

摘要

目前国内外在室内服务型机器人方面的研究与探索热潮涌动、方兴未艾，多种类型的室内服务型机器人如扫地机器人、迎宾机器人等都得到了一定程度的应用。但是这些机器人在未知环境中往往不能进行自主定位和导航，本质上是一些依靠外界操控进行辅助定位的半自主型机器人。服务型机器人在未知环境中的实时定位与建图（SLAM）是其能在这种环境中准确且高效完成指定任务的基础与保障。针对这一普遍性问题，本文旨在设计一种能够在室内自主定位的移动机器人，该机器人通过自身配备的相关传感器，可在完全未知环境的情况下精确绘制出周围环境的地图，并在此基础上实现自身在地图中的准确定位。

首先，本文详细阐述了移动机器人的整体设计方案，采用差动式驱动的轮式运动底盘作为实验平台，并深入分析了粒子滤波算法在二维定位中的重要作用以及它的相关原理。然后系统论述了整个硬件平台的构建以及相关器件的选型，在此基础之上详尽介绍了整个机器人的软件设计，软件设计作为整个实验平台的重要部分，通过开源机器人操作系统（ROS）来实现整个移动机器人的定位与导航框架。此后，对整个实验平台进行了软件仿真实验，验证了算法的可行性与适用性，并对机器人在实际环境中的相关性能进行了测试，验证了整个移动机器人SLAM软硬件系统的可行性与实用性。

本文研究的可自动完成室内定位与建图的移动机器人具有以下技术特点：

- ①采用差动式驱动的轮式运动底盘作为实验平台，可通过蓝牙控制平台全方位运动且实时获取精准的里程计数据；
- ②利用粒子滤波融合里程计和激光雷达的数据实现了移动机器人在位置环境中的准确定位，在此基础上对环境进行二维地图的构建；
- ③提供了友好的交互界面，用户可以通过无线以太网在手机客户端或电脑端实时监测二维地图的构建。

与目前大多数在研或在用的移动机器人相比，本文研究与设计的移动机器人具备自主定位功能，同时能对未知环境进行地图的实时构建，可为机器人自主导航奠定基础和提供支持，其技术成熟和功能拓展后可应用到室内服务型机器人的定位与导航系统，使得室内机器人更加智能化、自主化与实用化。

关键词：移动机器人；SLAM；机器人操作系统；粒子滤波算法

Abstract

At home and abroad in the indoor service robots research and exploration boom surging, various types of indoor service robots such as sweeping robots, welcome robot received a degree of application. But the robot in unknown environment often cannot undertake independent positioning and navigation, essentially, some rely on external control for auxiliary positioning half an autonomous robot. Service robots in unknown environments, simultaneous localization and mapping (SLAM) in this environment is that it can accurately and efficiently complete the assigned task of the foundation and protection. For this universal problem, this paper aims to design a way to locate indoors autonomous mobile robot, the robot is equipped by the relevant sensor itself can be in a completely unknown environment situation accurately draw the map of the surrounding environment, and in this to achieve accurate positioning itself on the map basis.

First, the paper describes the overall design of the mobile robot using differential drive wheeled sports chassis as an experimental platform, and analyzes the important role of particle filter algorithm in 2D positioning and its associated principles. And then discusses the construction of the whole hardware platform and related system components selection, on the basis of the whole robot is presented in the paper detailed software design, software design, as an important part of the whole experimental platform, through open source robot operating system (ROS) to implement the whole framework of mobile robot localization and navigation. Thereafter, the entire test platform for software simulation, the feasibility and applicability of the algorithm, and the robot in a real environment-related performance tests to verify the entire hardware and software system for mobile robot SLAM feasibility and practical sex.

It automates indoor localization and mapping for mobile robot of this study has the following technical characteristics:

- (1) Using differential drive wheeled sports chassis as an experimental platform, full range of motion control platform via Bluetooth and get real-time accurate odometer data;
- (2) Using particle filter to fusion Odometer data and laser radar data to achieve the

accurate positioning of mobile robot in location environment, based on the two-dimensional map construction on the environment;

(3) Provides a friendly interface, users can wireless Ethernet client on the phone or computer terminal real-time monitoring to build two-dimensional map.

Compared with the most current research or using a mobile robot, mobile robot has studied autonomous positioning and design capabilities, while unknown environment in real time to build the map, you can lay the foundation and provide support for autonomous navigation, the expanded technology maturation and function can be applied to the indoor service robots positioning and navigation system, making the interior robotics more intelligent, autonomy and practical.

Keywords: Mobile robot; SLAM; Robot operating system; particle filter

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题概述.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究目的和意义.....	2
1.2 国内外移动机器人 SLAM 研究概述	3
1.2.1 国外研究现状.....	3
1.2.2 国内研究现状.....	5
1.3 本文研究的主要内容.....	7
第 2 章 室内移动机器人 SLAM 系统建模与定位研究	9
2.1 机器人操作系统（ROS）简介.....	9
2.1.1 ROS 主要特点.....	9
2.2 移动机器人系统建模.....	11
2.2.1 移动机器人运动学.....	11
2.2.2 移动机器人控制模式.....	13
2.3 粒子滤波在 SLAM 中的应用	13
2.3.1 贝叶斯滤波.....	14
2.3.2 蒙特卡洛采样.....	15
2.3.3 重要性采样.....	16
2.3.4 序贯重要性采样.....	18
2.3.5 重采样.....	19
第 3 章 室内移动机器人的硬件设计.....	21
3.1 室内移动机器人平台搭建.....	21
3.2 控制模块.....	23
3.2.1 决策控制模块.....	23
3.2.2 运动控制模块.....	25
3.3 运动驱动模块.....	27
3.4 传感器模块.....	29
3.4.1 磁式编码器.....	29

3.4.2 姿态传感器.....	30
3.4.3 激光雷达.....	31
3.5 通讯模块.....	33
3.5.1 蓝牙.....	33
3.5.2 无线网卡.....	34
第 4 章 室内移动机器人的软件设计.....	35
4.1 机器人的软件架构.....	35
4.2 下位机软件设计.....	36
4.2.1 移动机器人姿态获取.....	36
4.2.2 移动机器人位置获取.....	37
4.3 移动机器人在 ROS 中导航框架.....	39
4.3.1 定位与导航框架.....	39
4.3.2 移动机器人坐标系变换.....	40
4.3.3 激光雷达数据的读取.....	42
第 5 章 室内移动机器人 SLAM 综合实验	43
5.1 室内 SLAM 仿真	43
5.1.1 室内定位与建图的仿真.....	43
5.1.2 室内导航仿真.....	46
5.2 室内定位与建图实验.....	49
第 6 章 总结与展望.....	53
6.1 技术要点.....	53
6.2 工作总结.....	53
6.3 展望.....	54
致谢.....	56
参考文献.....	57

第 1 章 绪论

本章主要介绍了室内实时定位与建图（SLAM）移动机器人的研究背景，再引出室内 SLAM 机器人的研究目的和意义，之后详细阐述了 SLAM 的发展历史和发展现状，最后对本文的安排进行了说明。

1.1 课题概述

机器人是集控制理论、机械电子、计算机、材料仿生学等诸多学科于一体的产物，是反应当今世界科技水平的一种科学成果，机器人在生活、工业、农业以及军事中都有着重要的作用^[11]。目前世界上对各种机器人的研究也十分普遍，其中室内移动机器人的自主定位与导航是机器人研究中的一个重要内容，而室内移动机器人的自主定位则是研究导航的基础。

1.1.1 研究背景

随着科技的进步，机器人正逐步走向智能化。而室内服务机器人作为新兴发展起来的产业，从最早的扫地机器人开始，家庭陪伴机器人、送餐机器人等陆续进入人们生活的视线。目前这些室内服务型机器人基本不完全具备自主定位和导航的功能，很多是依靠外界的辅助来进行辅助定位，如有些机器人在室内依靠 WIFI 进行定位，但是 WIFI 定位精度相对较差；而有些则利用事先在室内地板上铺设好的地磁线作为定位基准，但是铺设成本高，需要耗费较大的人力和财力；还有利用信标定位，信标最早是指在航海或航空中利用无线电基站发出的无线电波实现定位的，在室内的信标定位则是实现在固定位置如天花板上安置一些具有明显特征且易于被识别的标志物，机器人通过三角定位的方法计算出实际位置，但是信标的安置和维护费用相对较为昂贵。在这一大背景之下研究室内移动机器人的定位技术是极为有意义的，作为能够自主移动的机器人，那么必然需要对室内环境进行定位和导航。假设用图 1-1 所示的金字塔来表示机器人技术，那么定位与导航作为最底层最基本的技术，正是构建一个智能化机器人系统的核心关键之处。

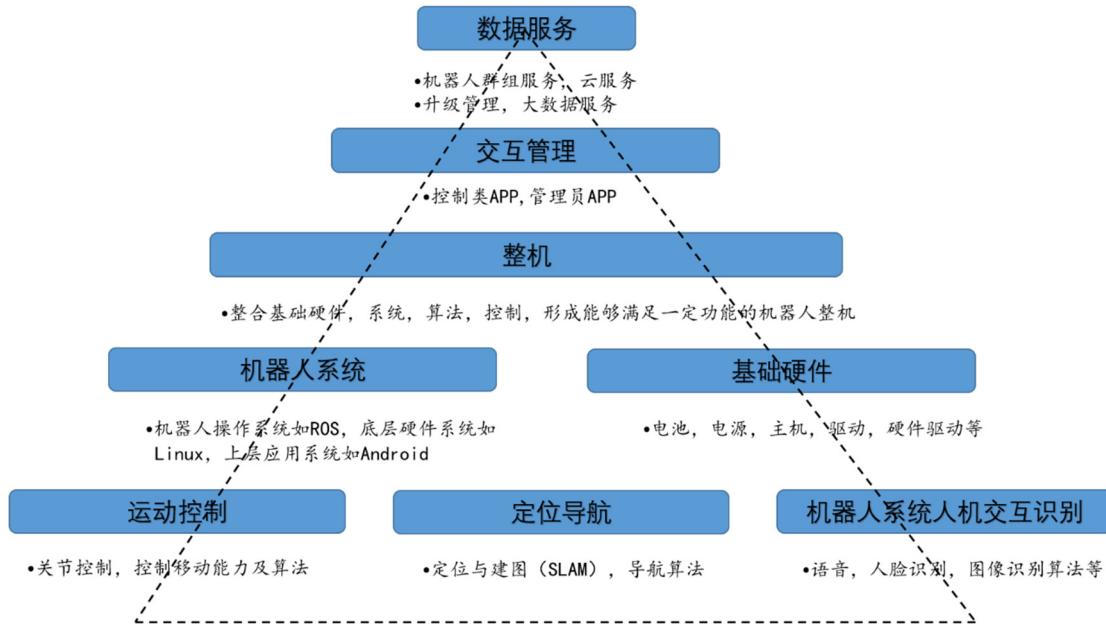


图 1-1 机器人技术示意图

移动机器人在未知环境中的如何实现定位与导航是机器人的核心课题之一，研究者们对这也进行了多年的研究。SLAM（Simultaneous Localization and Mapping，即时定位与地图构建），自 1985 年被提出以来，主要用于研究机器人移动的自主化和智能化。对于完全未知的室内环境，移动机器人可通过 SLAM 技术对室内未知环境进行地图的构建，相当于移动机器人知道自己在未知环境中所处的位置，这也是本文设计用于室内定位与建图的机器人的出发点。

1.1.2 研究目的和意义

智能化是机器从“机器”到“机器人”过渡的一个重要标志。目前室内移动机器人的智能化程度普遍堪忧，而机器人只要自主移动就需要在室内或者其他环境中进行定位与导航。本文基于这一出发点，旨在设计一款能够在室内自主定位的移动机器人，为移动机器人在自主导航和路径规划的功能上建立起平台基础。机器人在未知环境中，要实现自主化和智能化需要完成三个任务，第一个是定位，第二个是建图，第三个则是在此基础上的路径规划。对移动机器人的实时定位与建图的研究可以极大程度的提高机

器人自主化程度，使得机器人具备自己的大脑，对未知环境能够做出自己的判断，使得人机相处更为和谐并且能让机器人为人类提供更高效更精致的服务。

1.2 国内外移动机器人 SLAM 研究概述

SLAM 在 1985 年 IEEE ICRA 会议上提出，发展至今已有 30 年。当时的概率统计方法在机器人技术领域和人工智能领域应用刚刚兴起，研究者们希望采用估计的理论去解决机器人的定位与地图构建这一问题。也就是从这次会议开始，SLAM 问题便得到了推动性的发展。SLAM 在近 30 年中取得了丰硕的成果，其中包括理论的深化，以及各种 SLAM 算法如 Fast-SLAM, EKF-SLAM, PF-SLAM 算法的应用，同时在依托于 SLAM 的传感器技术也在不断发展。本文主要针对室内 SLAM 问题进行了深入的研究，下面将分别从国外和国内对 SLAM 的研究现状进行阐述。

1.2.1 国外研究现状

SLAM 最早就是由国外提出的，在国外的发展也相对较早，Hans P.Moravec 和 Alberto Elfes 教授 1985 年在《High Resolution Maps from Wide Angle Sonar》这篇论文中提到采用宽广角的声呐传感器获得高分辨率的地图，并且用实验平台进行了验证实验^[1]。



图 1-2 Neptune 机器人

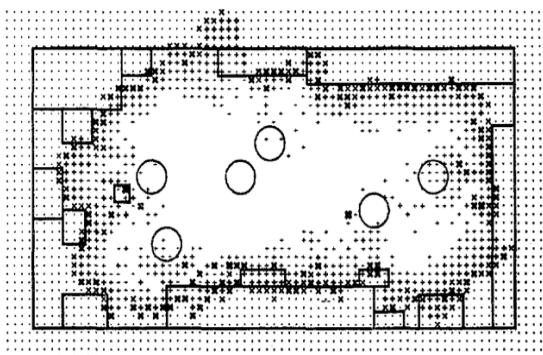


图 1-3 Neptune 机器人构建的二维地图

随着传感器的发展以及激光雷达和视觉传感器的应用，室内移动机器人的 SLAM 得到了极大的促进。而在室内机器人尤其体现在扫地机器人这

一点上，Neato 公司发布的扫地机器人就已经能够实现自主定位，它采用的是房间定位系统 RPS，利用的是激光传感器对室内进行描绘。



图 1-4 Neato 机器人



图 1-5 Neato 机器人定位示意图

而在最近几年则又新起了视觉定位的系统，以 iRobot 和 Dyson 公司为代表的视觉定位扫地机器人，通过室内环境特征点匹配的计算出目标位置坐标系和机器人坐标系的关系进而实现机器人定位^[12]。



图 1-6 iRobot 机器人



图 1-7 iRobt 机器人定位示意图

随着开源机器人操作系统（ROS）的兴起，在商业机器人之外的科研用途的机器人中就有一大批具有自主定位与建图功能的移动机器人，如 Turtlebot 和 Pi robot 就是很典型的例子。它们是基于 ROS 开发的室内移动机器人，利用微软的 Kinect 深度相机对环境进行感知和二维地图的构建，具有很好的拓展性，能够在定位的基础上进行二次开发，但是基于视觉定位的机器人在夜间工作效率将极大降低或不能进行工作，受外界影响较大。



图 1-8 Turtlebot 机器人



图 1-9 Pi robot 机器人

上面提到的 SLAM 问题都是基于室内移动机器人且绝大多数都是二维的 SLAM 问题，但是二维 SLAM 仅仅是基础，因为现实中都是三维的环境。SLAM 在三维定位与建图发展也异常迅猛，一个机器人最核心最根本的问题一共有四个：定位技术，跟踪技术，路径规划技术，控制技术，而这四个问题中的前三个都是 SLAM 要解决的问题，SLAM 扮演着最核心的功能。SLAM 在三维中的应用主要有增强现实（AR），目前基于 SLAM 技术开发的 AR 和 VR 代表产品有微软的 Hololens，谷歌的 Project Tango 等；在无人机领域三维 SLAM 更是研究的热门，大疆无人机公司的精灵 4 无人机就是典型的 SLAM 弱应用；SLAM 在无人车领域更是扮演着重要的角色，其核心就是对未知环境的感知并基于此作出路径规划。

1.2.2 国内研究现状

国内 SLAM 研究起步相对较晚，但是处于快速发展阶段，其中室内定位与导航机器人以及无人机，无人车领域都是当前研究热门领域，下面就对国内室内移动机器人的 SLAM 研究现状进行阐述。

在服务型机器人行业，如迎宾机器人和扫地机器人行业都有智能化的趋势。以国内科沃斯扫地机器人为代表，它作为智能扫地机器人能够对室内的二维地图进行构建，且做到了较高的性价比。再如海尔克路德机器人的“哇哦”机器人，作为家庭服务和室内迎宾双功能的机器人，它能对

室内的位置环境进行感知，具备一定的 SLAM 功能。



图 1-10 科沃斯机器人



图 1-11 “哇哦”机器人

国内在 SLAM 传感器尤其在激光雷达上进行了较为深度的研究，其中激光雷达作为 SLAM 的主要传感器，其缺点就是价格过于高，国内思岚科技公司（SLAMTEC）结合激光三角测距技术与高速视觉采集处理机构，大幅降低了激光雷达成本，其推出的 RPLIDAR 在两千元左右，相比专业级激光雷达如德国 SICK 激光雷达成本得到了极大的降低，基本能满足室内定位的精度。而近期该公司将要推出 RPLIDAR A2，这款激光雷达在 6 米测量半径内，可完成 360 度全方位扫描，采样次数为每秒 4000 次，扫描频率高达 10Hz 并可实现毫米级测量精度。

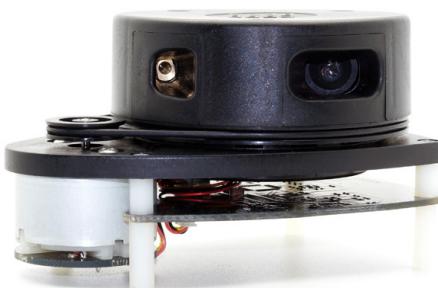


图 1-12 RPLIDAR 激光雷达



图 1-13 RPLIDAR A2

该公司自主研发的 SLAMWARE 内置了先进算法并包含硬件驱动接口，

可使得搭载此硬件的机器人在未知环境中实时定位，并构建最高达 2cm 分辨率的环境地图。



图 1-14 思岚公司 SLAMWARE 硬件驱动

在 SLAM 问题中激光雷达是最常用的硬件，但由于其较高的价格使得商业化一直较为困难。当然拥有了性价比较高的激光雷达并不代表着就能够打通室内定位与建图这一难题，因为真实环境是复杂，瞬息多变的，所以真正要做到实时定位与导航，还是需要靠强大的定位算法，弱硬件强算法将会是当前热门研究方向，也是未来趋势。

1.3 本文研究的主要内容

本文在大量阅读国内外参考文献和开源算法基础之上，针对室内移动机器人在未知环境下的实时定位与地图构建这一研究背景，对开源机器人操作系统（ROS）进行了深入的研究，同时对基于蒙特卡洛的粒子滤波算法在室内定位方面的应用展开了深入的研究。在 ROS 和 Gazebo 联合仿真的基础之上，搭建了室内移动机器人实验平台并基于这一实验平台对 SLAM 的实际应用问题开展细致的研究。

