Toc534453502)

[3.2 激光里程计 8](#_Toc534453503)

[3.2 点云预处理 9](#_Toc534453504)

[3.2.1 点云预处理模块算法流程 10](#_Toc534453505)

[3.2.2 点云聚类 10](#_Toc534453506)

[3.3 激光里程计 11](#_Toc534453507)

[3.4 回环检测与位姿图优化 11](#_Toc534453508)

[3.2.2 点云预处理 11](#_Toc534453509)

[聚类及特征点提取 11](#_Toc534453510)

[3.3 激光里程计 11](#_Toc534453511)

[雷达扫描误差纠正 12](#_Toc534453512)

[3.4 回环检测 12](#_Toc534453513)

[帧间匹配与位姿估计 12](#_Toc534453514)

[3.5 同步建图与全局位姿估计 12](#_Toc534453515)

[3.6 回环检测与位姿图优化 12](#_Toc534453516)

[基于三维点云扫描匹配的位姿估计 12](#_Toc534453517)

[第4章 激光雷达/惯导紧耦合定位系统 13](#_Toc534453518)

[4.1 系统框架 13](#_Toc534453519)

[4.2 系统功能模块（时间同步 滑动窗口 初始化） 13](#_Toc534453520)

[4.3 激光残差项 惯导残差项 13](#_Toc534453521)

[4.4 紧耦合系统构建 13](#_Toc534453522)

[第5章 实车实验 14](#_Toc534453523)

[5.1 平台 ROS can 14](#_Toc534453524)

[传感器模型 坐标系定义 14](#_Toc534453525)

[精度 实时性 14](#_Toc534453526)

[第6章 总结与展望 15](#_Toc534453527)

[致谢 16](#_Toc534453528)

[**参考文献** 17](#_Toc534453529)

[**个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果** 18](#_Toc534453530)

[第1章 绪论 1](#_Toc534453531)

[1.1 本文研究背景及意义 1](#_Toc534453532)

[1.2 国内外研究现状与分析 1](#_Toc534453533)

[1. 激光SLAM关键技术 1](#_Toc534453534)

[2. 融合定位方法 1](#_Toc534453535)

[1.3 本文技术路线与主要工作 1](#_Toc534453536)

[第2章 基于惯导的位姿推算与惯导预积分 3](#_Toc534453537)

[2.1 基于惯导的位姿推算 3](#_Toc534453538)

[2.1.1 坐标系与位姿变换(三维空间刚体运动) 3](#_Toc534453539)

[2.2 惯导预积分（离散化处理） 3](#_Toc534453540)

[2.3 误差状态估计 3](#_Toc534453541)

[2.3.1 状态方程 观测方程推导（协方差 雅各比） 3](#_Toc534453542)

[第3章 激光里程计 4](#_Toc534453543)

[3.1 激光雷达传感器 4](#_Toc534453544)

[3.1.1 传感器技术参数 4](#_Toc534453545)

[3.1.1 激光雷达坐标系与传感器模型 6](#_Toc534453546)

[3.2 激光里程计 8](#_Toc534453547)

[3.2 点云预处理 9](#_Toc534453548)

[3.2.1 点云预处理模块算法流程 10](#_Toc534453549)

[3.2.2 点云聚类 10](#_Toc534453550)

[3.3 激光里程计 11](#_Toc534453551)

[3.4 回环检测与位姿图优化 11](#_Toc534453552)

[3.2.2 点云预处理 11](#_Toc534453553)

[聚类及特征点提取 11](#_Toc534453554)

[3.3 激光里程计 11](#_Toc534453555)

[雷达扫描误差纠正 12](#_Toc534453556)

[3.4 回环检测 12](#_Toc534453557)

[帧间匹配与位姿估计 12](#_Toc534453558)

[3.5 同步建图与全局位姿估计 12](#_Toc534453559)

[3.6 回环检测与位姿图优化 12](#_Toc534453560)

[基于三维点云扫描匹配的位姿估计 12](#_Toc534453561)

[第4章 激光雷达/惯导紧耦合定位系统 13](#_Toc534453562)

[4.1 系统框架 13](#_Toc534453563)

[4.2 系统功能模块（时间同步 滑动窗口 初始化） 13](#_Toc534453564)

[4.3 激光残差项 惯导残差项 13](#_Toc534453565)

