

**目标检测及抓取型机器人
软件设计说明书
SDD 202
版本号 1.4**

分工说明

小组名称	护肝队	
学号	姓名	本文档中主要承担的工作内容
17373505	曹博文	4、8；审核
17231002	曹玥	6
17373552	莫策	3、6
17373210	王博文	2、5
17373128	全庆隆	1、6、7；文档整体排版及组织

版本变更历史

版本	提交日期	主要编制人	审核人	版本说明
1.1	4.15	全庆隆	曹博文	完成软件设计说明第一版
1.2	4.20	全庆隆	曹博文	修改需求概述及基本用例图；修改体系结构设计；修改内部接口；修改详细设计；修改需求可追踪性说明
1.3	4.21	全庆隆	曹博文	增加数据库设计
1.4	5.1	全庆隆	曹博文	在第4章增加交互图

目录

1 范围.....	5
1.1 项目概述	5
1.2 文档概述	5
1.3 术语和缩略词	6
1.4 引用文档	6
2. 需求概述.....	6
2.1 概述	6
2.2 基本用例	7
2.2.1 机器人建立环境地图.....	7
2.2.2 机器人的自主导航.....	8
2.2.3 机器人的目标检测及抓取.....	8
2.2.4 机器人的语音交互.....	9
3. 数据库设计.....	10
3.1 ER 图	10
3.2 数据库结构表	11
3.3 数据库关系模式	11
3.3.1 用户表.....	11
3.3.2 地图位置关系表.....	12
3.3.3 抓取物品表.....	12
3.3.4 运行日志表.....	12
4. 体系结构设计.....	13
4.1 总体结构	13
4.2 软件体系结构	14
4.3 硬件体系结构	15
4.4 软件整体类图	16
5. 接口设计.....	18
5.1 用户界面	18
5.2 外部接口	20

5.3 内部接口	20
5.3.1 无线传输接口	20
5.3.2 导航控制接口	21
5.3.3 物体识别接口	21
5.3.4 机械臂运动（物体抓取）接口	21
6. 详细设计	21
6.1 基本移动	21
6.2 跟随移动	22
6.3 避障	23
6.4 建立环境地图	24
6.5 路径规划	26
6.6 目标检测	28
6.7 目标抓取	29
6.8 交互	30
7. 运行与开发环境	32
7.1 运行环境	32
7.2 开发环境	33
8. 需求可追踪性说明	33
8.1 功能性需求	33
8.1.1 机器人建立环境地图	33
8.1.2 机器人的自主导航	34
8.1.3 机器人的目标检测及抓取	34
8.1.4 机器人的语音交互	34
8.2 非功能需求	34
8.2.1 性能需求	34
8.2.2 易用性需求	35
8.2.3 可靠性需求	35
8.2.4 可扩展性需求	35
8.2.5 可维护性需求	35

1 范围

1.1 项目概述

本项目意在开发一个目标检测及抓取型机器人。

本项目的开发基于启智 ROS 机器人。启智 ROS 机器人是一款为 ROS 机器人算法开发量身打造的机器人硬件平台，拥有硬件里程计、激光测距雷达、立体视觉相机和语音输入输出阵列等一系列硬件设备，完美适配 ROS 的 TF、Navigation、Actionlib 和 Pluginlib 子系统，是深入学习 ROS 和高级机器人算法验证开发的理想平台。

本项目目标实现一系列功能性需求，其中包括：实现机器人的主动控制；静态或动态障碍物避障；机器人利用传感器实时建立环境地图；机器人根据地图和自身的位置信息实现动态路径规划及导航控制；检测、识别并定位环境中的特定目标，动态接近目标物；抓取目标物；语音交互；多目标检测。

本项目目标完成的非功能性需求包括：在 5 秒内对于正确的用户需求做出响应；对于错误的用户需求进行提示并正确处理；若出现错误可在有限时间内恢复；拥有简单的指令格式，易于使用和学习。

此目标检测及抓取型机器人可作为服务机器人在现实生活中有所应用，例如在餐饮业中用于为顾客送餐、在酒店服务中帮助带领顾客到指定房间、在仓库管理中搬运货物等，应用前景广泛。

1.2 文档概述

本文档是北京航空航天大学计算机学院 2020 年春季学期软件工程（嵌入式方向）课程中护肝队的软件设计说明书文档。本文档适用于基于 Ubuntu16.04 系统的 ROS 机器人操作系统开发，适用的硬件平台是启智 ROS 机器人，编写的软件的用途是在该硬件平台上实现一个具有目标检测和抓取功能的机器人，其功能主要包含机器人的主动控制，实时建立环境地图，静态/动态障碍物避障，路径规划和导航控制，单种/多种目标物的检测、识别和抓取，以及语音交互。说明书包括如下内容：需求概述、数据库设计、体系结构设计、接口设计、详细设计