本文的主要研究内容和组织结构如下：

第 1 章为绪论部分。主要阐述了课题的研究背景和研究目的及意义，基于此描述了国内外室内移动机器人 SLAM 的研究现状和应用前景。

第 2 章为室内移动机器人 SLAM 系统建模与定位研究。主要对开源机器人操作系统（ROS）进行了简要介绍，然后对差动驱动移动机器人进行了系统建模，最后对粒子滤波算法在定位问题上的应用进行了详细的研究，为后文硬件平台的搭建提供数学基础和算法基础。

第 3 章在系统模型的基础之上搭建硬件实验平台。详细介绍了本文设计的移动机器人实验平台的各个组成部分以及硬件选型。

第 4 章对系统软件架构进行了细致介绍。细致阐述了软件设计思路，对 ROS 的导航框架进行了细致的研究并阐述了传感器如何接入 ROS 中。

第 5 章为整个平台的仿真和实验验证。在算法理论基础上在 ROS 中对移动机器人 SLAM 问题进行了仿真，并在仿真的基础之上对所搭建的移动机器人实验平台进行了验证实验。

第 6 章为总结与展望。主要归纳了本文设计的用于室内 SLAM 的机器人的技术要点和工作总结，同时分析了当前设计的不足并思考了可改进的方向。

第 2 章 室内移动机器人 SLAM 系统建模与定位研究

本章首先介绍了开源机器人操作系统（ROS）的特点，然后介绍移动机器人的坐标系建立，以及在所建立的坐标系下对差动驱动式移动机器人的系统模型进行描述，然后推导了移动机器人的正运动学并阐述了其控制方式。最后对粒子滤波定位算法进行了详细阐述，这将为硬件平台的搭建以及软件的实现提供基础。

2.1 机器人操作系统（ROS）简介

机器人操作系统 ROS（Robot Operating System）是由 Willow Garage 公司在 2010 年发布的^[2]，其主要是为了适应机器人领域的快速发展，且能够满足代码复用率高，代码模块化强的需求^[13]。

ROS 是一种基于分布式处理框架的系统^[14]，而且是完全开源的机器人操作系统。它的可执行文件能够进行耦合，而且这些过程都可以封装到数据包（Packages）和堆栈（Stacks）中，同时这些数据包和堆栈可以完全被共享并且供其他 ROS 开发者使用。ROS 中的一个节点（node）可以被 ROS 中的 launch 文件启动，launch 文件是一种 xml 语言描述文件，launch 文件可以运行多个节点和节点参数，可以直接调用多个 ROS 分布式框架中的节点，进而运行自己的目标程序。

2.1.1 ROS 主要特点

ROS 的运行架构是对 TCP/IP 网络协议的包装，实质上是基于网络协议控制的，所以利用 ROS 通过网络来控制实现多机通讯是极为方便的。它能执行以下三种类型的通讯：(1) 基于进程服务的同步远程过程调用通讯；(2) 基于主题（Topic）的异步数据流通讯；(3) 参数服务器上的数据存储通讯^[15]。但是 ROS 本身并没有实时性，ROS 的主要特点主要归纳为以下几条：

1) 点对点设计

ROS 包括的系统并不是单进程的系统，而是一个多任务多进程的系统，假设这些系统都存在于一个机器人的硬件上，那么对硬件的要求会变得极

其高，同时也有造成资源浪费的可能，而这种点对点式的设计可以分散任务压力，将任务分散尤其在多机通讯时显得尤为突出。

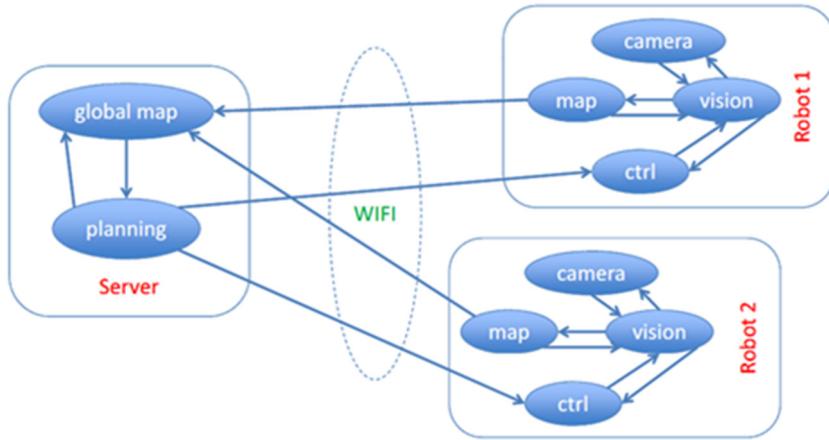


图 2-1 ROS 点对点设计示意图

2) 多语言支持

在软件设计中或具体到编写程序这一问题中，往往会面临编程语言的选择，而且编程语言之间通常是具有一定的相斥性的，而 ROS 则是一个对编程语言保持中立的操作系统。它可以支持 C++、Python、LISP 和 Octave，当然一些其他编程语言也可以调用 ROS 接口，实质上 ROS 可以做到混合编程，它实质上是转化为对消息的一种处理模式，能够使得多种语言发挥各自的长处，配合时显得相得益彰。

3) 精简与集成

ROS 具有模块化的特点，各个模块的代码可以单独编译也可以组合编译，组合编译只需要编写相对应的 CMake 文件，而且 ROS 将 CMake 进行了包装，使用起来比 CMake 更加方便。

4) 工具包丰富

为了管理复杂的 ROS 软件框架，ROS 中有类似于 Rviz 的三维可视化调试软件，便于机器人的开发，另外如 rqt 软件则可以直接查看系统节点进程以及查看进程的一些参数。

5) 开源且免费

ROS 所有的源代码都是公开发布的。这对于开源软件来说是不断的修正的过程，同时也是不断提升的过程。

2.2 移动机器人系统建模

在研究移动机器人的 SLAM 问题时，机器人坐标系的建立显得十分重要，通常是有两种坐标系可供选择，第一种是笛卡尔坐标系，这是适用性最广的坐标系，也是最常用的坐标系，第二种则是极坐标系^[16]。一般声呐测距，激光雷达等与距离—方位相关的传感器使用这种坐标系表示较为方便，由于本文设计的移动机器人基本在水平地面移动，所以本文设计的移动机器人选择笛卡尔坐标系来描述机器人的位姿。

2.2.1 移动机器人运动学

移动机器人一般有 6 个自由度，其中包括表示位置的笛卡尔直角坐标 (x, y, z) ，以及表示姿态的横滚，俯仰和偏航。差动式驱动的移动机器人的运动基本在 $x-y$ 平面，所以完整表示地面移动机器人的位姿还需要知道偏航角度，即机器人前端的朝向与固定坐标系的夹角。

为了完整的描述差动式驱动移动机器人的运动，我们对其模型进行简化(此时假设机器人与传感器位于同一中心点)并将其置于全局坐标系 XOY 中，即世界坐标系。因为默认机器人搭载的传感器与机器人中心位置相同，所以将移动机器人坐标系与传感器坐标系统一描述为 $x'o'y'$ ^[17]，如图 2-2 所示，移动机器人轮子的直径为 $2r$ ，且轴距为 D ，此刻移动机器人的位姿可以表示为 (x, y, θ) 。

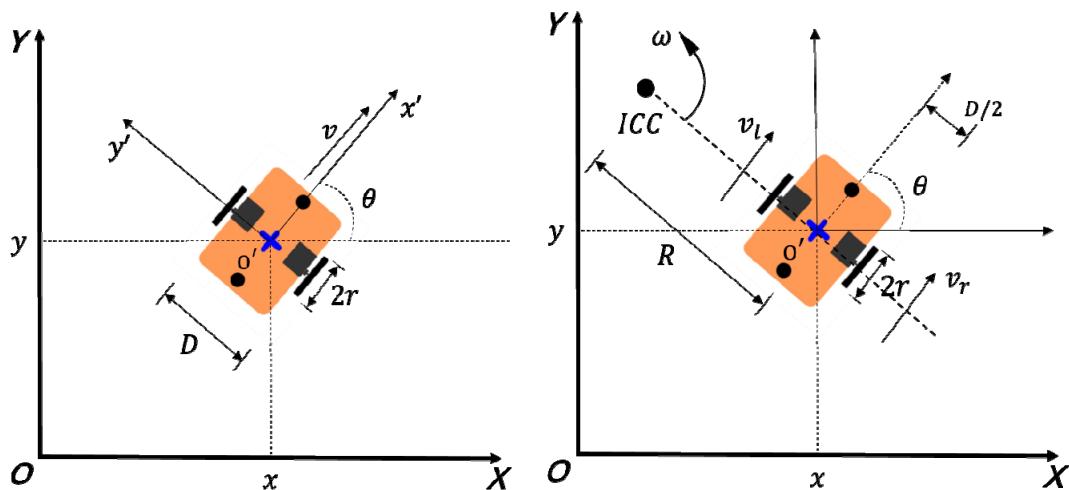


图 2-2 差动驱动式移动机器人坐标系统 图 2-3 差动驱动式移动机器人运动学

当移动机器人在平面运动时，左右两轮以不同的速度旋转形成的运动可以看成是机器人绕平面某一固定点做以半径为 R ，角速度为 ω 的圆周运动。此刻该点为移动机器人运动的瞬时曲率中心-ICC。且左右两轮的速度分别为 v_l 和 v_r ，因此可以得到如下关系：

$$\omega(R - D/2) = v_l \quad (2-1)$$

$$\omega(R + D/2) = v_r \quad (2-2)$$

由以上两式容易解得：

$$R = \frac{D}{2} \frac{v_l + v_r}{v_r - v_l}; \omega = \frac{v_r - v_l}{D} \quad (2-3)$$

如图 2-4，考虑机器人以 ω 的角速度运动了 δt 的时间，那么我们可以得到此刻机器人朝向角的关系为：

$$\theta' = \omega\delta t + \theta \quad (2-4)$$

而此时的旋转中心坐标为：

$$ICC = [ICC_x, ICC_y] = [x - R \sin \theta, y + R \cos \theta] \quad (2-5)$$

在 $t + \delta t$ 时刻移动机器人的位姿将会是 (x', y', θ') 即：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\delta t) & -\sin(\omega\delta t) & 0 \\ \sin(\omega\delta t) & \cos(\omega\delta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - ICC_x \\ y - ICC_y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ICC_x \\ ICC_y \\ \omega\delta t \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

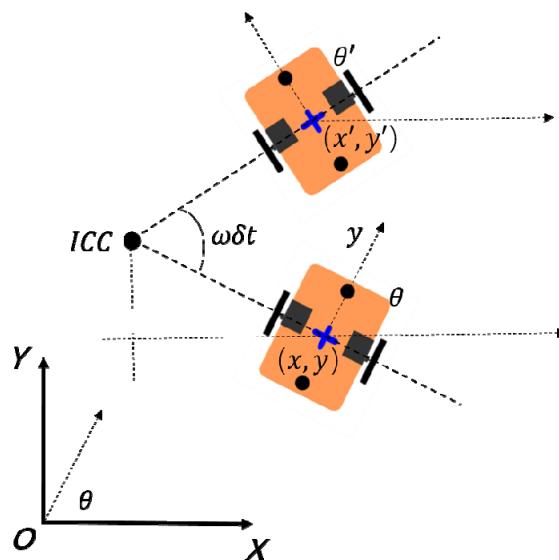


图 2-4 移动机器人正运动学模型

2.2.2 移动机器人控制模式

转向系统作为移动机器人的一个重要部分，它将帮助并决定机器人在环境中如何进行导航。考虑到机器人的复杂性，成本以及规模，在本项目中将使用差动驱动移动机器人模型。差动式驱动机器人主要由两个安装在同轴的轮子组成且轮子的运动分别由不同的电机进行控制组成^[18]。如图 2-5，通过控制两个电机的转向和转速可以使得移动机器人获得不同的行进姿态。

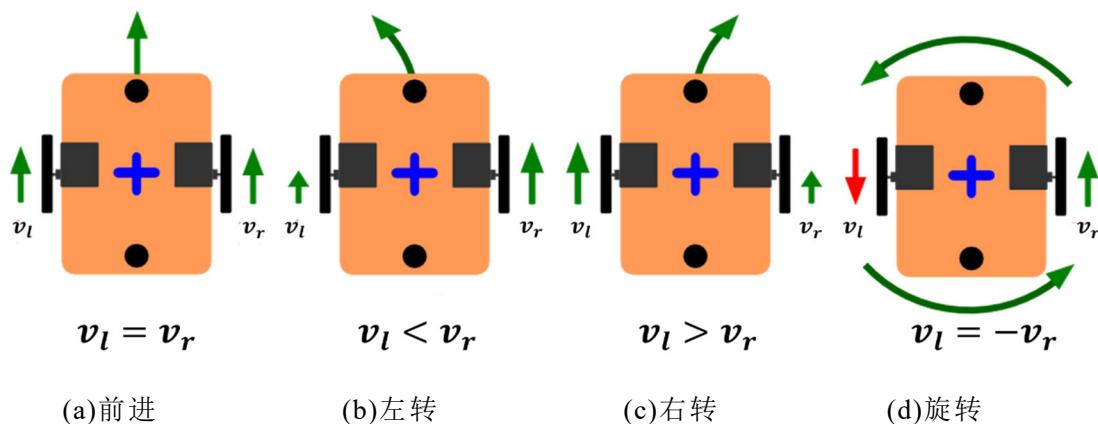


图 2-5 差动驱动式移动机器人运动模式

2.3 粒子滤波在 SLAM 中的应用

在确定移动机器人的驱动方式之后则需要考虑其在未知环境中的定位问题，这也是本文研究的主要问题。本文设计的移动机器人主要是二维定位问题，对环境进行二维地图的构建。在 SLAM 问题中，常用的 SLAM 算法有 Fast-SLAM，UKF-SLAM 和 PF-SLAM 算法。其中在二维问题中，最容易实现的即为 PF-SLAM(粒子滤波算法)，下面就针对粒子滤波算法进行详细的阐述，介绍其在定位问题中的应用。

粒子滤波的核心思想是基于蒙特卡洛采样的方法，相比于卡尔曼滤波算法，它的优势在于能计算非线性非高斯空间的状态空间问题^[10]。其核心思想是通过在后验概率（也就是已有的测量数据估计出当前状态值）上随机采样的方法，这些随机样本我们称作“粒子”，粒子滤波用样本均值代替积分运算使得在状态空间上的随机样本的值近似等于概率密度函数，在概

率统计中我们知道，当样本数足够多时可用近似代替总体，这也即是粒子滤波逼近任何形式的概率密度分布^{[19]-[21]}。

2.3.1 贝叶斯滤波

动态系统的目标跟踪问题的状态空间模型可以通过图 2-6 来描述，且整个状态空间是建立在马尔可夫模型上的^[8]。

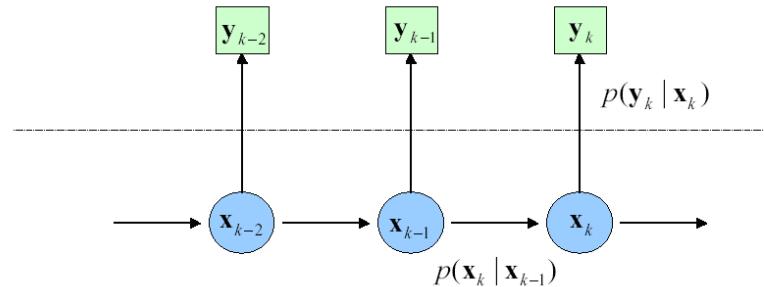


图 2-6 状态空间模型

假设其状态方程和测量方程为：

$$x_k = f_k(x_{k-1}, v_{k-1}) \quad (2-7)$$

$$y_k = h_k(x_k, n_k) \quad (2-8)$$

其中 x_k 为系统状态， y_k 为观测值， $f_k(x_{k-1}, v_{k-1})$ 和 $h_k(x_k, n_k)$ 分别为状态转移函数和测量函数， u_k 为过程噪声， v_k 为观测噪声。

从贝叶斯理论观点出发，状态估计问题就是根据一系列已有数据（在以上假设中即为观测值 $y_{1:k}$ ，称作后验知识）递推的计算当前状态 x_k 的可信度^[7]。而这个可信度也就是条件概率的 $p(x_k | y_{1:k})$ ，要得到当前状态的可信度，需要假设系统的状态方程满足一阶马尔可夫模型，即当前状态 x_k 与 x_{k-1} 上一状态是独立不相关的，且 y_k 也只与当前状态 x_k 有关。要得到当前状态的可信度则需要预测和更新两个过程，其中预测过程是利用上一状态（先验知识）对未来状态进行预测，即 $p(x_k | x_{k-1})$ ，而更新过程则是利用当前的测量值对猜测的修正，即由 $p(x_k | y_{k-1})$ 得到 $p(x_k | y_k)$ ，可以看出这是一个递推过程，假设 $k-1$ 时刻的概率密度函数为 $p(x_{k-1} | y_{1:k-1})$ 。

预测过程：由 $k-1$ 时刻的概率密度 $p(x_{k-1} | y_{1:k-1})$ 推导出下一时刻

$p(x_k | y_{1:k-1})$ 。

$$p(x_k | y_{1:k-1}) = \int p(x_k, x_{k-1} | y_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (2-9)$$

$$= \int p(x_k | x_{k-1}, y_{1:k-1}) p(x_{k-1} | y_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (2-10)$$

$$= \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | y_{1:k-1}) dx_{k-1} \quad (2-11)$$

更新过程：由 $p(x_k | y_{1:k-1})$ 得到 $p(x_k | y_{1:k})$ ，其中 $p(x_k | y_{1:k})$ 也称作后验概率，后验概率的计算中融合了 k 时刻的测量值，也就是对 k 时刻的预测进行修正，也就是滤波。

$$p(x_k | y_{1:k}) = \frac{p(y_k | x_k) p(x_k | y_{1:k-1})}{p(y_k | y_{1:k-1})} \quad (2-12)$$

根据一阶马尔可夫模型，假设 y_k 只由 x_k 决定，即

$$p(y_k | x_k, y_{1:k-1}) = p(y_k | x_k) \quad (2-13)$$

因此

$$p(x_k | y_{1:k}) = \frac{p(y_k | x_k) p(x_k | y_{1:k-1})}{p(y_k | y_{1:k-1})} \quad (2-14)$$

其中 $p(y_k | y_{1:k-1})$ 是归一化常数

$$p(y_k | y_{1:k-1}) = \int p(y_k | x_k) p(x_k | y_{1:k-1}) dx_k \quad (2-15)$$

以上就是贝叶斯滤波，从上面贝叶斯滤波预测和更新两个过程中可知有积分过程，这对于一般的非线性，非高斯系统，很难对后验概率进行解析解的求解，而蒙特卡洛采样的引入有效的解决了这一问题。

2.3.2 蒙特卡洛采样

蒙特卡洛采样的引入主为了解决贝叶斯后验概率的积分问题，为了解决这个问题，则采用蒙特卡洛采样来替代后验概率的计算^[25]。在求解积分的问题中，经典做法就是转换为离散值的求和问题，如图 2-7 所示，粒子滤波算法的核心思想便是用随机样本的加权和来逼近后验概率密度分布。