[4.4 紧耦合系统构建 13](#_Toc534453566)

[第5章 实车实验 14](#_Toc534453567)

[5.1 平台 ROS can 14](#_Toc534453568)

[传感器模型 坐标系定义 14](#_Toc534453569)

[精度 实时性 14](#_Toc534453570)

[第6章 总结与展望 15](#_Toc534453571)

[致谢 16](#_Toc534453572)

[**参考文献** 17](#_Toc534453573)

[**个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果** 18](#_Toc534453574)

第1章 绪论

1.1 本文研究背景及意义

1.2 国内外研究现状与分析

**1. 激光SLAM关键技术**

**2. 融合定位方法**

1.3 本文技术路线与主要工作



第2章 基于惯导的位姿推算与惯导预积分

2.1 基于惯导的位姿推算

2.1.1 坐标系与位姿变换(三维空间刚体运动)

2.2 惯导预积分（离散化处理）

2.3 误差状态估计

2.3.1 状态方程 观测方程推导（协方差 雅各比）

第3章 激光里程计

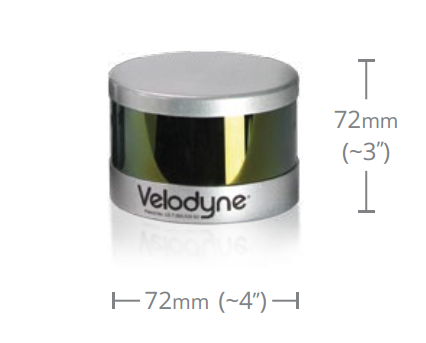
当车辆在室外道路行驶时，目前主要通过GPS结合惯导的方式进行定位。该方法依赖于GPS信号强度。在树木茂盛、高楼遮挡，隧道、高架等工况下，GPS信号不稳定，惯性导航系统又会随时间增长产生较大的漂移，车辆无法精确定位。而在室内和地下环境，由于GPS信号的缺失，传统定位方式无法发挥作用，而UWB等定位方法又有成本较高、布置复杂等缺点。在此背景下我们利用SLAM方法解决问题。SLAM即同步定位与建图，是基于相机、激光雷达等传感器，对环境的几何或语义特征进行提取，通过帧间数据关联与匹配，实现车辆的实时精确定位与同步建图功能，具有成本低、精度高等优点。由于激光点云信息的丰富性与稳定性，本文使用激光雷达为传感器，以现有主流激光SLAM方案为基础，通过对环境中几何特征的提取与匹配，实现车辆的相对定位。同时加入对环境嘈杂特征信息的识别与筛除，提高系统定位精度。此外，本文引入回环检测模块，筛选关键帧构建位姿图，在检测到回环时进行局部图优化，消除累积误差，提升定位效果。

3.1 激光雷达传感器

激光雷达是以发射激光束，对目标的位置、速度等特征进行探测的雷达系统。其工作原理是向目标发射激光脉冲，通过测量反射光的运行时间，确定目标的方位、速度等信息。激光雷达根据内部激光发射原理，可分为机械扫描式激光雷达及固态激光雷达。机械式激光雷达，根据扫描线的数目可分为1、4、8、16、32、64、128线激光雷达。激光线沿竖直方向按不同角度射出，根据线束多少及发射器旋转频率有不同的扫描精度，在水平扫描的过程中，可实现对周围环境的三维探测。

3.1.1 传感器技术参数

本文采用Velodyne 公司的16线激光雷达VLP-16。其探测距离约100 m，每秒可获取约30000个点。水平视角360°，垂直视角30°。其具体硬件参数如下表：



VLP-16 技术参数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 传感器 | 激光线数 | 16线 |
| 测量范围 | 100 m |
| 测距精度 | ±3 cm |
| 垂直视角 | 30°（﹢15°到﹣15°） |
| 垂直角分辨率 | 2° |
| 水平视角 | 360° |
| 水平角分辨率 | 0.1° 0.4° |
| 旋转频率 | 5 Hz - 20 Hz |
| 激光 | 激光安全等级 | 人眼安全 1级 |
| 波长 | 903 nm |
| 机械特性 | 功率 | 8W |
| 工作电压 | 9-32V |
| 重量 | 830g |
| 尺寸 | 103mm \* 72mm |
| 防护等级 | IP67 |
| 工作温度 | -10℃ - 60℃ |
| 储存温度 | -40℃ - 105℃ |
| 输出 | 点云 | 每秒300000个测量点 |
| 数据值 | 距离值、物体反射率、旋转角度、同步时间 |