以及需求可追踪性说明。与本文档相关配套的,还有如下文档:SDP 软件开发计划文档、SRS 软件需求规格说明文档、STD 软件测试说明文档。本文档初次撰写于 2020 年 4 月 15 日。

本项目的开发计划用于总体上指导 ROS 机器人软件项目顺利进行并得到通过最终评审的项目产品。本项目开发计划面向项目组的全体成员,项目周期为 3 个月。

1.3 术语和缩略词

缩略词	全称
ROS	Robot Operating System/机器人操作系统
URDF	Unified Robot Description Format/统一机器人描述格式
IMU	Inertial Measurement Unit/惯性测量单元
SLAM	simultaneous localization and mapping/即时定位与地图构建
TOF 立体相机	Time of Flight/飞行时间技术

1.4 引用文档

文档格式要求按照我国 GB8567-2006 计算机软件文档编制规范进行。引用文档包括以下文件:

软件设计说明书 GB8567-2006 (SDD)

《启智 ROS 版_开发手册》

2. 需求概述

2.1 概述

本项目拟开发室内智能服务型机器人,在机器人管理员完成对机器人的配置,且手动控制机器人完成对房间的建图后,机器人从设置的起点开始运行。机器人可以跟随用户或自主去往指定地点,同时室内有预设的目标地点,放置着一些可以被机器人抓取的物品。用户发出语音指令或者在用户界面进行操作,机器

人接受指令并分析用户要求，之后机器人完成相应操作。

机器人要实现的基本功能有建图、自主导航、物品识别与抓取、动态避障及语音交互。在非功能需求方面，则需要保证机器人的高效性，系统的易用性、可靠性、可扩展性及可维护性。

2.2 基本用例

2.2.1 机器人建立环境地图

主要参与者： 机器人管理员、机器人

目标： 使机器人完成对房间的建图

前置条件： 完成机器人的硬件及软件的启动

启动： 机器人管理员发出建图指令

场景：

1. 机器人启动雷达开始建图
2. 机器人管理员控制机器人在房间中移动
3. 机器人在移动过程中完成对房间的建图
4. 机器人保存地图

优先级： 高

何时可用： 第一个增量

使用频率： 低

次要参与者： 机器人所携带的各类传感器

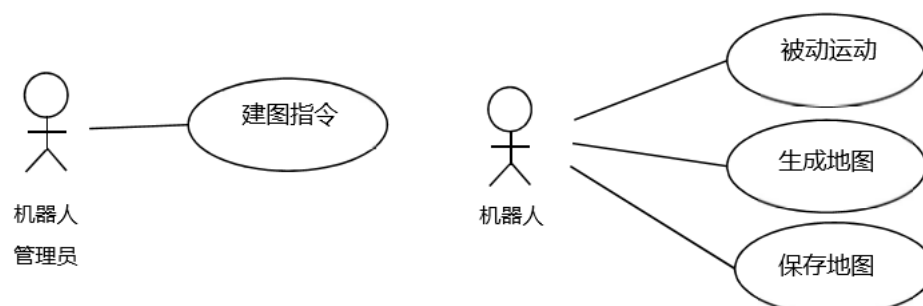


图 1 建立环境地图用例图

2.2.2 机器人的自主导航

主要参与者: 用户、机器人

目标: 在用户选定目的地后, 机器人基于环境地图进行路径规划, 而后基于主动控制开始运动, 并在运动过程中动态避障、调整路径

前置条件: 已进入导航模式

启动: 用户选定目的地并确认启动机器人

场景:

1. 用户点击“选择目的地”
2. 系统弹出 RIVZ 界面显示地图
3. 用户在地图上标定目的地并点击确认
4. 用户点击“开始导航”, 而后机器人开始运动
5. 机器人到达目的地后停止运动, 并发出语音提示