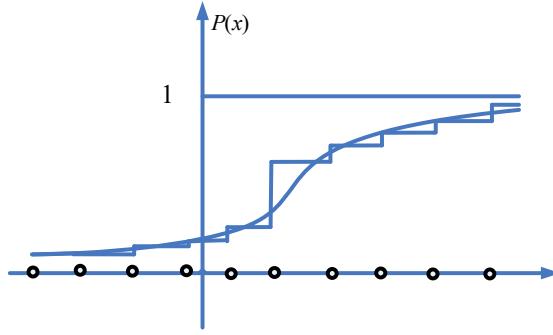


图 2-7 经典概率分布函数

假设从后延概率中取 N 个样本，则有

$$\hat{p}(x_n | y_{1:k}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_n - x_n^{(i)}) \approx p(x_n | x_{1:k}) \quad (2-16)$$

其中 $\delta(x_n - x_n^{(i)})$ 为狄拉克函数，定义 $f(x) = \delta(x_n - x_n^{(i)})$ ，那么后验概率密度已经离散化，则要根据后验概率用于图像跟踪或滤波，则需对其求当前的期望值，则有：

$$E[f(x_n)] \approx \int f(x_n) \hat{p}(x_n | y_{1:k}) dx_n \quad (2-17)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int f(x_n) \delta(x_n - x_n^{(i)}) dx_n \quad (2-18)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int f(x_n^{(i)}) \quad (2-19)$$

从式 (2-19) 可以看出，采样粒子状态值的平均值可用直接逼近当前状态 n 的期望值，当然这个公式应用的前提就是必须要知道后验概率，不然无法对后验概率进行采样的，这时候重要性采样方法的引入就能解决在后验概率不给定的情况下解决当前状态 n 的期望值。

2.3.3 重要性采样

若要从目标分布中采样，那么考虑从一个已知的可以采样的分布去采样，假设该已知的可采样的分布为 $q(x | y)$ ，利用已知的随机样本的加权来逼近后验概率密度 $q(x_k | y_{1:k})$ ，则在蒙特卡洛采样中求解期望的问题就转化为：

$$E[f(x_k)] = \int f(x_k) \frac{p(x_k | y_{1:k})}{q(x_k | y_{1:k})} dx_k \quad (2-20)$$

$$= \int f(x_k) \frac{p(y_{1:k} | x_k) p(x_k)}{p(y_{1:k}) q(x_k | y_{1:k})} q(x_k | y_{1:k}) dx_k \quad (2-21)$$

$$= \int f(x_k) \frac{W_k(x_k)}{p(y_{1:k})} q(x_k | y_{1:k}) dx_k \quad (2-22)$$

其中假设

$$W_k(x_k) = \frac{p(y_{1:k} | x_k) p(x_k)}{q(x_k | y_{1:k})} \propto \frac{p(x_k | y_{1:k})}{q(x_k | y_{1:k})} \quad (2-23)$$

且由于

$$p(y_{1:k}) = \int p(y_{1:k} | x_k) p(x_k) dx_k \quad (2-24)$$

于是 (3-16) 可以进一步写成

$$E[f(x_k)] = \frac{1}{p(y_{1:k})} \int f(x_k) W_k(x_k) q(x_k | y_{1:k}) dx_k \quad (2-25)$$

$$= \frac{\int f(x_k) W_k(x_k) q(x_k | y_{1:k}) dx_k}{\int p(y_{1:k} | x_k) p(x_k) dx_k} \quad (2-26)$$

$$= \frac{\int f(x_k) W_k(x_k) q(x_k | y_{1:k}) dx_k}{\int W_k(x_k) q(x_k | y_{1:k}) dx_k} \quad (2-27)$$

$$= \frac{E_{q(x_k | y_{1:k})}[W_k(x_k) f(x_k)]}{E_{q(x_k | y_{1:k})}[W_k(x_k)]} \quad (2-28)$$

通过式 (2-25) 到 (2-28) 的推导可以知道期望的计算可以通过蒙特卡洛采样来计算，结合 (2-19) 可以将 (2-28) 近似为：

$$E[f(x_k)] \approx \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_k(x_k^{(i)}) f(x_k^{(i)})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_k(x_k^{(i)})} \quad (2-29)$$

$$= \sum_{i=1}^N \tilde{W}_k(x_k^{(i)}) f(x_k^{(i)}) \quad (2-30)$$

其中

$$\tilde{W}_k(x_k^{(i)}) = \frac{W_k(x_k^{(i)})}{\sum_{i=1}^N W_k(x_k^{(i)})} \quad (2-31)$$

这也就是归一化之后的权重，不同于（2-19）中蒙特卡洛采样中以状态值的平均值作为期望值，而是一种特殊的加权形式，不同的粒子对应有不同的权重，权重越大，说明对该粒子信任越大。

2.3.4 序贯重要性采样

在上面已经解决了不能从后验概率直接采样的问题，但同时又引入了一个新问题，也就是每个粒子的权重都是一种特殊的加权形式，而且每个粒子的权重都有直接的计算方法，效率相对低下，而且当多进行一个采样时， $p(x_k | y_{1:k})$ 就需要更新一次，而 $p(x_k | y_{1:k})$ 并不好计算，且单独计算极其耗费时间，这就违背了算法的实时性，所以在这又引入序贯重要性采样，序贯重要性采样的引入使得粒子的权重能够以递推的方式去计算权重。

考虑式子（2-31）即权重的递推形式，假设重要性概率密度函数 $q(x_{0:k} | y_{1:k})$ ，此时粒子对之前所有时刻的状态的后验概率都有估计，且假设可分解为：

$$q(x_{0:k} | y_{1:k}) = q(x_{0:k-1} | y_{1:k-1})q(x_k | x_{0:k-1}, y_{1:k}) \quad (2-32)$$

则后验概率的递推形式可以表示为：

$$p(x_{0:k} | y_{1:k}) = \frac{p(y_k | x_{0:k}, y_{1:k-1})p(x_{0:k} | y_{1:k-1})}{p(y_k | y_{1:k-1})} \quad (2-33)$$

$$= \frac{p(y_k | x_k)p(x_k | x_{k-1})p(y_{0:k-1} | y_{1:k-1})}{p(y_k | y_{1:k-1})} \quad (2-34)$$

$$\propto p(y_k | x_k)(x_k | x_{k-1})p(x_{0:k} | y_{1:k-1}) \quad (2-35)$$

从推导结果可以看出后验概率的分解形式不需要进行积分，所有粒子滤波中粒子的递归权重可以表示为：

$$w_k^{(i)} \propto \frac{p(x_{0:k}^{(i)} | y_{1:k-1})}{q(x_{0:k}^{(i)} | y_{1:k-1})} \quad (2-36)$$

$$= \frac{p(y_k | x_k^{(i)})p(x_k^{(i)} | x_{k-1}^{(i)})p(x_{0:k-1}^{(i)} | y_{1:k-1})}{q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k-1})q(x_{0:k-1}^{(i)} | y_{1:k-1})} \quad (2-37)$$

$$= w_k^{(i-1)} \frac{p(y_k | x_k^{(i)})p(x_k^{(i)} | x_{k-1}^{(i)})}{q(x_k^{(i)} | x_{0:k-1}^{(i)}, y_{1:k-1})} \quad (2-38)$$

于是就得到了权重的递推形式，这样在编程中就可以运用递推来实现，在保证算法准确性的基础上极大的加快了算法的速度。

2.3.5 重采样

在序贯重要性采样中已经得到粒子滤波权重的一个递推，但是它存在一个退化问题^[22]，也就是当经过几次递推之后，绝大多数的粒子的权重都会变得很小，无效采样粒子的数目增加使得计算浪费在不起作用的无效粒子上，这将大大降低粒子滤波的估计性能，如图所示

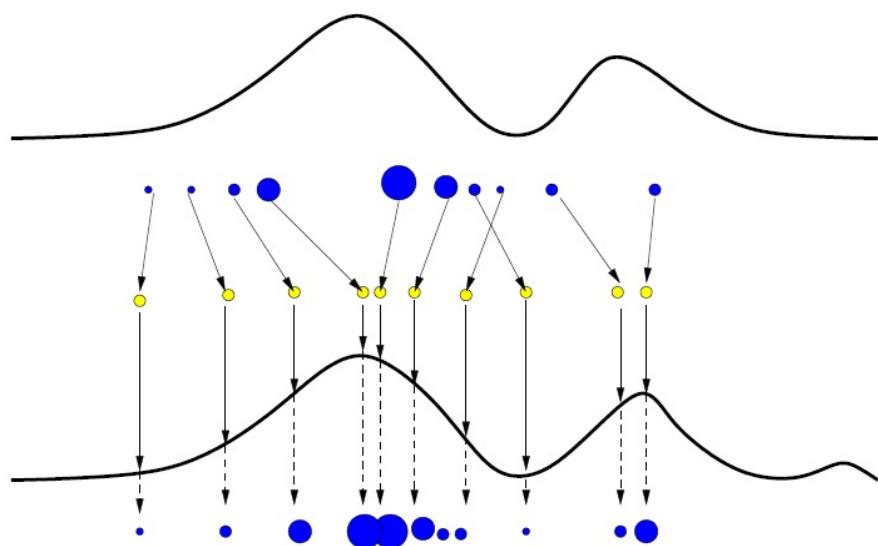


图 2-8 粒子退化示意图 1

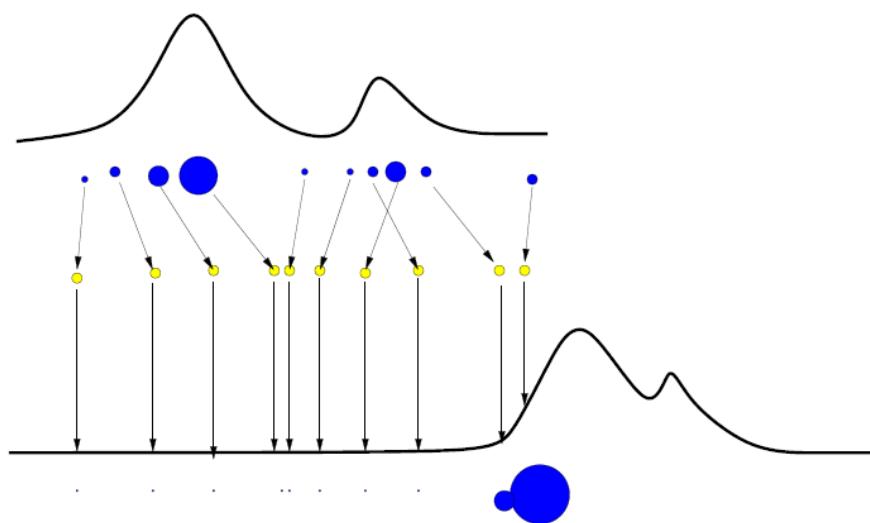


图 2-9 粒子退化示意图 2

粒子退化是对算法实时性的一个考验，因为这样将在无用粒子上耗费大量的计算时间，针对退化问题，最直接的方法即增加粒子，但是这样做又将增加计算时间，更为通用的做法则为采用在序贯重要性采样之后用重采样的方法重新采样。

重采样的大致思路即是经过多次迭代之后某些粒子的权重变得极其小，将那些退化严重的粒子直接忽略，为了保证粒子数目不变，就用一些新的粒子来取代退化的粒子，新的粒子的选取方法就是重采样的核心，根据权重较高的粒子的权重进行分配和复制，权重高的粒子复制出更多的新粒子，以此类推^{[23][24]}。

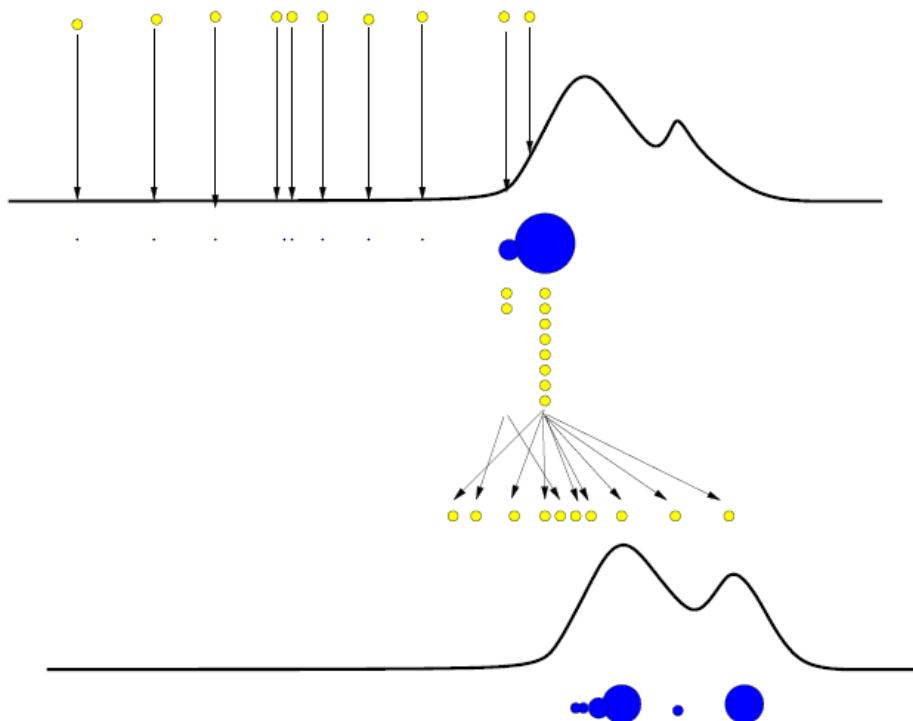


图 2-10 重采样示意图

以上就是粒子滤波的经典算法流程，主要步骤为首先对粒子进行初始化，然后对后验概率进行重要性采样，计算粒子的权重并进行归一化，接着对粒子集进行重采样保证算法实时性与可靠性，最后输出当前时刻状态的估计值。

第 3 章 室内移动机器人的硬件设计

本章首先介绍了移动机器人实验平台的组成部分并详细阐述了其硬件的搭建策略，同时对移动机器人实验平台的各个模块如传感器模块，控制模块等的选型进行了细致的介绍。

3.1 室内移动机器人平台搭建

定位是机器人在未知环境中确定自身具体位置的过程，也是本文研究的核心内容之一。传统移动机器人并不具备定位功能，且移动机器人要完成定位的过程则需要依靠外界的传感器来实现。如果需要进行定位，则必须先具备两个必要的条件：一是机器人搭载了可帮助其感知外界未知环境的各种传感器；二是机器人必须能通过传感器得到与传感器类型相匹配的未知环境的地图。通常摄像头，激光雷达，红外线，超声波传感器可以用于定位。移动机器人的定位包括绝对定位和相对定位，其中相对定位需要给定移动机器人的初始位姿，然后通过传感器如里程计可以推算出当前机器人位姿和初始位姿的关系，里程计一般由编码器和姿态传感器融合得到；绝对定位通常可以用 GPS 获得，但是在室内精度较差，一般还可以通过三视角法和模型匹配法进行绝对定位。

本文采用激光雷达和里程计两种定位方式所结合的方法进行定位。所设计的系统由感知层、决策控制层、执行控制层及用户层四个部分组成^{[36][37]}。如图 3-1 所示，感知层为机器人与外界的信息接口，通过各种传感器感知外部环境，获取环境信息，由惯性测量单元以及编码器融合形成的里程计计算出移动机器人的当前位姿，而激光雷达通过扫描机器人的周边环境来感知未知环境并对其进行描述，这样就可以在自身的参考坐标系下给出绝对位姿；决策控制层为机器人的主控系统，根据感知层传入的数据并对移动机器人制定相应的运动策略，主要完成对移动机器人定位、路径控制以及对环境地图的绘制；执行控制层则是执行机构，处理决策控制层的动作，包括移动速度，调整位姿等；用户层主要由上位机 PC 组成，通过无线以太网接收机载 PC 传输过来的数据，完成对 SLAM 过程的同步监测。