本文采用的VLP-16的16个激光器定义为16个通道，覆盖垂直方向的﹣15°~﹢15°的视角，垂向分辨率为2°，其垂直角度对应关系如下表：

VLP-16 激光通道与垂向角度对应表

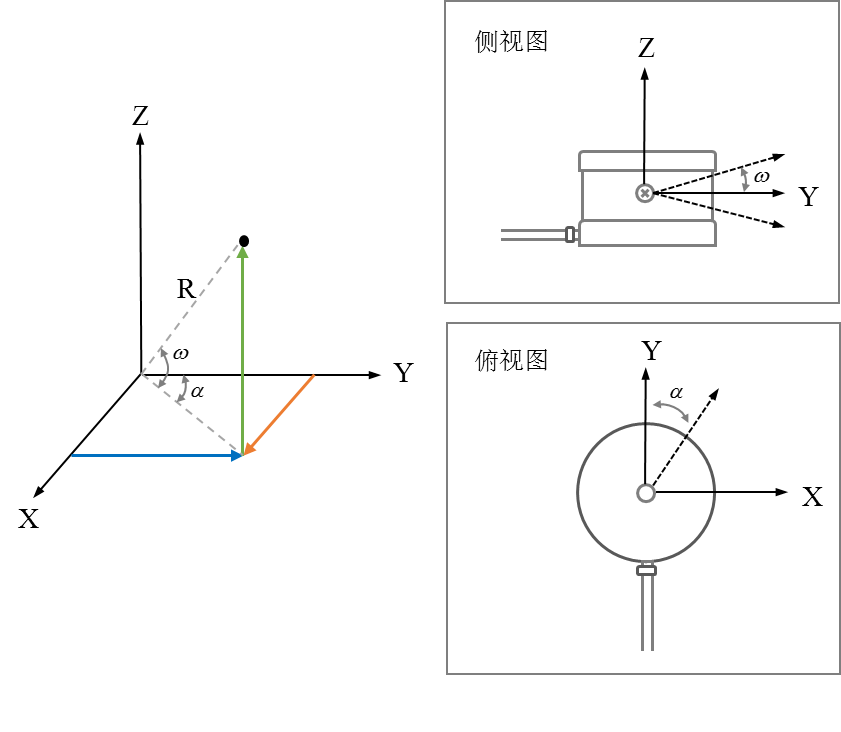
|  |  |
| --- | --- |
| 通道序号 | 垂向角度 |
| 0 | ﹣15° |
| 1 | 1° |
| 2 | ﹣13° |
| 3 | 3° |
| 4 | ﹣11° |
| 5 | 5° |
| 6 | ﹣9° |
| 7 | 7° |
| 8 | ﹣7° |
| 9 | 9° |
| 10 | ﹣5° |
| 11 | 11° |
| 12 | ﹣3° |
| 13 | 13° |
| 14 | ﹣1° |
| 15 | 15° |

3.1.1 激光雷达坐标系与传感器模型

激光雷达直接获取的点云信息在三维极坐标下呈现，包含目标距离、水平、垂直方位角以及目标反射率信息。为了更方便反应周围环境三维信息，我们将其变换到笛卡尔坐标下。



其中，为极坐标下目标距离，为为激光扫描线垂直旋转角度，为激光扫描线水平旋转角度，x、y、z为极坐标投影到笛卡尔坐标系下的坐标。坐标系方向定义见下图。



激光雷达坐标映射示意图

3.2 激光里程计系统框架

本文采用的激光SLAM系统框架如下图所示，主要分为三大模块，分别为点云预处理、激光里程计、回环检测。

激光雷达获取环境点云信息后，首先进行点云预处理。通过将点云投影到二维距离图的方式，对点云进行聚类处理，区分路面特征，并筛除较小特征点。之后，对聚类筛选后的点云进行特征点的提取，用以后续点云的匹配与位姿计算。

