****

**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](#_Toc534231454)

[1.1 本文研究背景及意义 1](#_Toc534231455)

[第2章 基于Carsim/Simulink联合的E50电动改装智能车仿真模型 2](#_Toc534231456)

[第3章 纵向动力学自适应控制算法 3](#_Toc534231457)

[第4章 横向动力学自适应控制算法 4](#_Toc534231458)

[第5章 动力学自适应控制算法仿真分析 5](#_Toc534231459)

[第6章 动力学自适应控制算法实车试验 6](#_Toc534231460)

[第7章 论文总结与展望 7](#_Toc534231461)

[7.1 论文总结 7](#_Toc534231462)

[致谢 8](#_Toc534231463)

[**参考文献** 9](#_Toc534231464)

[**个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果** 10](#_Toc534231465)

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

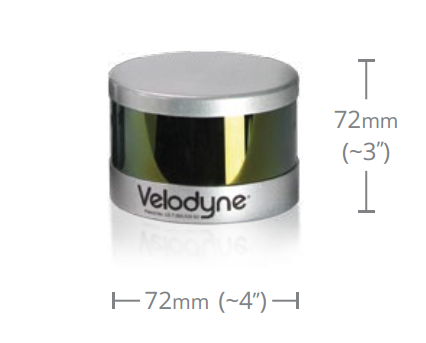
当车辆在室外道路行驶时，目前主要通过GPS结合惯导的方式进行定位。该方法依赖于GPS信号强度。在树木茂盛、高楼遮挡，隧道、高架等工况下，GPS信号不稳定，惯性导航系统又会随时间增长产生较大的漂移，车辆无法精确定位。而在室内和地下环境，由于GPS信号的缺失，传统定位方式无法发挥作用，而UWB等定位方法又有成本较高、布置复杂等缺点。在此背景下我们利用SLAM方法解决问题。SLAM即同步定位与建图，是基于相机、激光雷达等传感器，对环境的几何或语义特征进行提取，通过帧间数据关联与匹配，实现车辆的实时精确定位与同步建图功能，具有成本低、精度高等优点。由于激光点云信息的丰富性与稳定性，本文使用激光雷达为传感器，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：



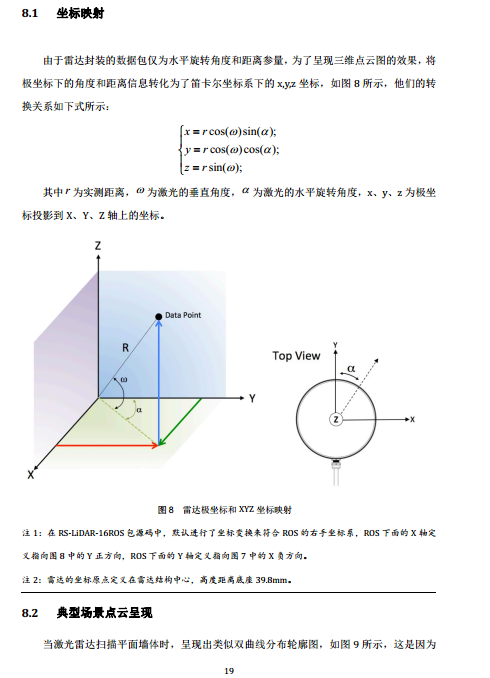
VLP-16 技术参数

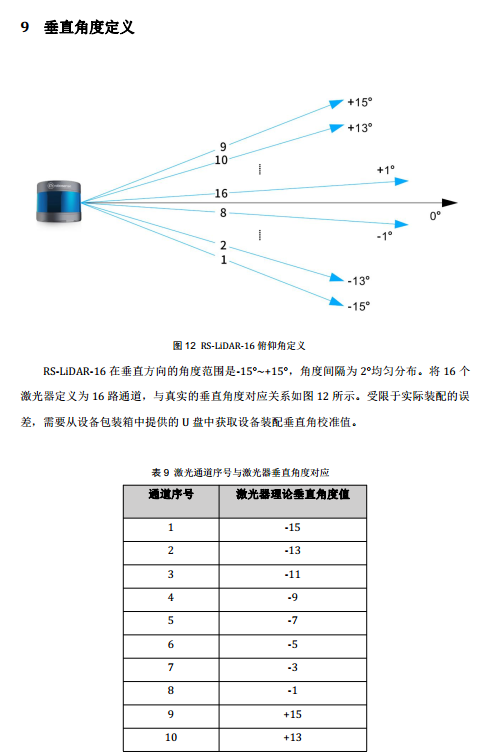
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 传感器 | 激光线数 | 16线 |
| 测量范围 | 100 m |
| 测距精度 | ±3 cm |
| 垂直视角 | 30°（﹢15°到﹣15°） |
| 垂直角分辨率 | 2° |
| 水平视角 | 360° |
| 水平角分辨率 | 0.1° 0.4° |
| 旋转频率 | 5 Hz - 20 Hz |
| 激光 | 激光安全等级 | 人眼安全 1级 |
| 波长 | 903 nm |
| 机械特性 | 功率 | 8W |
| 工作电压 | 9-32V |
| 重量 | 830g |
| 尺寸 | 103mm \* 72mm |
| 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 |

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。







3.2 激光里程计

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

点云预处理模块分为点云聚类、特征提取两个子模块。在点云剧烈模块，接收激光雷达原始点云输入后，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，保留距离信息。在二维点云平面上，利用相邻扫描线高差信息，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，输出用于后续匹配特征点云。

3.2.2 点云聚类



3.3 激光里程计

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