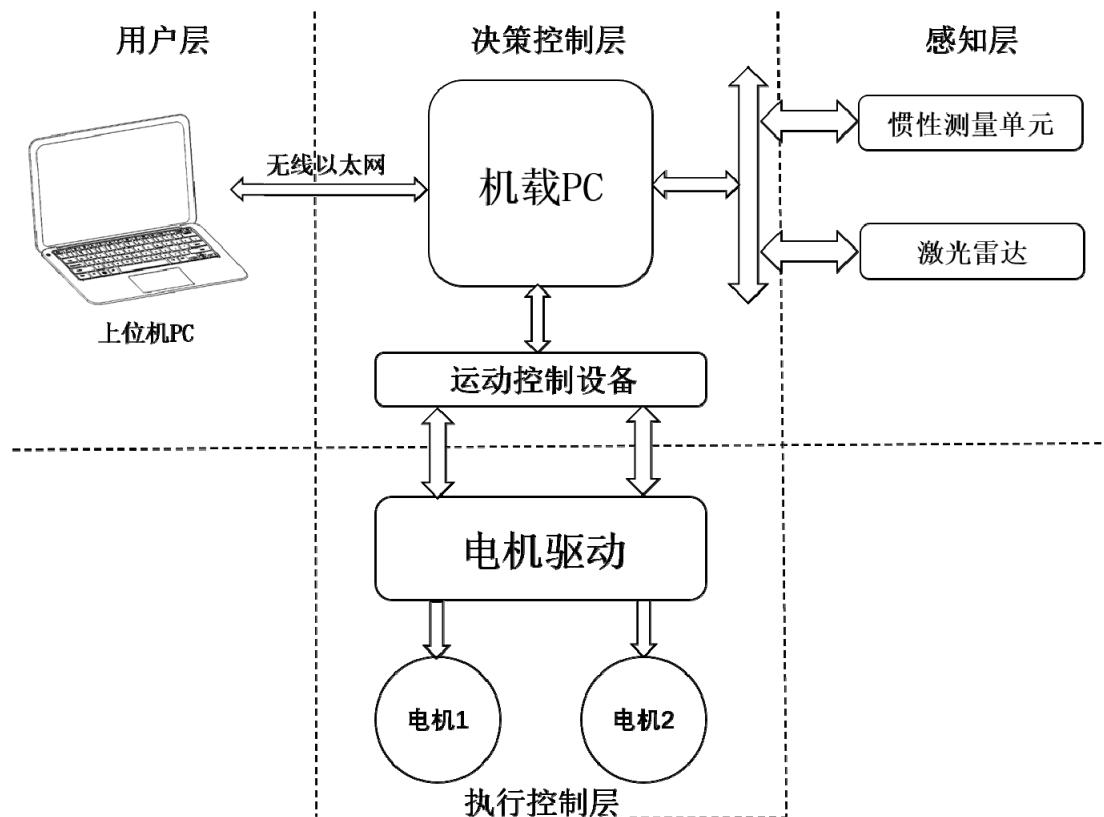


图 3-1 硬件系统架构图

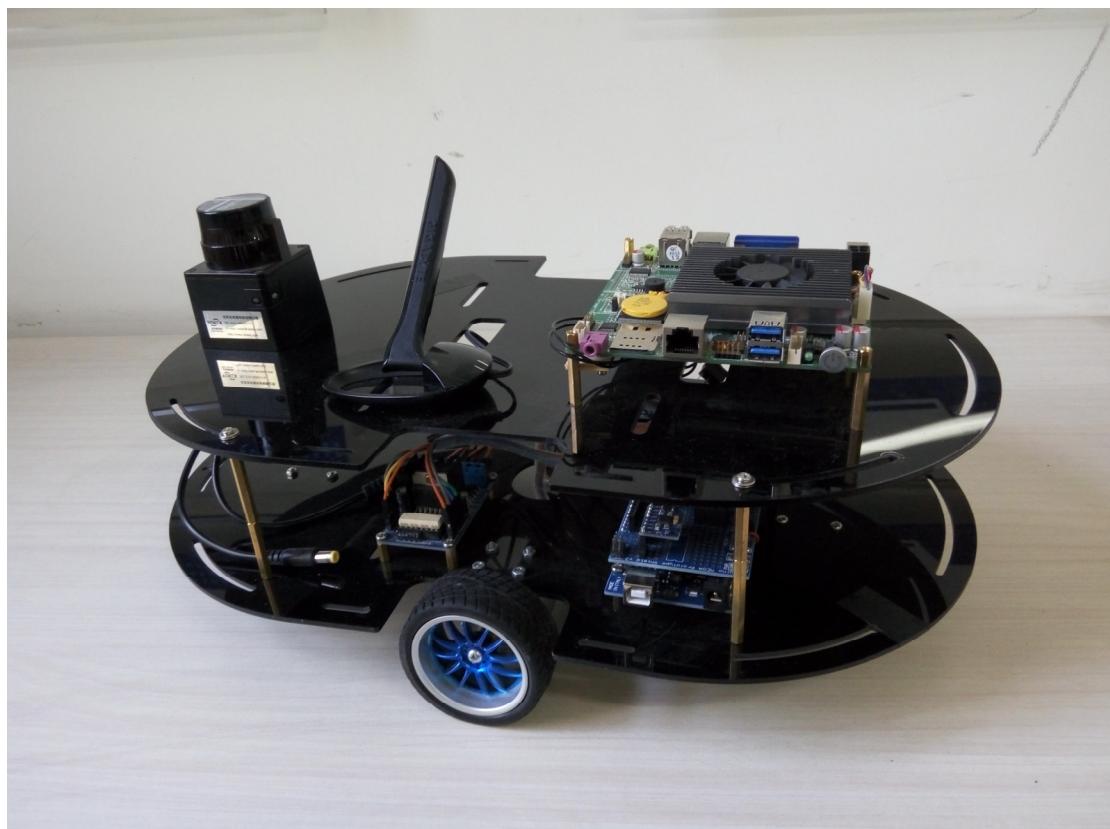
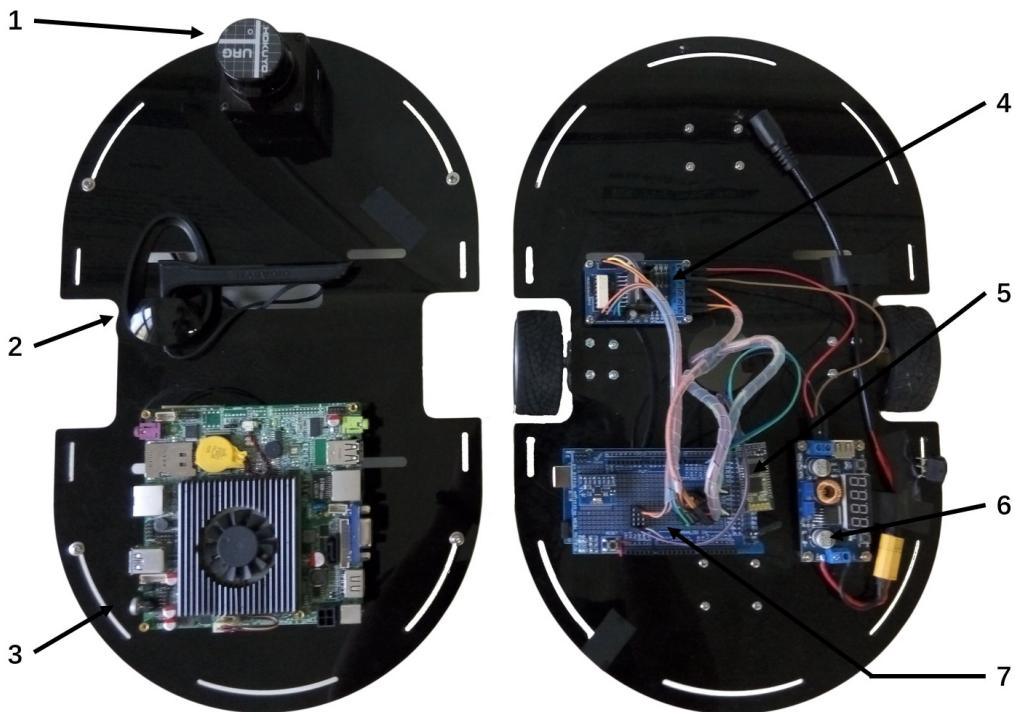


图 3-2 移动机器人实物图



附注：图中 1—激光雷达，2—无线模块，3—N29 工控机，4—电机驱动 L298N，5—蓝牙模块，6—降压稳压模块，7—Arduino。

图 3-3 移动机器人模块图

本文设计的移动机器人包含上下两层，其中上层主要为机载 PC 即决策控制层，主要完成接收运动控制层传来的传感器信息，进行复杂的定位运算从而对位置环境进行地图的构建；下层为运动控制层，其中包括运动控制模块 Arduino，电机驱动 L298N 以及降压模块等底层硬件。

3.2 控制模块

3.2.1 决策控制模块

决策控制模块主要用于处理激光雷达和里程计数据，从而生成未知环境的地图数据，进而进行定位与导航。因此一般选用工控机作为机载 PC，这样能保证数据处理的实时性。本文设计的移动平台采用了 Intel N29 四核工控机，其外形以及各个接口组成如下图所示。N29 四核工控机可直接搭

载 Linux (Ubuntu) 系统，可直接运行基于 Linux 的 ROS (机器人操作系统)，同时拥有千兆以太网接口，这样便于用户通过无线以太网获取工控机中的图像，实现远程监测和控制，其主要技术参数表如表 3-1 所示：

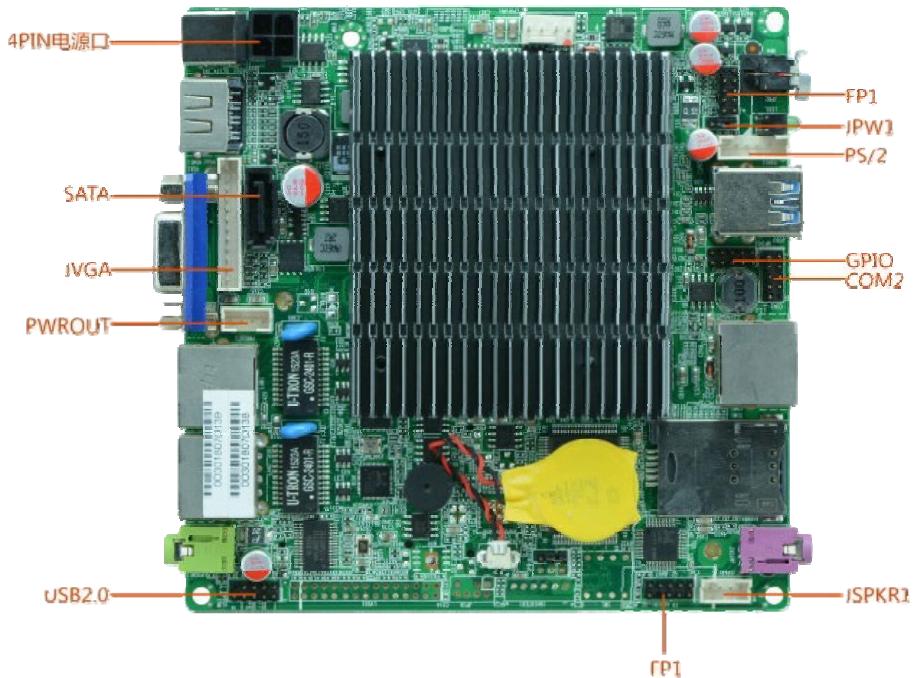


图 3-4 N29 工控机正面接口示意图

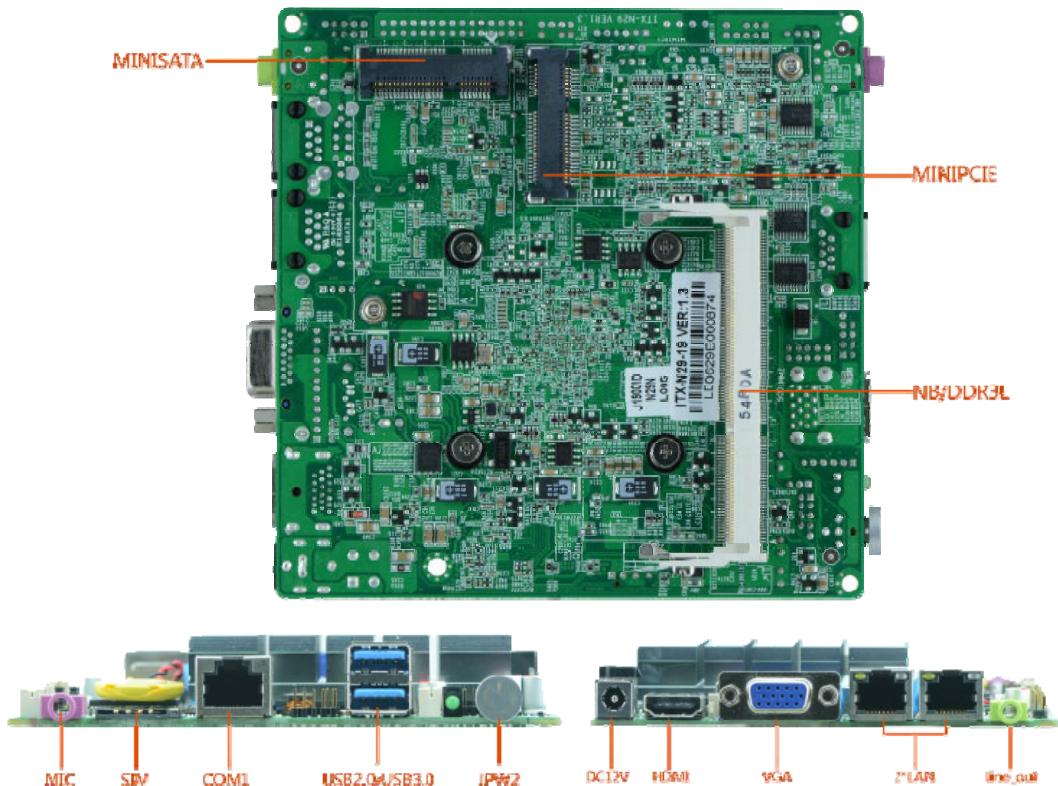


图 3-5 N29 工控机背面与侧面接口示意图

表 3-1 N29 工控机主要技术参数

CPU	Intel J1900/2.0GHz 四核处理器
芯片组	基于 Intel Baytrail SOC 平台
接口	2 个 USB2.0, 2 个 USB3.0
电源类型	DC12V 单电源输入
使用环境	工作温度: -10°C -60°C
尺寸	120mm×120mm×21mm

3.2.2 运动控制模块

运动控制模块作为连接决策控制层和执行控制层的中间设备，其主要完成传感器信息的采集以及对决策控制层的决策做出相应的动作。对于用于室内定位移动机器人的运动控制芯片，一般可采用 STM32 和 Arduino 方案，STM32 方案中，其运算能力和可靠性高，但其成本相对 Arduino 高，且编程环境较 Arduino 复杂，本文采用 Arduino 控制板作为运动控制模块。

Arduino 是一块采用 Atmel 芯片且完全开放源代码的平台，该平台由硬件和软件两个部分组成，其中硬件包括微处理器和电路板等，而软件则包括编程接口和编程语言^[26]。平台的两部分均为开源。Arduino 的主要功能特点如下：

- 1)开放源代码的电路图设计。程序 API 免费使用，同时用户可以根据电路图自己搭建自己的 Arduino，也可对源码进行修改达到自己的程序设计目标。
- 2)采用 AVR 架构且使用了性价比较高的微处理器。
- 3)编译好的可执行文件采用 TTL 串口下载到板子上且芯片支持再刷 Bootloader 固件。

本文设计的移动机器人采用 Arduino Mega2560 作为运动控制芯片。Arduino 常用的处理器型号有 UNO 和 Mega2560^[6]。由于本文设计的移动机器人使用了两个编码器和一个姿态传感器，共需要三个中断，但是 UNO 只有两个中断且数字输入输出口相对于 Mega2560 少很多，所以选用 Arduino Mega2560。Arduino Mega2560 最大的特点就是片上资源极其丰富，

多达 54 路数字输入输出口，而且其中有 16 路可作为 PWM 波输出口，极大的方便了需要使用 PWM 波的传感器，同时还拥有 16 路模拟输入口以及 4 路串口，且串口是独立工作的，可以设置不同的波特率，独立串口之间不会相互影响。

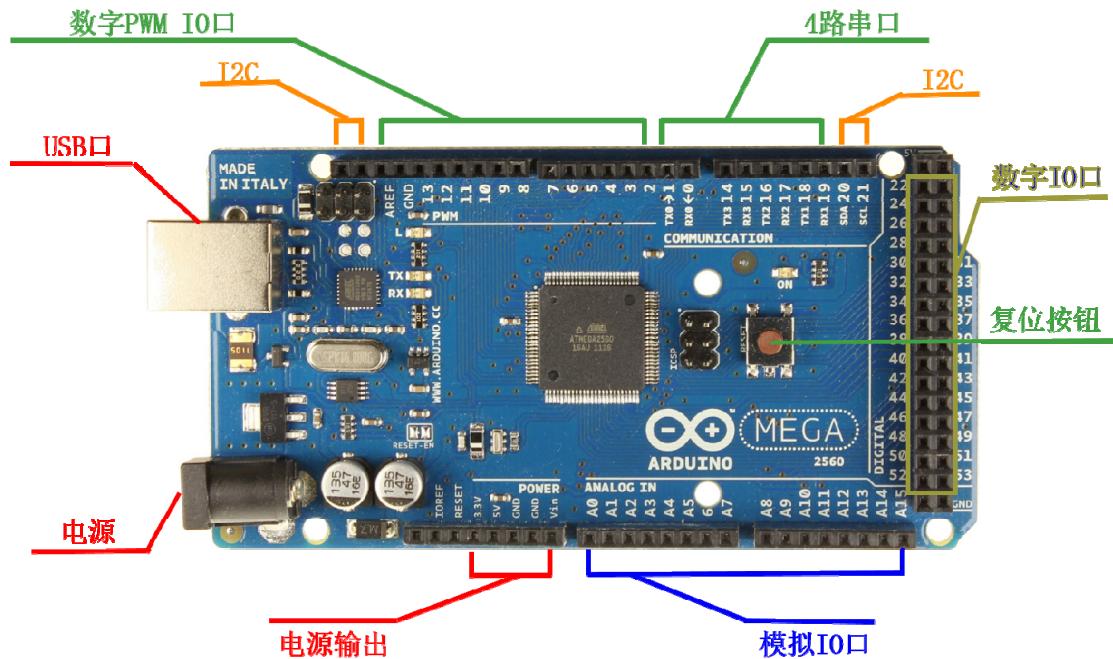


图 3-6 Arduino 控制板

表 3-2 Arduino 控制芯片技术参数

处理器	ATmega2560
工作电压	5V
输入电压	7-12V
数字 I/O 口	54 (其中 16 路 PWM 输出)
模拟输入口	16
Flash	256KB
工作时钟	16MHz

作为运动控制层，其主要需要完成以下任务：

- 1) 使用 PID 算法控制移动平台在平面做出相应的运动动作且对左右两轮电机的编码器进行精确计数并计算出绝对位置。
- 2) 通过 I2C 总线获取姿态传感器的原始数据并经过滤波之后得到移动

机器人实时行进方向，与编码器得到的相对位置融合组成机器人在环境中完整的位姿信息。

- 3) 接收决策控制层的运动指令，并将运动信息（转向和转速）下发给电机驱动模块。
- 4) 接收用户层传输的蓝牙控制指令，并对其做出正确的响应动作。

3.3 运动驱动模块

运动驱动模块主要包含了电机和电机驱动^[27]，本文设计的移动机器人采用差动驱动式控制，所以共需要两个电机，考虑到移动机器人的整体质量且其拓展功能所增加的重量，则电机需要满足大转矩，反应速度快，控制精准，运行平稳，噪声小等特点，综合以上特点以及整个系统的电源配置选用了 GB37-3530 的直流减速伺服电机。



图 3-7 GB37-3530 电机

该电机的具体参数如表 3-3 所示

表 3-3 GB37-3530 电机参数表

型号	GB37-3530
额定电压	12V
额定转速	251rpm
空载电流	100mA
额定转矩	4.3kg•cm
减速比	1:43.8
堵转电流	1.8A

经过测试该型号的直流减速伺服电机可以很好的满足本文设计的移动机器人的动力和负载需求。

电机驱动是电机控制必不可少的模块，为简单起见并达到更有效的控制精度，购买了相应的电机驱动模块。

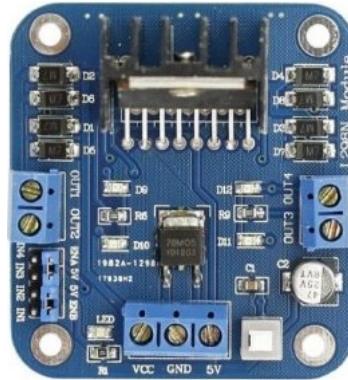


图 3-8 L298N 电机驱动模块

该电机驱动模块集成度高，体积小，板载两路大功率直流电机驱动。可有效散热，保持模块的良好稳定性能。驱动能力强，开关频率高，接口简单，可以满足机器人使用电机的驱动要求。

表 3-4 L298N 参数表

驱动电压	3-40V
单路驱动电流	持续 2A, 峰值 3A
最小逻辑电压输入	3V
最大逻辑电压输入	7V
负载最大功率	25W
使用环境	-25°C - 130°C

经过测试 L298N 电机驱动可以很好的驱动上述所选用的直流减速伺服电机。

3.4 传感器模块

传感器作为一种测量物理量并将其转化为仪器可读取的装置，是移动机器人感知自身和外部环境的载体^[28]。实时定位与建图主要包括里程计和传感器与移动机器人的坐标变换两部分输入，其中里程计的数据均由传感器获得，是移动机器人实现自主性的不可或缺的部分。本文在感知层获取机器人位姿时采用了磁式编码器和 6 轴姿态传感器，同时用激光雷达对工作环境做绝对位置的匹配，下面将对本平台所用传感器做简要介绍。

3.4.1 磁式编码器

编码器是一种能够将电机输出轴的几何位移转换为数字量的传感器，常常用于电机测速^[29]。在该移动机器人上使用光电编码器，通过 PID 控制可对其可实现实时闭环控制，提高机器人运行平稳性，提高定位精确度。

光电编码器一般配置码盘，通过光电发射和接收到的脉冲数来确定当前的位移或者角度信息，其精度主要与码盘的线数相关，若是正交编码器则可以对脉冲上下跳变均进行计数则可以提高其进度；而磁电式编码器则是利用磁场的变化来计算电机转动轴的绝对位置，和光电编码器相比，它更具有耐污染，抗震，结构简单性能可靠的优点^[29]。