在激光里程计模块，本文对车辆运行过程中激光雷达运动误差进行估计并对点云信息进行纠正。首先进行帧间特征点的匹配与位姿的粗估计，获取车辆粗位姿。之后，根据车辆粗位姿，确定车辆所在大致区域，并于历史地图中进行特征点匹配，构建代价函数，通过迭代优化的方式估计车辆精确位姿，并更新历史特征地图，用于后续匹配。

最后，本文构建回环检测模块，存储历史关键帧并按距离维护一个关键帧窗口，以关键帧位姿为节点，关键帧之间位姿约束为边构建位姿图。在检测到回环时，利用因子图优化的方法，对窗口内关键帧进行优化，消除累积误差，提升定位精度。



3.2 点云预处理

点云预处理模块，是后续扫描、匹配、位姿估计模块的基础。该部分算法目的是对原始点云中的几何特征进行筛选，并尽可能剔除掉不稳定特征，为后续激光里程计模块提供精确、稳定、鲁棒的特征点云。

3.2.1 点云预处理模块算法流程

在实际的定位、建图的过程中，无论是基于特征、还是基于语义的定位建图方法，都需要对环境的嘈杂状态进行滤波，以获取稳定的、可重复观测的、基本静止的特征或语义信息作为匹配的基础，来进行后续的位姿估计。环境信息的处理对定位效果有着直接、根本的影响。点云预处理模块的目的就是筛选可靠的特征点以供后续匹配。

点云预处理模块分为点云聚类、特征提取两个子模块。在点云聚类模块，接收激光雷达原始点云输入，根据点所在扫描线、旋转角度等信息，将三维点云投影到二维平面，并保留距离属性。在二维点云平面上，利用相邻扫描线水平度信息，进行路面特征的识别与滤除，并将非路面特征进行点云聚类处理。聚类后的点云块输出至特征提取模块。在特征提取模块，首先进行点云的平滑度计算。对点云按平滑度计算结果排序，剔除不稳定的特征点，输出用于后续特征点云的匹配。



3.2.2 点云聚类

在实际问题中，环境中的一些微小障碍物，如草、树叶等物体，易被识别为特征而进行匹配。但此类障碍物状态并不稳定，往往同类特征聚集，风吹之后位置特征易改变。以该类特征为基础进行后续匹配定位往往难以获得较好效果，因此我们将其筛选剔除。此外，对于路面特征，主要与车辆垂向、侧倾、俯仰等相关自由度有关。我们对其单独提取以便后续操作。

点云聚类问题可以描述为：已知时刻获取的原始点云，根据点云所在方位、角度以及与周围点云的位置关系，进行路面特征的提取，并将非路面点云聚类为点云块。按点云块包含点云数目对其进行分类，并将聚类后的点云输出。

首先将三维点云投影为一张二维距离栅格图。原始点云的垂向分为16路扫描线，垂直分辨率为2°，水平分辨率为0.2°。根据点云的横纵向分辨率属性，可将其投影为16\*1800大小的二维栅格图，三维点云中的每个点根据其方位与二维栅格中的格子一一对应。格子同时携带投影点的距离属性。

利用投影好的二维距离栅格图，我们可以进行路面的识别与剔除。当激光扫描路面时，投射在路面的扫描线形状为连续的圆弧，且相邻线之间距离保持稳定。目前主流的路面提取方法为基于几何特征的滤波方法，包括栅格高差法、平面拟合法等，通过计算栅格内点高度差，与预设高差进行对比、分类，或通过计算点云法向量，与地面法向量进行对准，快速有效的对地面进行分割、滤除。本文采取的方法与其类似，并要额外考虑算法的效率与鲁棒性。因此另外考虑了随距离增加相邻扫描线间距离的增加，以及路面存在适当坡度的情况，以相邻线间路面水平度作为标准，将水平度小于阈值的点云分割为路面。



其中，为相邻线高差，为相邻线间水平投影距离。

路面点云识别后，对非路面点云的进行聚类，保留较大的点云块，筛除微小障碍物。点云聚类方法包括基于欧氏距离的分割聚类以及基于随机采样一致性算法的分割聚类。本文采取的算法主要基于欧式距离，考虑了点云远近稀疏性不同的特性，通过两相邻点之间距离参数的计算，将距离参数小于阈值的点聚为一类。根据聚类后的点云块包含点云数目，进行特征的分类。