本文的移动机器人采用的编码器为磁式增量编码器，其工作原理为磁传感器探头通过磁电阻效应将变化着的磁场信号转化为电阻阻值的变化，在外加电势的作用下，变化的电阻值转化成电压的变化，经过后续信号处理电路的处理，模拟的电压信号转化成计算机可以识别的数字信号，进而实现磁电式编码器的旋转编码功能。

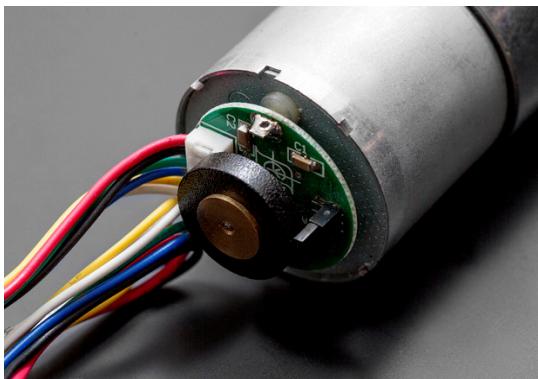


图 3-9 磁式编码器

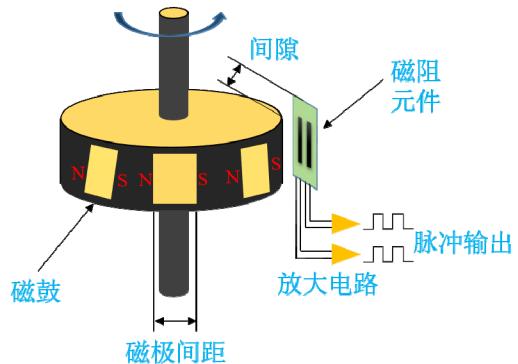


图 3-10 磁式编码器工作原理

经过测试，该电机配备的磁式编码器可以很好的满足移动机器人的精度需求。

3.4.2 姿态传感器

若要实时获取移动机器人的里程计数据，则需对其姿态做出精确可靠的判断，这就需要精度较高的 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度计结合的惯性测量单元，由于需要对原始数据进行积分和推算来获取姿态信息，因此需要数据的精度较高，零点漂移小的陀螺仪和加速度计。当移动机器人响应决策层的动作时，由于外界的干扰如轮子打滑等可能会使得机器人运动轨迹偏离，此时姿态传感器可以起到必要的修正作用，本文采用 MPU6050 作为移动平台的姿态传感器，用于实时获取机器人前进的方向。



图 3-11 MPU6050 姿态传感器

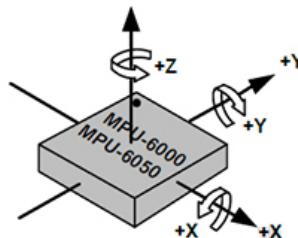


图 3-12 MPU6050 传感器坐标系

MPU-6050 是一个整合了 3 轴加速度计和三轴陀螺仪的 6 轴传感器，

它极大的消除了加速度轴和陀螺仪轴之间耦合的关系，减少了大量的封装空间^[30]。其角速度全格感测范围为 ± 250 、 ± 500 、 ± 1000 与 $\pm 2000/\text{sec}(\text{dps})$ 。其尺寸和精度能很好的满足本文所设计的移动平台。其电路连接也相对简单，Arduino 通过 I2C 获取其中的数据，电路连接示意图如图所示：

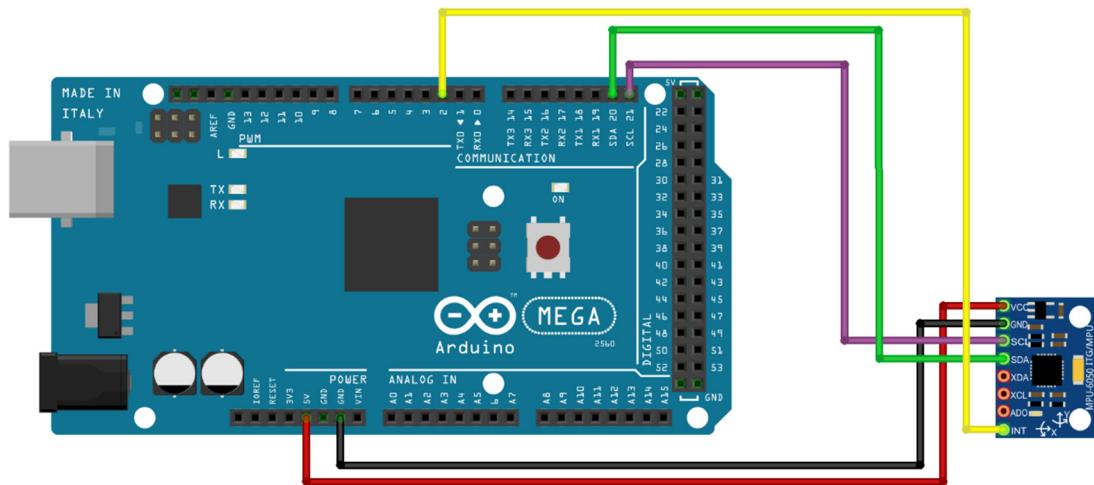


图 3-13 MPU6050 与 Arduino 连接示意图

3.4.3 激光雷达

激光雷达是通过向周围发射激光束来探测周围目标特征的雷达装置。激光雷达作为室内定位与构图的重要传感器^[31]，因为它能通过模型匹配获取移动机器人的绝对位姿并对未知环境构建地图。本文所设计的移动机器人对室内构建 2D 地图，采用了日本 Hokuyo 公司的 URG-04LX 2D 激光雷达，它发射采用正弦波调制的红外激光束，通过测量接收的正弦波的相位延迟进而计算出激光雷达到物体的距离，通过电机带动反光镜可对周围的 240 度，60mm 至 4000mm 的范围内进行扫描，形成一个二维的平面扫描区域^[32]。



图 3-14 Hokuyo 激光雷达

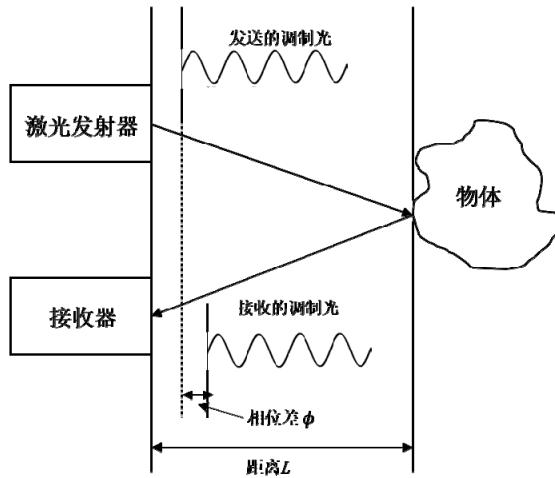


图 3-15 激光雷达工作原理

假设当前红外激光束正打在某一物体表面上（如图 3-15）一点，发射的红外激光束和接收的红外激光束相位差为 ϕ ，且红外激光束的频率为 f ，波长为 c ，那么根据相位差可以计算出此时距物体表面该点的距离为：

$$L = \frac{c}{4\pi f} \phi \quad (3-1)$$

表 3-5 Hokuyo URG-04LX 激光雷达参数表

产品	Hokuyo URG-04LX
电源	5V DC,<500mA
测量距离及范围	0.06-1m, 240 度
精度	0.06-1m: $\pm 10\text{mm}$ 1-4m:距离的 1%
角度分辨率	0.36°(360°/1024 steps)
扫描时间	100ms/scan
扫描角度	360°

由于 URG-04LX 的高精度、高分辨率、宽视场的设计给自主导航移动机器人提供了良好的环境识别能力，且紧凑型的设计极大的节约了安装控件；它不受强光影响，能在黑暗中进行工作，这样能保证本移动平台测量的精确性与稳定性，使得移动机器人整体的鲁棒性得到提升。

3.5 通讯模块

通讯是移动机器人至关重要的一部分，其不仅是对数据传输的有力保障，同时也是人机交互，获得良好用户体验的重要部分。

3.5.1 蓝牙

本文设计的室内移动机器人可以通过蓝牙与用户进行交互，用户通过手机可以对其进行遥控操作让移动机器人在陌生环境中构建地图。经过测试和实验，HC-05 蓝牙模块能很好的满足本文所设计的移动平台。HC05 蓝牙模块通信的有效距离为 10m，这样基本能满足室内的控制需求。

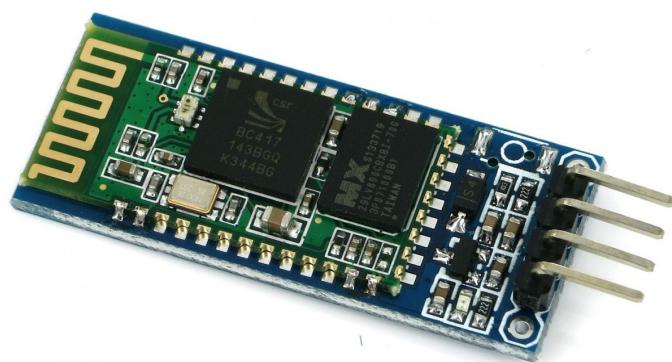


图 3-16 HC05 蓝牙模块

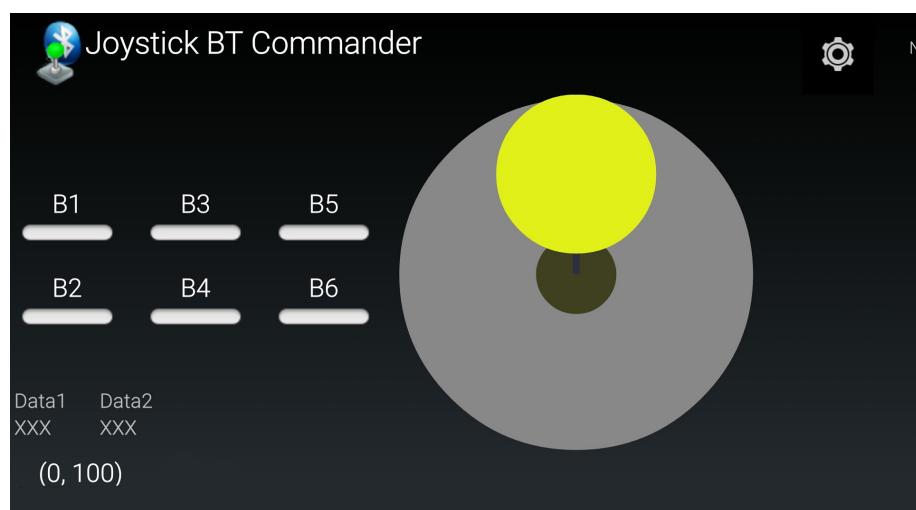


图 3-17 手机操纵界面

如图 4-17 为虚拟摇杆操纵界面，通过手指拨动黄色圆圈可以控制小车的前进，后退以及左右转向，此图为前进示意图，同时 B1-B6 位参数调整按钮，可以对小车行进速度，转弯速度等根据用户需要进行调整。

3.5.2 无线网卡

为了更好实现人机交互这一功能，需要将决策控制层所建立的地图实时能让用户看到并且用户能直接控制移动平台，本文所设计的移动机器人通过无线以太网建立移动平台和用户的交流，采用 Intel N2230 无线网卡，N2230 无线网卡支持 300Mbps 无线以太网并且自带蓝牙 4.0 功能，在本平台中，我们通过无线以太网能够让用户远程监控移动机器人机载 PC 的图像，实现交互功能。



图 3-18 N2230 无线网卡

第 4 章 室内移动机器人的软件设计

针对硬件结构的选型及特性，本章主要介绍了室内定位与建图的机器人的软件架构，并详细介绍了 ROS 中导航框架的组成部分以及本文设计的机器人在 ROS 中的各个节点编写思路。

4.1 机器人的软件架构

用于室内定位与建图（SLAM）的移动机器人的软件部分主要包括了机载 PC 上位机部分的设计以及 Arduino 下位机部分的设计。如图 4-1 所示，Arduino 通过编码器和姿态传感器 MPU6050 融合成里程计的数据通过 TTL 串口与基于 Linux 系统的 ROS 进行通信，激光雷达的数据直接接入 ROS，与里程计数据构成定位与建图的重要部分，同时机载 PC 可以通过无线以太网将所建的地图传输到用户层。用户可实时观察机载 PC 传输过来的图像且可实时通过蓝牙控制本移动平台进行地图的构建。

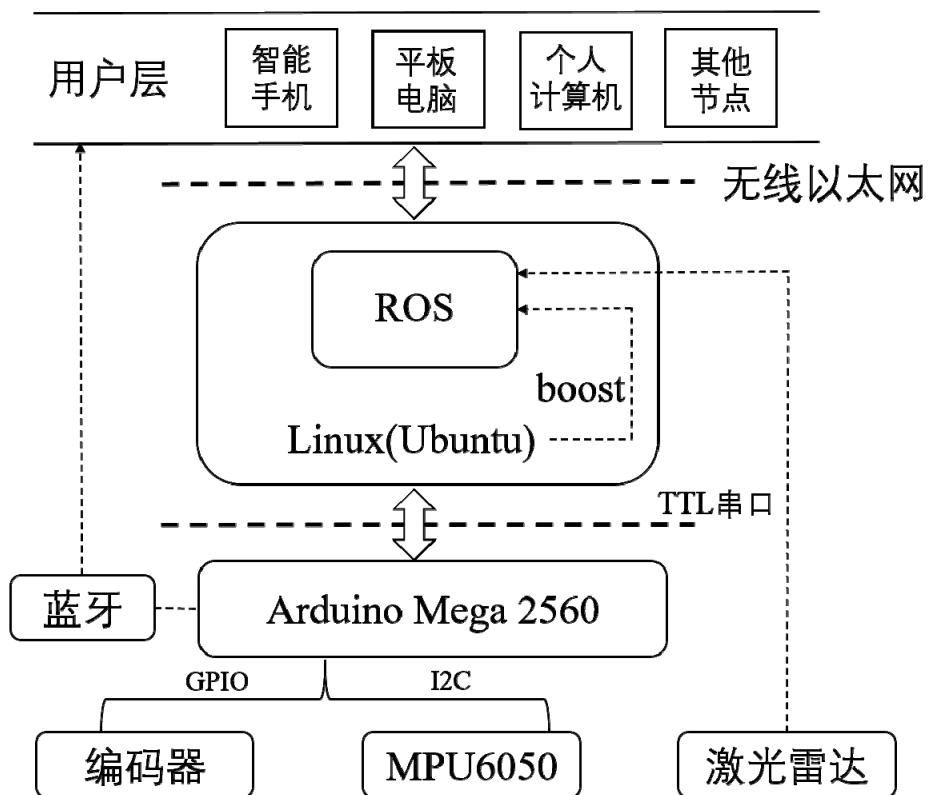


图 4-1 移动机器人软件架构

4.2 下位机软件设计

下位机 Arduino 主要用于获取里程计的数据，并将处理好的数据通过串口将数据发送到 ROS 中用于定位与建图。通过编码器主要获取移动机器人的相对位置，而获取相对位置需要对机器人朝向角进行积分运算，这样在假定已知初始位置的情况下就能推算出机器人此时的位置。

4.2.1 移动机器人姿态获取

本文设计的移动机器人平台假定地面平整，移动过程中平滑，因此可以将机器人的运动近似的看成二维平面运动，将 MPU6050 传感器水平安置在移动机器人平台上，保证 X-Y 平面与水平面平行，结合机器人的运动，只需要获取绕 Z 轴的转角即可知道此时移动机器人的朝向角即偏航角。

MPU6050 传感器是 6 轴姿态传感器，其中包括了 3 轴加速度计和 3 轴陀螺仪数据，一般对其获取原始数据之后需要进行滤波处理，常用的滤波处理有一阶互补滤波，二阶互补滤波和卡尔曼滤波处理。但是 MPU6050 内置了数字运动处理器（DMP）如图 4-2 所示，它可以直接对 3 轴加速度计和三轴陀螺仪数据进行数据处理，其中内置的 DMP 对数据处理采用的是卡尔曼滤波的内核，其处理效果比其他互补滤波处理效果相对较好，经过 DMP 处理后的数据如各个轴的数据，四元素姿态，欧拉角姿态等存储在 FIFO 数据存储器中，Arduino 可通过 I2C 总线协议获取到其中的数据，在本文设计的移动机器人中，我们只需要获取偏航角即可，假设获取到的角度为 θ 。

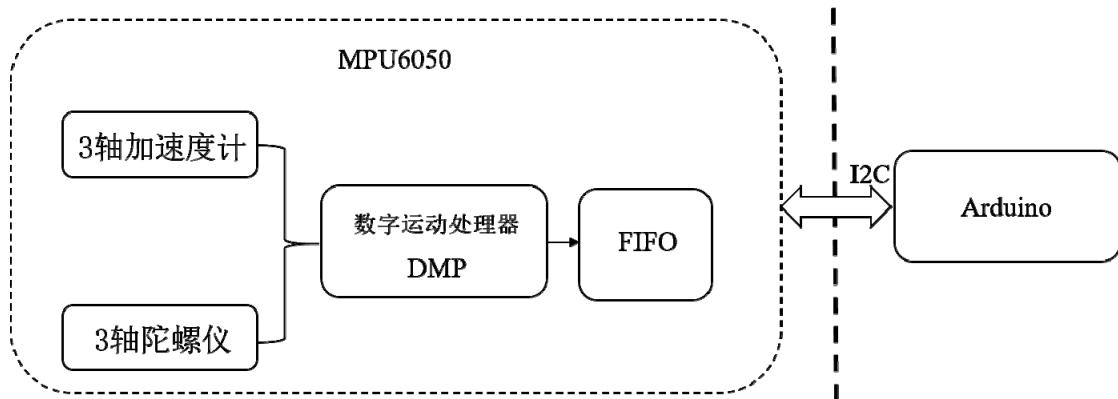


图 4-2 MPU6050 组成及获取姿态原理

4.2.2 移动机器人位置获取

在姿态的计算中已经默认移动机器人的 SLAM 运用过程中是平坦的，不存在垂直于地面的起伏运动，通过编码器计算的速度值和姿态传感器获取的角度值融合计算出移动机器人的当前位置。

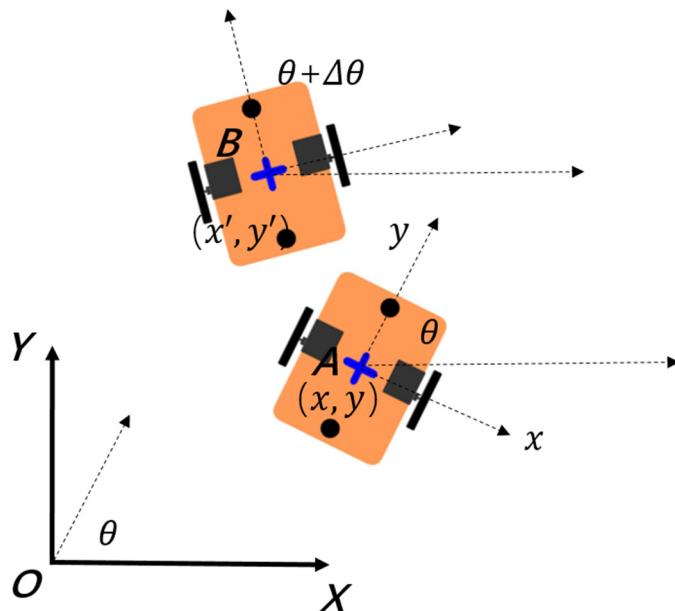


图 4-3 移动机器人位置推算示意图

如图 4-3 所示，假设机器人的全局坐标系为 XOY ，此时移动机器人在全局坐标系中的位姿为 $A(x, y, \theta)$ ，假设 Δt 为磁电式编码器脉冲产生的固定周期，假设在 Δt 内，机器人从 A 移动到 B 点，且转角为 $\Delta\theta$ ， v_l 和 v_r 分别为左右两轮的速度，则可以得到

$$\bar{v} = (v_l + v_r) / 2 \quad (4-1)$$

则移动机器人在 Δt 时间内位置该变量为

$$\begin{aligned}\Delta x &= \bar{v} \cos(\theta + \Delta\theta) \bullet \Delta t \\ \Delta y &= \bar{v} \sin(\theta + \Delta\theta) \bullet \Delta t\end{aligned} \quad (4-2)$$

由此可以知道在时刻，移动机器人的位姿为 $B(x', y', \theta')$

$$\begin{aligned}x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \\ \theta' &= \theta + \Delta\theta\end{aligned} \quad (4-3)$$

由上式可以看出，采用编码器和角度数据推算出移动机器人的相对位姿适合在区域较小的范围内使用，本文设计的移动机器人主要在室内使用，这样使得计算速度快，成本较低，性能相对稳定，但在计算过程中涉及到了积分，会因为姿态传感器的抖动，编码器的精度产生累积误差，累计误差在本文设计的室内移动机器人采用了激光雷达数据对位置进行修正^[33]。

编码器和里程计数据经过融合之后形成里程计数据发布到 ROS 中，在 ROS 的可视化工具集 Rviz 中对里程计数据进行了测试，其中 `odom` 为里程计坐标系，`base_footprint` 为移动机器人基体坐标系，可以看出，里程计的数据相对稳定，偏差也在可接受范围之内。

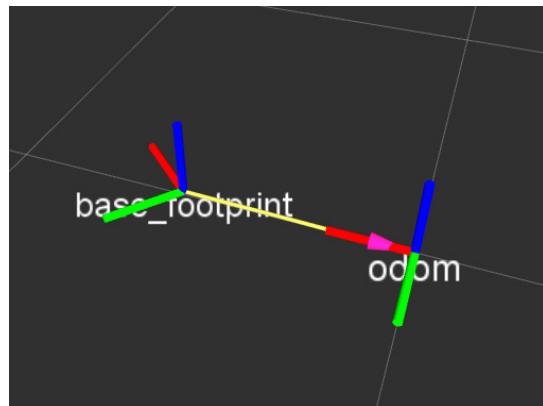


图 4-4 移动机器人坐标变换



图 4-5 移动机器人实物位置图

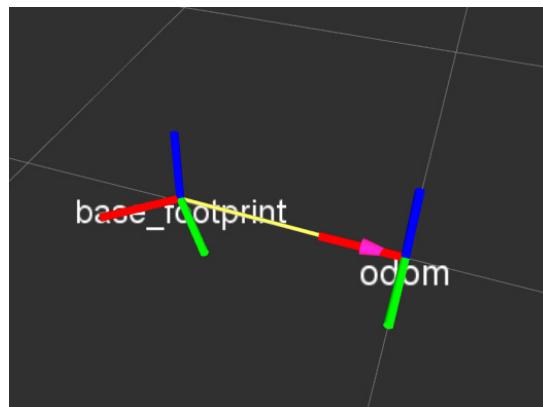


图 4-6 移动机器人坐标变换



图 4-7 移动机器人实物位置图

4.3 移动机器人在 ROS 中导航框架

移动机器人若要在位置环境中能实现定位和导航，那么需要依靠强大的算法同时会消耗极大的计算资源且需要大量的缓存空间用于保存所建立的地图，如果单纯的依靠运动控制模块比如嵌入式系统来进行存储，那么将无法做到实时性且计算性能远远不足^{[5][35]}。所以在本文所设计的移动机器人中搭载了机载 PC 用于构建 ROS 系统，将复杂的定位与导航算法在机载 PC 上实现，同时机载 PC 拥有丰富的存储资源便于机器人存储地图。机载 PC 与运动控制模块通过串口进行通信而与用户层则通过无线以太网进行点对点通信^{[3][4]}。

4.3.1 定位与导航框架

移动机器人的定位与导航的总体框架如图所示，其中每个方框内部均为 ROS 中的一个分布式节点。

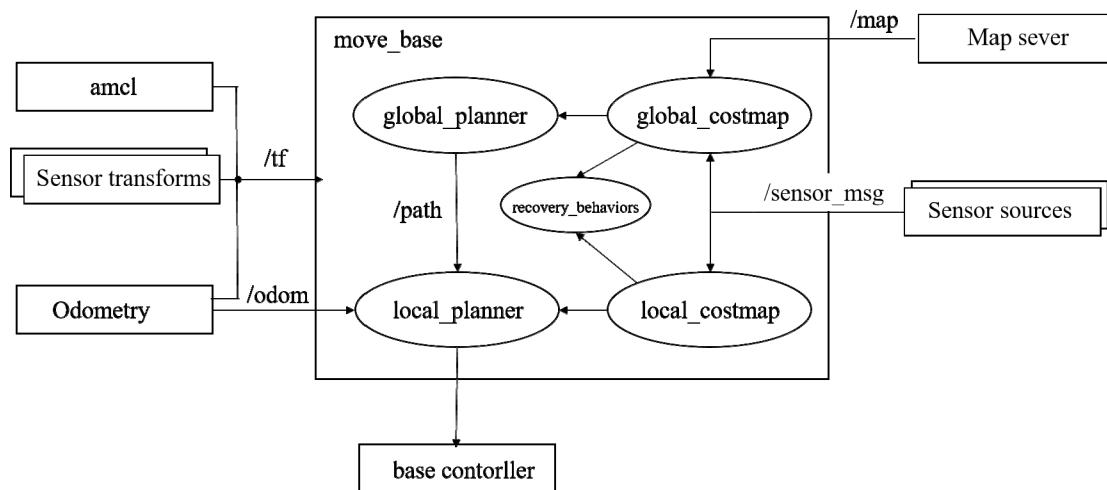


图 4-8 ROS 定位与导航框架

下面对 ROS 定位与导航框架中的重要节点做出以下解释：

- Sensor transforms:** 移动机器人的坐标系变换，其中包括各个传感器基于世界坐标系和移动机器人基体坐标系的坐标变换。
- Odometry:** Arduino 端打包发送的里程计数据通过串口传输到 ROS 系统。

统中，再由 ROS 发布里程计节点。

- c. **Sensor sources:** 机器人所采集的深度信息，本文采用的是激光雷达数据。
- d. **Map server:** 根据里程计数据和激光雷达数据融合之后进行未知环境地图建模，并且发布地图数据。
- e. **global_planner:** 全局地图路径规划，根据用户设置的目标位置，结合当前构建的地图以及机器人自身位置计算出的到达目标位置路径的最优解，并将该信息以 ROS 的节点消息发布^[35]。
- f. **local_planner:** 局部路径规划，基于全局路径规划，再根据机器人当前里程计信息，控制每个周期的最优速度和角度。

从上面的 ROS 定位与导航框架中可以看出，ROS 在定位与导航框架采用分布式节点，在搭建自己的移动机器人时需要保证节点的数量和节点数据格式的正确性，主要需要提供机器人的坐标信息变换，里程计数据以及激光雷达数据^[34]。

4.3.2 移动机器人坐标系变换

ROS 导航包中需要传感器与基体的坐标系变换，这样对移动机器人导航很有意义，坐标系的变换可以将激光雷达的数据从安装位置变换到移动机器人中心，这样对移动机器人的局部导航起到了作用，使得移动机器人能够实时知道机器人中心距离障碍物的实时距离。如图 5-9 所示，一个完整的 ROS 导航包运行时，其坐标系变换如下：

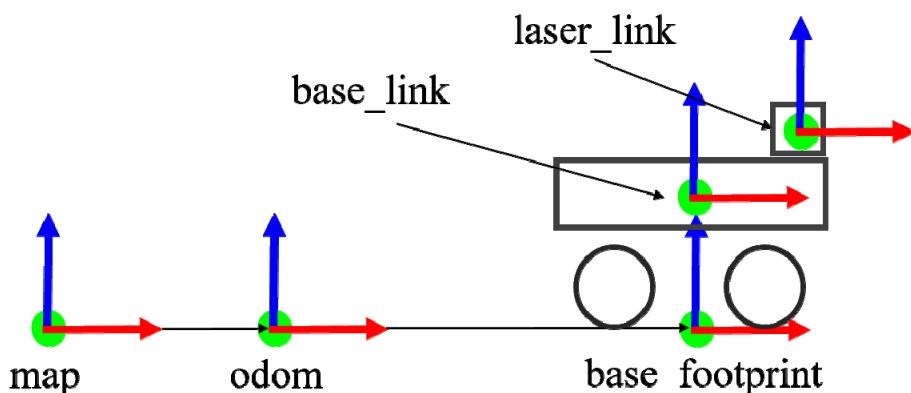


图 4-9 移动机器人坐标系变换示意图

其中 `base_link` 位于坐标树的根部，一般为机器人中心，为相对于机器人自身的本体坐标系；`odom` 为里程计坐标系，它是对于机器人全局位姿的粗略估计，这个坐标系的数据也来源于里程计；`map` 为构建地图的坐标系，一般与 `odom` 坐标系相连，与 `odom` 同为全局坐标系；`laser_link` 则为激光雷达坐标系；`base_footprint` 一般与 `base_link` 坐标系连接，一般不是必须的。本文设计的移动平台的坐标系变换如下图所示

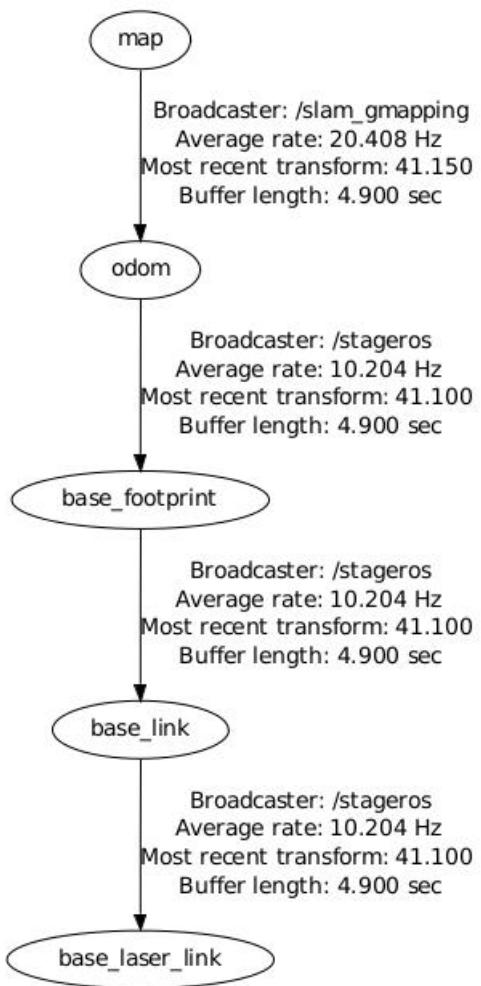


图 4-10 移动机器人坐标系变换

4.3.3 激光雷达数据的读取

本文设计的移动机器人采用 Hokuyo URG-04LX 激光雷达，它可以扫描角度达到了 240° ，且扫描周期为 100ms，考虑到扫描精度问题，取 180° 作为激光雷达的数据，图 4-11 为激光雷达在 Rviz 中的可视化数据。

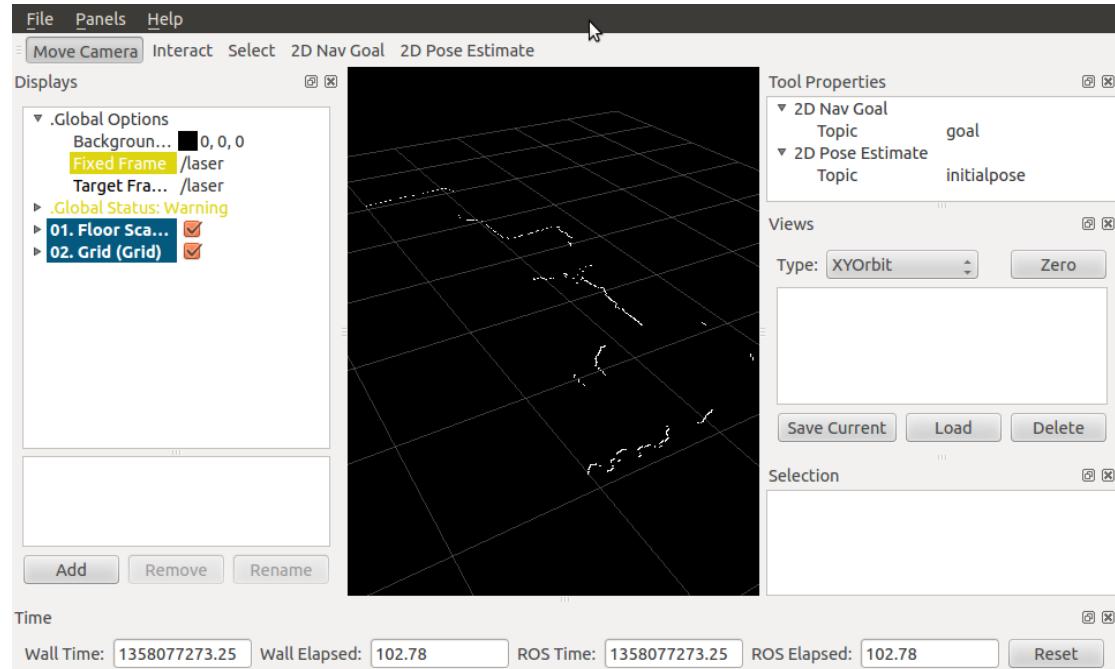


图 4-11 rviz 中激光雷达扫描图

ROS 中提供激光雷达的驱动，因此只需要运行激光雷达节点并将主题 `/scan` 发布到 `slam_gmapping` 中即可，其节点图如图 4-12 所示

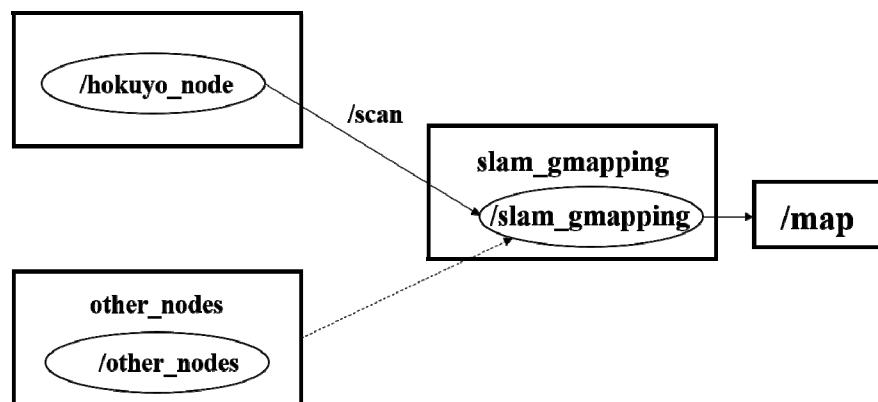


图 4-12 ROS 中激光雷达节点图

第 5 章 室内移动机器人 SLAM 综合实验

本章主要对室内移动机器人在 ROS 中进行了室内定位和导航的仿真实验，并对实际搭建的硬件实物平台进行了实物验证实验，验证算法的可行性。

5.1 室内 SLAM 仿真

仿真作为搭建机器人实体之前的一个重要步骤，也是复杂系统研制过程中必不可少的手段，通过仿真可以验证所设计机器人移动平台的合理性与稳定性，同时可以验证算法的可行性与鲁棒性，用计算机对世界环境以及设计的机器人进行仿真，可以大大加快研发进度。

本文所设计的移动机器人使用 Gazebo 软件进行移动机器人仿真，一个良好的仿真环境，它可以快速测试算法，设计机器人，并执行回归测试，优化机器人的设计和算法设计。Gazebo 能够提供准确和有效地室内和室外环境。Gazebo 拥有强大的物理引擎，高品质的图形，以及方便的编程和图形界面。

5.1.1 室内定位与建图的仿真

在仿真之前需要建立自己的机器人，Gazebo 并不是类似于三维建模软件如 SolidWorks，Inventor 等。Gazebo 采用编程语言来定义移动机器人的各个关键，同时还需要定义移动机器人各个关键坐标系直接的关系，这一点与 ROS 导航系统中的 TF 树相互对应，建立其机器人模型并搭建坐标系变换。如图 5-1 所示，搭建简单的机器人模型，由于 Gazebo 中是考虑了外界各个部分的外力作用和碰撞作用，考虑机器人的稳定性，采用了四轮的设计，这和真实设计的机器人虽然有所差别，但是 Gazebo 中里程计的接入和控制机器人的方式均是以控制机器人基体坐标系为准，所以并不考虑轮子的转动。也就是 Gazebo 中里程计的数据是绝对准确的，它并不是通过编码器和姿态传感器来融合里程计，而是根据中心坐标系与原始坐标系的关系自动生成的里程计的数据，可以认为小车实际上在 Gazebo 环境中是做平面的滑动。

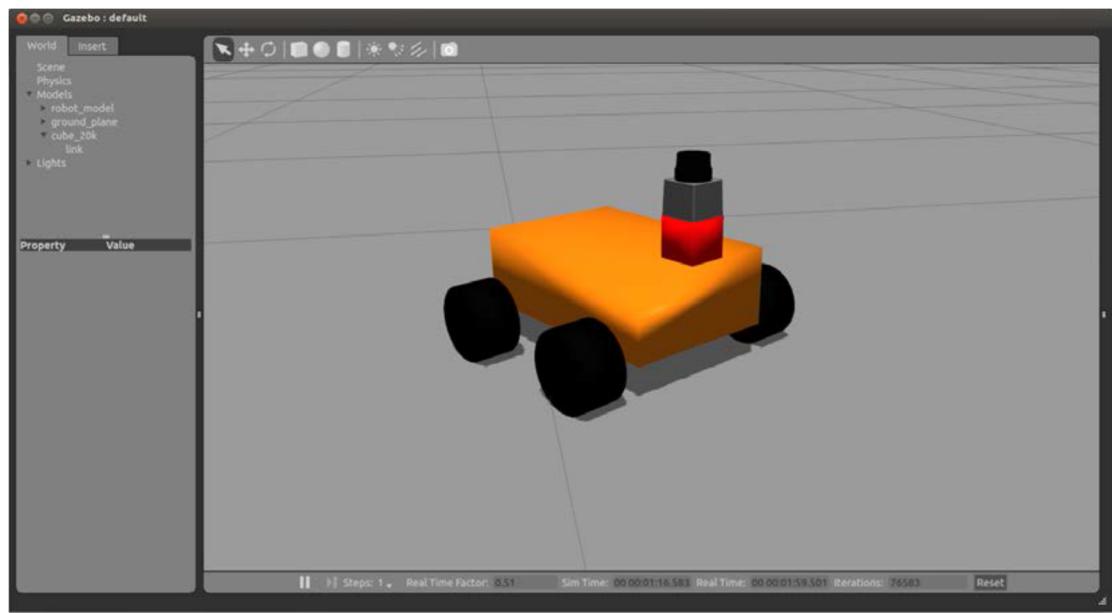


图 5-1 Gazebo 移动平台模型

Gazebo 提供了强大的物理仿真环境，提供了常用传感器的仿真，如上图所示，在 Gazebo 中模拟 Hokuyo 激光雷达，它能实时模拟激光雷达采集的数据，其物理特性与真实传感器保持一致。本文设计的移动机器人主要针对室内的地图重建与导航，在 Gazebo 中模拟办公室的场景，搭建如图 5-2 所示的模拟场景，这跟室内场景较为拟合，能验证定位与建图算法的可行性。