其中，相邻点中较远点的距离值，为较近点的距离值，为水平角度分别率。若为垂向相邻点，此处为垂向角度分辨率。

3.2.3 特征提取

在点云聚类处理后，原始点云中的路面、较小、较大的点云特征块被筛出。在此基础上，我们提取点云中的几何特征，输出至后续的匹配模块。

在特征的选取方面目前有很多方法，主要可分为基于几何特征与基于语义特征的方法。几何特征包括平面、角点、直线、圆柱等，用以表示环境中的路面、路沿、树木等环境特征。语义特征的方法是通过对环境进行几何描述子的提取，通过多个描述子共同确定物体的类别，或通过深度学习的方法得到物体的语义特征，用于辅助后续匹配。本文采取基于几何特征的方法，对环境中最常见的棱角、平面特征进行提取。

对于点云平均分块。对各个子块中某个点，我们对其平滑度进行计算。通过选取其前后相邻点，计算相邻点与该点的欧氏距离，以其为参考参数，对该点的平滑度进行表示。



其中，为选取的当前点周围特征点个数，为当前点相对于雷达中心的距离，为周围点相对于雷达中心的距离。

通过这种方法，可比较高效的提取出角、面特征明显的点，但同时有些并不稳定的环境特征被当作特征点筛选出，如与扫描方向平行的面或线，以及由于物体相互遮挡而体现出的角、面特征。这类特征的共同的特质在于在较小的夹角区间内有较大的距离差值。通过对具备以上属性的特征点进行标记与剔除，减少无效特征点。

此外，为保证特征点分布的均匀，也为了提高后续特征匹配过程中的准确率，减少临近特征的误匹配，在已有特征的一定范围内不再筛选特征点，保证特征点的稳定性与分布的均匀性。

经过以上条件的限制，我们得到经过筛选的特征点。我们对特征点按平滑度排序。越小，表明该特征点所在区域越平顺，更趋向于平面特征，反之则倾向于棱角特征。我们把较大的点记作角特征点，较小的点记为面特征点。将特征点存储并发布给后续匹配模块。至此完成了点云预处理所有流程。

3.3 激光里程计

激光里程计模块在点云预处理的结果上，以筛选好的特征点为基础，通过对帧间或当前帧与特征地图间特征点的关联与匹配，构建最小二乘问题，对车辆的位姿进行估计，达到车辆定位的目的。

3.2.1 激光里程计模块算法流程



激光里程计按算法流程可分为两大模块。在点云预处理模块结束后，帧间匹配与位姿粗估计模块以筛选后的特征点为基础，对前后两帧的特征点进行关联、匹配。以匹配好的特征点为基础构建最小二乘问题，求解车辆帧间相对运动，并可估计车辆相对世界坐标粗位姿。在建图与位姿估计模块，以前面获取的粗位姿为基础，在历史特征地图中确定匹配区域，筛选环境关键帧，并与环境关键帧中的特征点进行关联与匹配，并一次为基础再进行最小二乘问题的求解，得到较精确的位姿，并以当前位姿为基础，将当前帧特征点存入特征地图。

3.2.2 帧间匹配与位姿粗估计

3.2.2 建图与位姿估计

3.4 回环检测与位姿图优化

3.2.2 点云预处理

聚类及特征点提取

3.3 激光里程计

雷达扫描误差纠正

3.4 回环检测

帧间匹配与位姿估计

3.5 同步建图与全局位姿估计

3.6 回环检测与位姿图优化

基于三维点云扫描匹配的位姿估计

3.1.1 激光雷达传感器模型

第4章 激光雷达/惯导紧耦合定位系统

4.1 系统框架

4.2 系统功能模块（时间同步 滑动窗口 初始化）

4.3 激光残差项 惯导残差项

4.4 紧耦合系统构建

第5章 实车实验

5.1 平台 ROS can

传感器模型 坐标系定义

精度 实时性

第6章 总结与展望

致谢

参考文**献**

1. 高锋. 汽车纵向运动多模型分层切换控制[D]. 清华大学.2006.
2. 刘强,陆化普,张永波. 我国道路交通事故特征分析与对策研究. 中国安全科学学报，2006，16（6）：123-128.

**个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果**

**个人简历：**

**已发表论文：**

Times New Roman体，四号，居中，单倍行距，段前0磅，段后0磅，选填Master、Doctor