图 5-2 Gazebo 中搭建的模拟环境

Gazebo 能与 ROS 进行联合仿真，ROS 中主要用 Rviz 作为可视化工具，可以查看机器人模型，坐标系变换，激光雷达可视化数据等。所以在 Gazebo 中主要仿真机器人实体在真实物理环境中行进时的过程，而 ROS 中 Rviz 则是对地图进行重建。如图 5-3 所示，可以看到在初始位置时激光雷达对地图进行了重建，并且将可扫描范围内的地图建立在 Rviz 中。

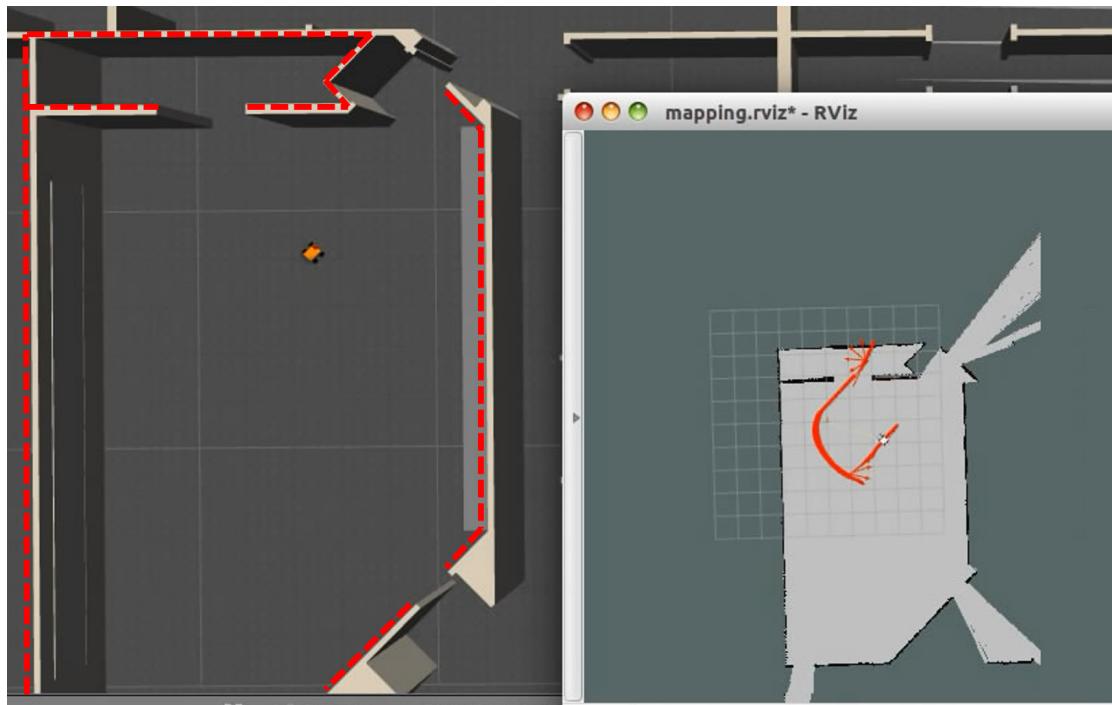


图 5-3 Gazebo 与 Rviz 联合仿真

让小车在模拟环境中行走，便可以实时构建地图，当然由于机器人使用的是 2D 激光雷达，所以只能生成与激光雷达扫描平面重合的地图。其构建地图的准确性可以达到要求，地图并未出现明显的偏离以及重合，没有出现错误的构建，验证了粒子滤波算法的可行性。

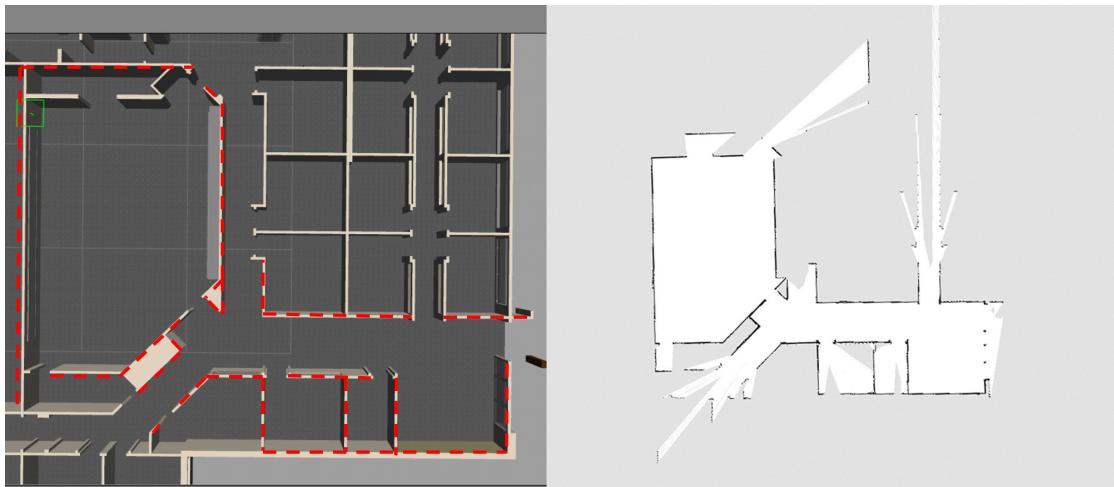


图 5-4 室内定位与建图仿真

室内环境并不是一成不变的，尤其是现实生活中，室内场景是不断变化的。其中包括物体位置的移动，人体位置的移动，这都对实时具有考验性，在已经构建的地图上继续放置一些新的东西，模拟物体位置的变化。如图所示，在 Gazebo 中放置一个立方体，并移动机器人运动，可以看出 Rviz 中地图能够实时构建出来。



图 5-5 地图更新实验图



5-6 地图更新效果

5.1.2 室内导航仿真

移动机器人另一个重要的功能就是导航，导航是建立在移动机器人定位精准上的一个任务，该任务是让机器人自主从当前位置以合理的方式合理的路径移动到目标位置。本文所设计的移动机器人采用粒子滤波算法对机器人进行定位，而在导航则使用的是自适应的蒙特卡洛算法。如图 5-7

所示，分布在移动机器人周围的红色箭头即为随机粒子，可以看到粒子集中数量最多的地方即为移动机器人所在的地方，粒子会根据机器人的移动不断更新，起到不断定位的作用，严格意义上来说粒子的方向应该与移动机器人的朝向是一致的，但实际上有些粒子并不是严格意义上的方向一致。如图 5-8，这是因为考虑了环境噪声的影响，这也能说明算法的鲁棒性。

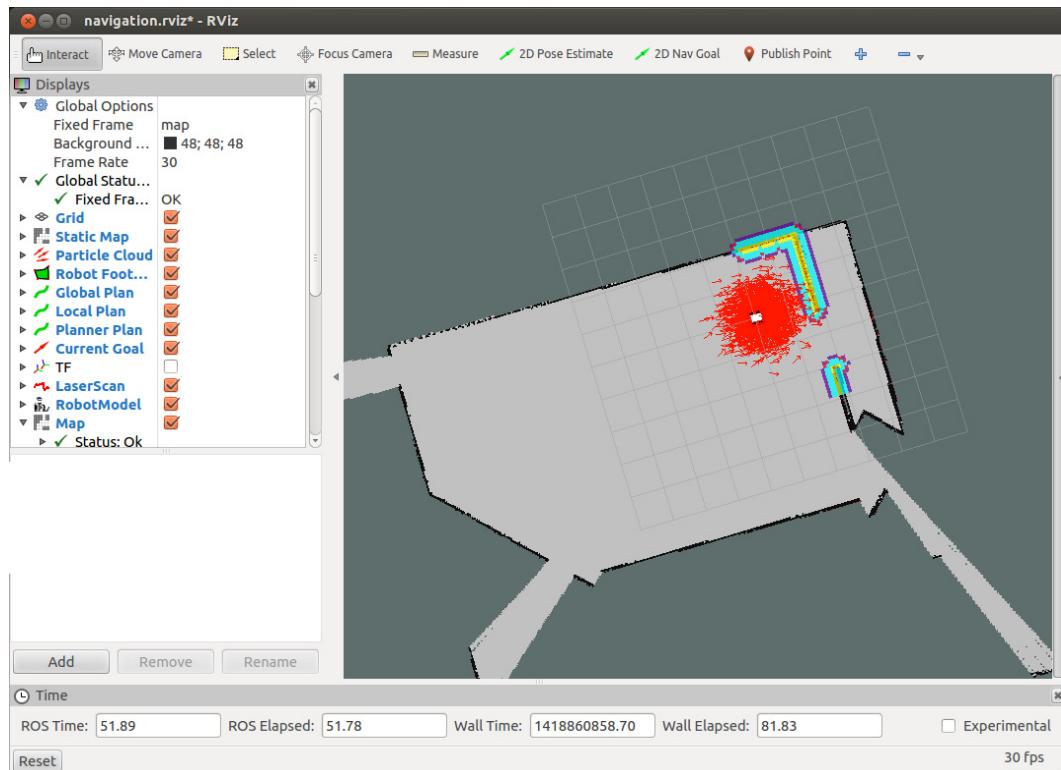


图 5-7 移动机器人定位示意图

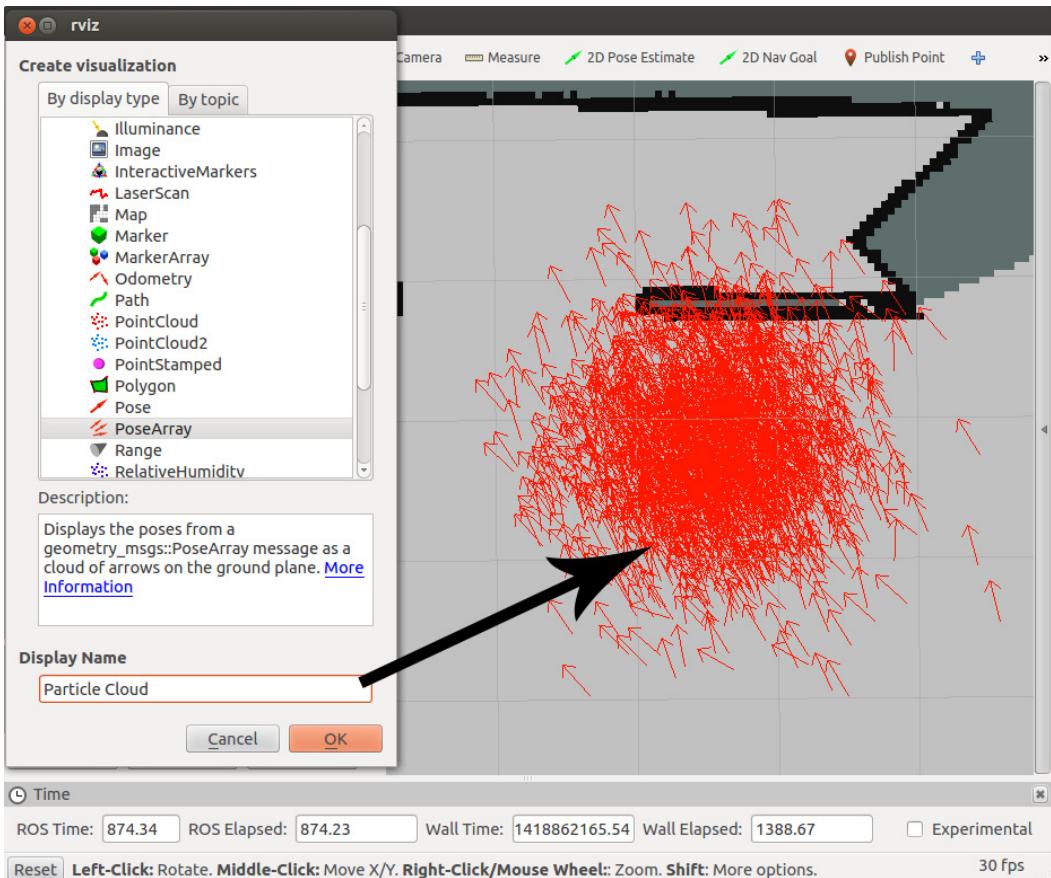


图 5-8 粒子滤波算法中的粒子

对于机器人来说，如果已经基本能定位也就是说机器人已经知道自己位置了，那么下一步就是机器人导航问题，也就是说剩下要解决“我该到哪去”问题和“我该怎么去”的问题了。如图 5-9 所示，红色箭头表示目标位置，其中包括了平面坐标和朝向角，那么绿色线条是由机器人自身计算出的全局路径规划，也就是一个整体的路径规划，而靠近移动机器人自身的蓝色短线条则是局部路径规划，移动机器人根据当前的速度和加速度等规划出当前适应全局规划的最优路径，同时局部路径规划在避障中起到了重要作用。因为假设目标点与起始点相对较远，那么在机器人移动的过程中，在其规划出的路径很有可能出现新的障碍物，这时候局部路径规划就起到了避障和导航的双作用。

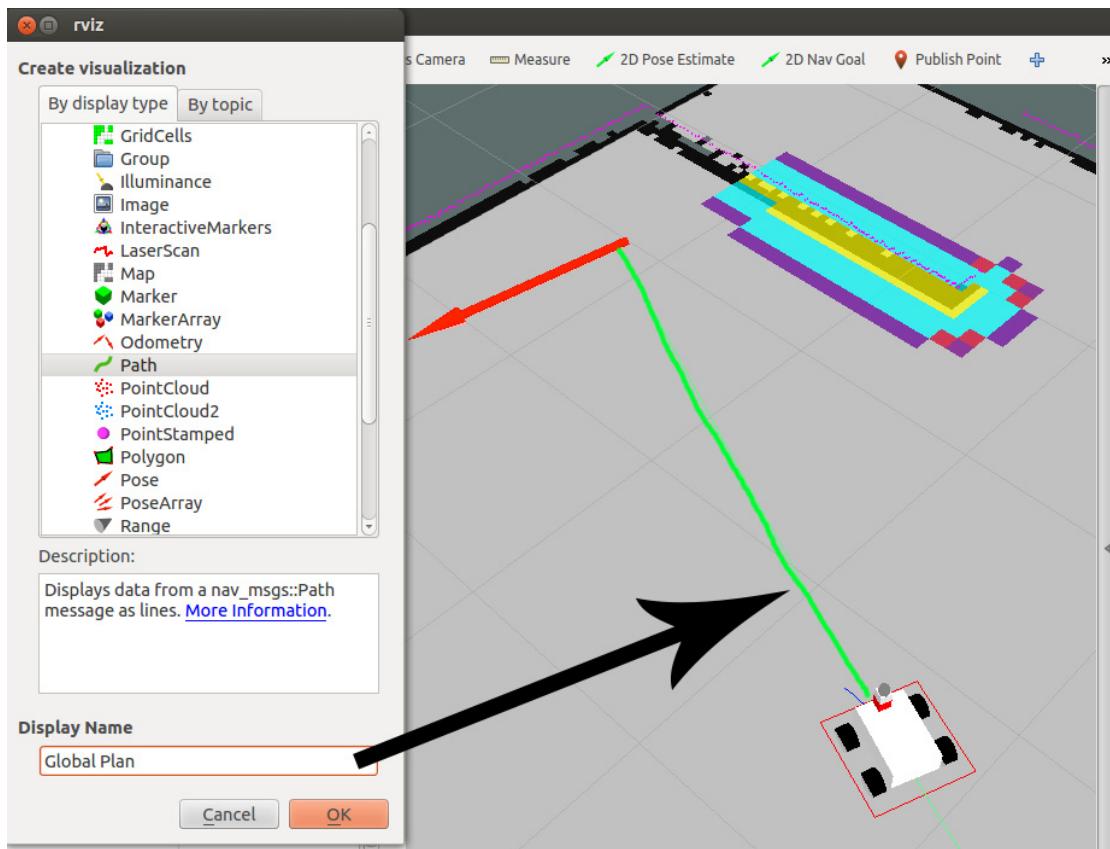


图 5-9 移动机器人导航仿真

5.2 室内定位与建图实验

在仿真得到较为理想的效果之后，对所搭建的硬件平台进行了实物验证实验，在室内搭建一个模拟环境，该环境约为 3×3 米的正方形空间，在该正方形中间增加了一道屏障，如图 5-10 所示，用于测试算法的稳定性。

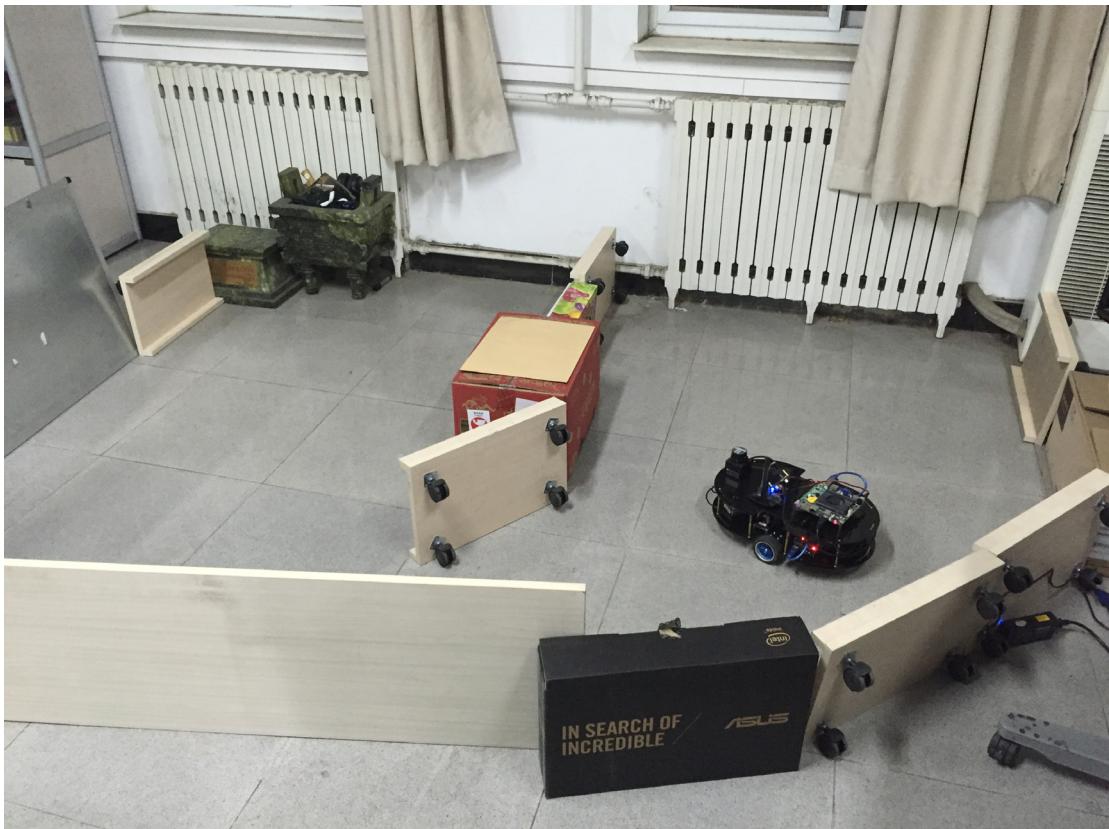


图 5-10 实验验证环境

控制移动平台在环境中进行地图验证实验，此实验是半自主实验，通过蓝牙控制小车在该环境中进行移动可以完成 SLAM 的整个过程。如图 5-11 所示，在 Rviz 中可以得到实时更新的机器人位置以及环境描绘出的环境地图，其中图中坐标系位置即表示当前移动平台的位置，绿色线条则表示移动机器人行驶的路径。图 5-11 右上角出现了重叠部分和“错建”部分的地图，重叠部分的原因是因为当构建地图的最初阶段时粒子滤波算法的定位可能会出现一些偏差，而且里程计数据初期也属于矫正阶段，需要一定的时间稳定。而“错建”部分的行程则是由于搭建环境中存在缝隙，激光雷达是以扫描时透过缝隙扫描到了更远处的位置。

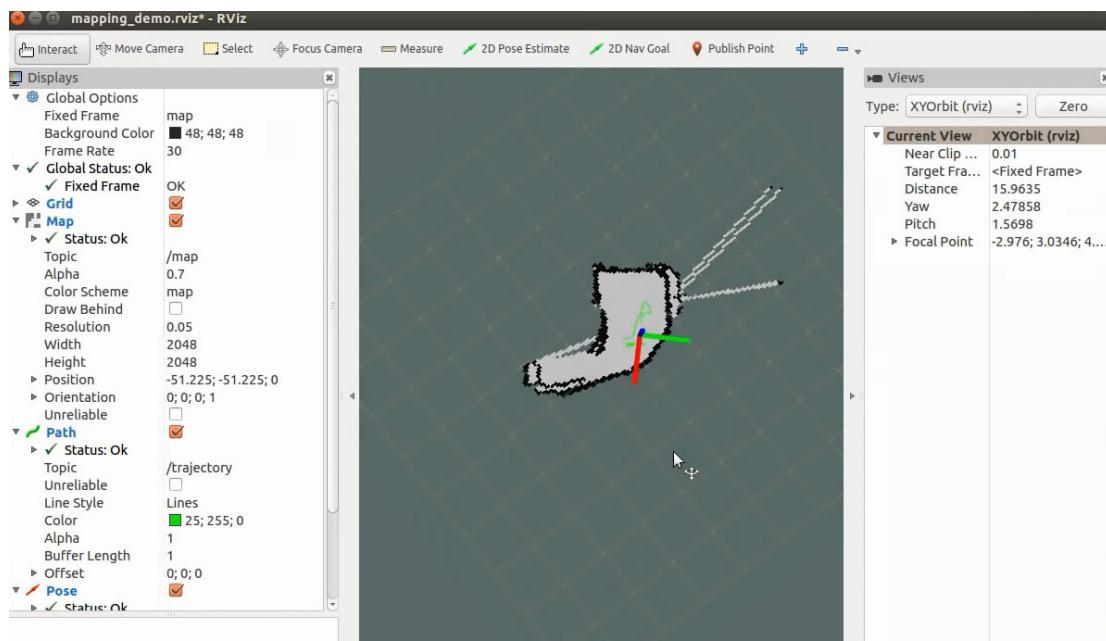


图 5-11 移动机器人实验过程图

继续让移动平台继续在实验环境中前进，地图会随之继续刷新，如以下两图所示，图 5-12 为此刻移动机器人所处环境中的位置所建立的地图。

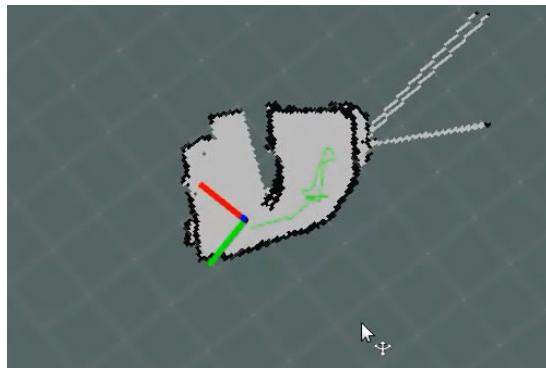


图 5-12 移动机器人构建的地图

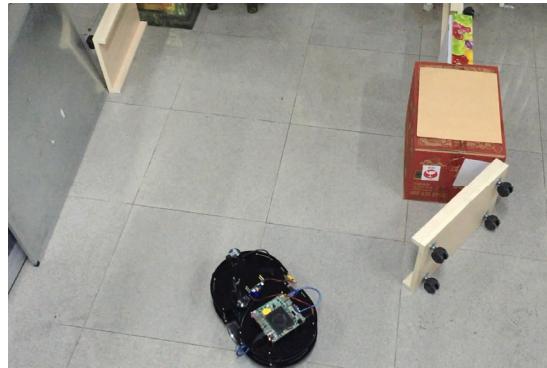


图 5-13 移动机器人实验过程图

构建地图的过程是由机载 PC 完成的，因为其中涉及到大量的运算，尤其是对粒子滤波在算法在定位应用中的实现，从实现效果来看，其定位和构建效果还是相对比较理想的。

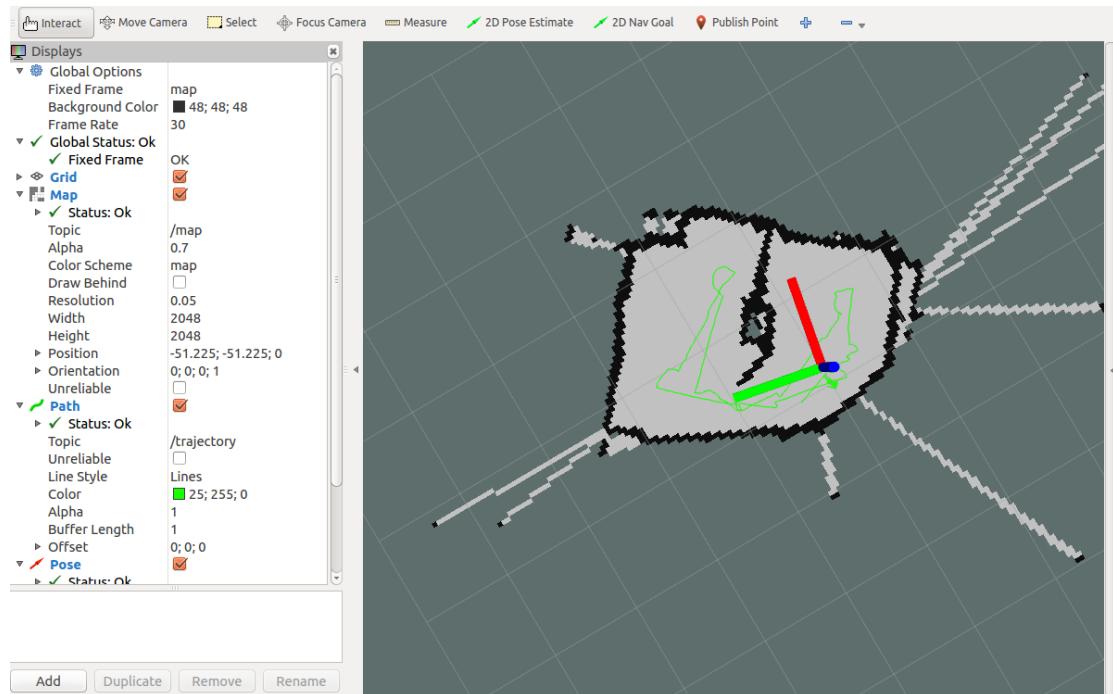


图 5-14 移动机器人构建的完整地图



图 5-15 移动机器人实验环境图

第 6 章 总结与展望

基于上文介绍的室内移动机器人的功能和软硬件设计，本章对室内移动机器人的应用前景进行了展望，对本文设计的移动机器人的技术要点进行了总结。

6.1 技术要点

本文设计的移动机器人能够对室内的未知环境进行二维的地图构建，主要有以下几个技术特点：

- 1) 搭建的实验平台通过差动式驱动控制，可通过蓝牙控制平台全方位运动且实时精准的反馈里程计数据；
- 2) 利用粒子滤波融合里程计和激光雷达的数据实现移动机器人在位置环境中的定位问题，在此基础上对环境进行二维地图的构建；
- 3) 良好的用户体验，用户可以通过无线以太网在手机客户端或电脑实时监测二维地图的构建。

6.2 工作总结

机器人领域是多学科的交叉，其中涉及到机械学、电子学、结构学、动力学、控制理论、传感技术等多领域学科。在地面移动机器人当中有很多研究方向，其中自主导航就是一个重要的研究方向，也是一个热门的研究方向，其核心目标就是要让机器人在完全自主的情况下，从当前位置移动到任意合理的目标位置。而移动机器人的实时定位与建图（SLAM）就是自主导航的基础，也就是机器人必须要知道机器人当前的位置与环境的具体关系才能进行导航这一步骤。本文所设计的移动机器人就是针对机器人实时定位与建图这一问题而开展的，并对机器人 SLAM 问题的一些核心定位算法与实际应用进行了细致的研究。

针对机器人实时定位与建图（SLAM）这一问题，本文主要完成了以下工作：

- 1) 搭建了用于室内移动机器人实时定位与建图的硬件实验平台并且完成了平台软硬件接口的设计。

- 2) 在设计移动机器人驱动的模型基础之上，对移动机器人的数学模型和环境模型进行了描述。
- 3) 在阅读大量的国内外相关文献的基础上，分析了多种定位算法，最后结合二维室内定位的问题细致研究了粒子滤波算法在实时定位与建图(SLAM)中的应用。
- 4) 学习了开源机器人操作系统(ROS)且利用ROS强大的导航堆栈对机器人SLAM问题进行了仿真，同时也对导航进行了仿真。
- 5) 搭建出用于室内SLAM的移动机器人平台，并用该平台实现了室内的SLAM算法的研究，构建出室内的二维地图，验证了项目的可行性。

6.3 展望

虽然已近投入了大量的精力在该机器人的研发中，但是由于技术水平和研究经费的限制，该机器人依然存在一些可以改进的地方：

- 1) 移动机器人底盘驱动采用的是差动式驱动，可以采用全向轮或者麦克纳姆论驱动的形式，使得机器人运动更加灵活。
- 2) 室内环境下本文设计的移动机器人对地图的构建有较好的效果，但是如果延伸到地形复杂，环境变化较大的室外，如何解决室外环境下对移动机器人的SLAM问题是一个研究方向。
- 3) 移动机器人只是对二维地图的构建，但通常环境都是三维信息的，所以对三维真实环境中的SLAM问题的研究是之后要解决的问题。
- 4) 目前只实现且实验了搭建的移动机器人的定位与建图问题，而导航问题是高于定位的问题，这也是未来的关键研究方向之一。
- 5) 当前值实现了一个室内移动机器人的SLAM问题，多机器人协同操作是机器人领域的热点，所以开发并解决多机器人协同操作并进行信息交互的SLAM问题时热点之一。

提到机器人导航问题，可以归结为由MIT教授John J.Leonard和原悉尼大学教授Hugh Durrant-Whyte提出的三个问题：“(1)Where am I? (2)Where am I going? (3)How should I go there?”。第一个问题是机器人的定位问题，即机器人如何根据外界传感器信息判断其自身在环境中的位置，而第二个和第三个问题则是建立在第一个问题的基础之上，定位也是机器人自主导航的基础，定位的精准很大程度上决定导航的精确度，激

光雷达在 SLAM 中起到了举足轻重的作用，但其价格相对还是较高，未来随着视觉定位算法的兴起，弱硬件，强算法是未来机器人 SLAM 的主流，这样，具备自主导航的移动机器人才能有亲民的价格，亲民的体验和亲民的服务。

致谢

时光荏苒，岁月匆匆，随着毕业论文的完稿，生命中纯美的学生时代也即将结束。此时此刻，内心百感交集，思绪纷乱，即充满欣喜和感激，又夹杂不舍和失落。在本科生涯结束之际，回首十几年的求学之路，历经艰辛和坎坷，充满迷茫与苦闷。幸运的是，在我求学的每个阶段，都遇到了很多良师益友，在学习、生活上给予了我热情的帮助，在我迷茫困惑之时为我指点迷津，在我喜获成功之际与我分享快乐。感激之情，无以言表，谨以最朴实的语言致以最衷心的谢意。

首先，我要深深的感谢我的导师罗庆生教授，本论文的工作是在罗老师的悉心指导下完成的。做毕业设计期间，罗老师始终给予我精心的培养和无微不至的关怀。罗老师渊博的专业知识，严谨的治学态度使我受益匪浅。在此，我向罗老师表示最崇高的敬意和最真挚的感谢！

感谢林俊钦、赵明、赵嘉珩、徐峰、赵锐、高萌、朱琛、王雪慧等师兄师姐在工作和生活中给予我的支持和帮助。特别感谢林俊钦、赵明、赵嘉恒师兄，是你们营造了如此融洽的实验室气氛，让我能够踏实的学习和科研，期间你们给予了我许多帮助和支持，历历在目，感激在怀。感谢在实验室一起做毕设的同窗们，这几个月共同的学习生活使我们结下了深厚的友谊，我将永远怀念这个优秀的大集体。

特别需要感谢的是我的父母，你们养育了我，爱护着我，你们为我付出了太多的艰辛，承受了太多的辛苦，是你们在物质和精神上无尽的支持才使得我走到今天。父母恩情，倾尽时间辞藻亦难尽述，我唯有永怀感恩之心，用自己的努力来回报你们。真诚祝福你们身体健康，平安幸福！

最后，我要感谢我的母校北京理工大学，四年的青春在这里升华，从当初的懵懂少年，到现在的热血青年，在这里我学会了求知，懂得了飞翔。转眼毕业，内心却如此不舍，千言万语道不尽，一草一木皆生情。今后，我将秉承“德以明理，学以精工”的校训，再接再厉，在新的人生路上奋力拼搏，也祝愿北京理工大学英才毕业，再续辉煌！

参考文献

- [1] Moravec H P, Elfes A. High resolution maps from wide angle sonar[C]/Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on. IEEE, 1985, 2: 116-121.
- [2] M. Quigley et al., ROS: an open-source Robot Operating System.InIEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA),Workshop on Open Source Software, 2009.
- [3] Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard: Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters, IEEE Transactions on Robotics, Volume 23, pages 34-46, 2007
- [4] Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard: Improving Grid-based SLAM with Rao-Blackwellized Particle Filters by Adaptive Proposals and Selective Resampling, In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2005
- [5] Hu C, Hu C, He D, et al. A new ROS-based hybrid architecture for heterogeneous multi-robot systems[C]/Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese. IEEE, 2015: 4721-4726.
- [6] Araújo A, Portugal D, Couceiro M S, et al. Integrating Arduino-based educational mobile robots in ROS[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 77(2): 281-298.
- [7] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2002, 50(2): 174-188.
- [8] Chen Z. Bayesian filtering: From Kalman filters to particle filters, and beyond[J]. Statistics, 2003, 182(1): 1-69.
- [9] Jacoboni C, Reggiani L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials[J]. Reviews of Modern Physics, 1983, 55(3): 645.
- [10] Ristic B, Arulampalam S, Gordon N J. Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications[M]. Artech house, 2004.
- [11] 王艳强. 仿人家庭移动服务机器人应用研究[D].内蒙古科技大学,2011.
- [12] 陈光明. 多机器人协同定位与环境地图构建研究[D].广东工业大学,2011.
- [13] 李瑞. 基于 Android 的小型移动机器人系统设计[D].浙江理工大学,2014.
- [14] 王鸿鹏. 云机器人平台上的 ROS 体系[J]. 中国信息界-e 制造, 2015(5):20-21.

- [15] 张建伟,张立伟,胡颖,张俊.开源机器人操作系统—ROS[M].北京:科学出版社,2012:36.
- [16] 邹帆. 基于神经网络的多轴教学机器人控制系统的设计与实现[D].湖南大学,2012.
- [17] 张子迎. 多机器人协作及环境建模技术研究[D].哈尔滨工程大学,2009.
- [18] 季秀才. RoboCup 小型组机器人运动控制研究[D].国防科学技术大学,2003.
- [19] 李晋惠,白朝政. 基于确定性重采样的粒子滤波算法[J]. 西安工业大学学报,2012,11:891-894.
- [20] 尹郭靖,刘国海,梅从立,张静. 基于粒子滤波和过程模型的动态数据校正[J]. 计算机与应用化学,2011,07:911-914.
- [21] 李冀. 基于粒子滤波神经网络的倒立摆控制系统[J]. 微计算机信息,2010,34:82-83.
- [22] 冯四风. 基于粒子滤波的混沌通信信号处理[D].河南理工大学,2011.
- [23] 王法胜,鲁明羽,赵清杰,袁泽剑. 粒子滤波算法[J]. 计算机学报,2014,08:1679-1694.
- [24] 周帆,江维,李树全,张玉宏,曾雪,吴跃. 基于粒子滤波的移动物体定位和追踪算法[J]. 软件学报,2013,09:2196-2213.
- [25] 梁军. 粒子滤波算法及其应用研究[D].哈尔滨工业大学,2009.
- [26] 张松林. Arduino 控制器和手机蓝牙互通信的方法和实现[J]. 电子测试,2014,24:12-13.
- [27] 李照刚. 可展轮式移动机器人分析与运动控制[D].哈尔滨工业大学,2013.
- [28] 高超. 移动机器人的定位与地图构建研究[D].内蒙古科技大学,2014.
- [29] 廖红伟,杨晓非. 磁旋转编码器的发展及其应用[J]. 信息记录材料,2003,01:40-44.
- [30] 叶龙. 基于 MPU6050 传感器的方位角倾角算法研究[D].吉林大学,2015.
- [31] 文斐. 激光雷达数据采集系统框架研究[D].中国科学技术大学,2013.
- [32] 倪晓清. 基于视觉与激光的移动机器人环境识别研究[D].苏州大学,2013.
- [33] 于清晓. 轮式餐厅服务机器人移动定位技术研究[D].上海交通大学,2013.
- [34] 蔡自兴,郑敏捷,邹小兵. 基于激光雷达的移动机器人实时避障策略[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,02:324-329.
- [35] 胡春旭,熊枭,任慰,何顶新. 基于嵌入式系统的室内移动机器人定位与导航[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013,S1:254-257+266.
- [36] 汪贵冬. 移动机器人在未知环境下的实时定位与建图研究[D].安徽工程大学,2015.
- [37] 曲丽萍. 移动机器人同步定位与地图构建关键技术的研究[D].哈尔滨工程大学,2013.