优先级: 中

何时何用: 第二个增量

使用频率: 中

次要参与者: 机器人携带的各类传感器以及控制、连接组件

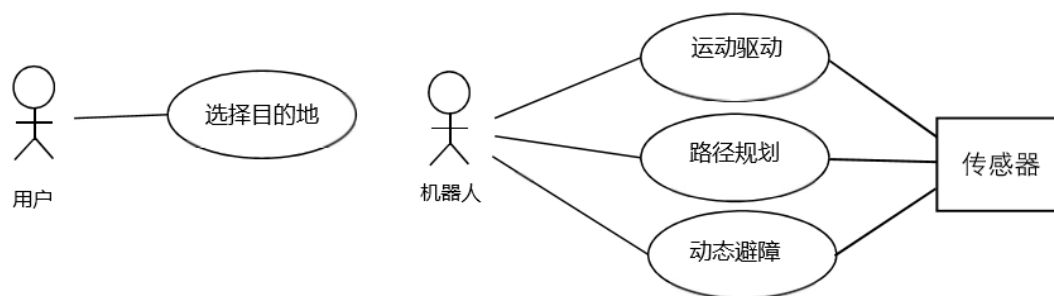


图 2 自主导航用例图

2.2.3 机器人的目标检测及抓取

主要参与者: 机器人

目标: 机器人可以准确识别视野中的单个/多个物体, 并抓取目标物体

前置条件: 已进入抓取模式

启动: 用户确认启动机器人

场景:

1. 机器人识别出视野中物体
2. 机器人获取物体的位置、形状信息
3. 机器人对抓取行为进行规划
4. 机器人控制机械臂抓取物体
5. 机器人抓取完毕，并发出语音提示

优先级: 中

何时何用: 第三个增量

使用频率: 中

次要参与者: 机器人携带的各类传感器、机械臂、控制和连接组件

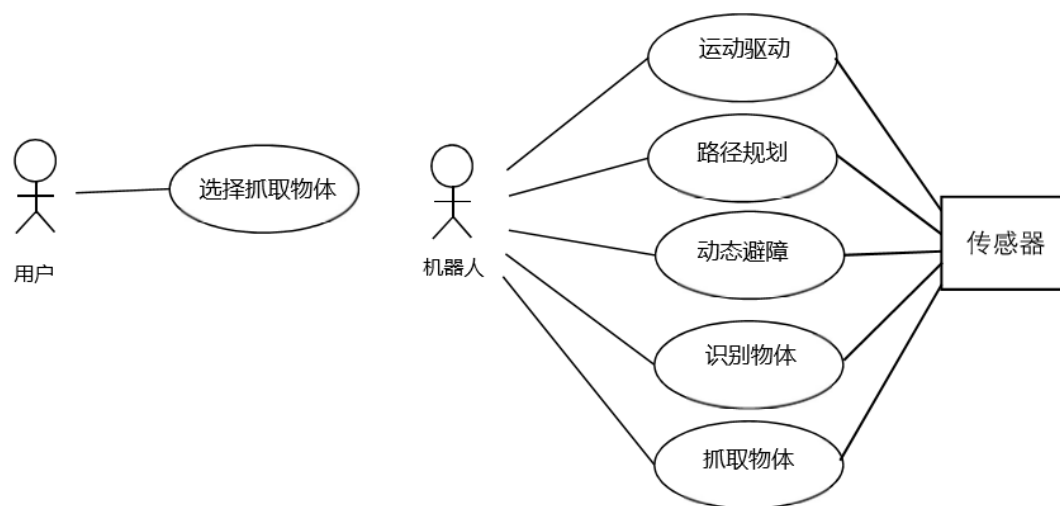


图 3 目标检测及抓取用例图

2.2.4 机器人的语音交互

主要参与者: 用户、机器人

目标: 机器人能够识别用户的语音指令并执行相应的任务

前置条件: 用户说出语音指令

启动: 用户确认启动机器人

场景:

1. 机器人识别用户说出的语音指令
2. 机器人解析该指令并做出行为规划
3. 机器人执行相应的任务

4. 机器人完成任务，发出语音提示

优先级：低

何时可用：第四个增量

使用频率：中

次要参与者：语音识别模块、机器人携带的各类传感器、控制和连接组件

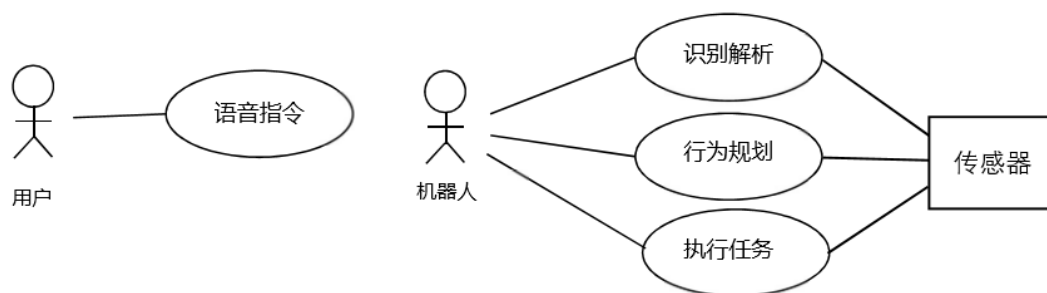


图 4 语音交互用例图

3. 数据库设计

3.1 ER 图

本项目的数据库 ER 图如下：

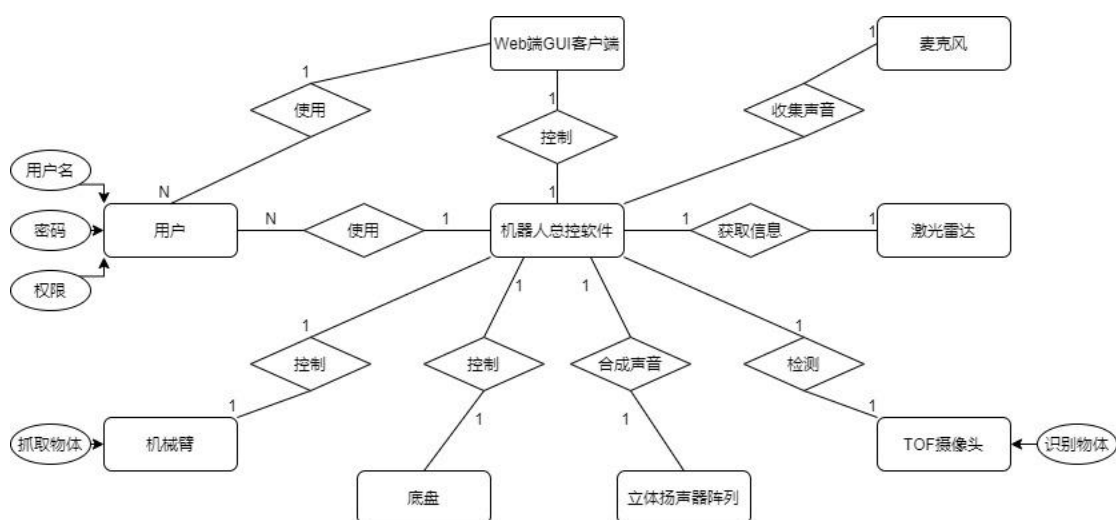


图 5 ER 图

3.2 数据库结构表

数据表名	属性名	属性类型
用户	用户名 (KEY)	字符串
	密码	字符串
	用户权限	整数
位置	编号 (KEY)	整数
	位置名称	字符串
	创建时间	时间
	坐标	元组
	描述	字符串
抓取物品	编号 (KEY)	整数
	物品标签	字符串
	创建时间	时间
	三维坐标	元组
	图像	图像
运行日志	编号 (KEY)	整数
	创建时间	时间
	事件信息	字符串

3.3 数据库关系模式

3.3.1 用户表

该关系的主码是用户名。密码和用户权限完全依赖于主码，因此是 3NF.

名称	字段名	数据类型	备注说明
用户名	UserName	字符串	用户的唯一标识
密码	Password	字符串	需要加密
用户权限	Authority	整数	0 表示开发权限, 1 表示管理权限, 2 是普通用户权限

3.3.2 地图位置关系表

主键是地点的编号，对用户透明，由系统给出。

名称	字段名	数据类型	备注说明
编号	Identifier	整数	地点的唯一标识
位置名称	PlaceName	字符串	用户标定的地点名称
创建时间	Time	时间	创建该地点的时间（UTC 时间）
坐标	Position	元组	(x, y) 坐标
描述	Description	字符串	用户对该地点的描述

3.3.3 抓取物品表

主键是抓取的物品的编号，对用户透明，由系统给出。

名称	字段名	数据类型	备注说明
编号	Identifier	整数	物品的唯一标识
物品标签	Label	字符串	识别该物体得到的名称
创建时间	Time	时间	抓取该物品的时间（UTC 时间）
三维坐标	Position	元组	抓取该物品的 (x, y, z) 坐标
图像	Image	图像	摄像头采集到的该物品的图像信息

3.3.4 运行日志表

名称	字段名	数据类型	备注说明
编号	Identifier	整数	日志信息的唯一标识
创建时间	Time	时间	创建本条日志信息的时间（UTC 时间）
事件信息	Info	字符串	程序自动生成的日志信息

4. 体系结构设计

4.1 总体结构

本节将从实现视图，以构件结构形式给出系统的总体结构。

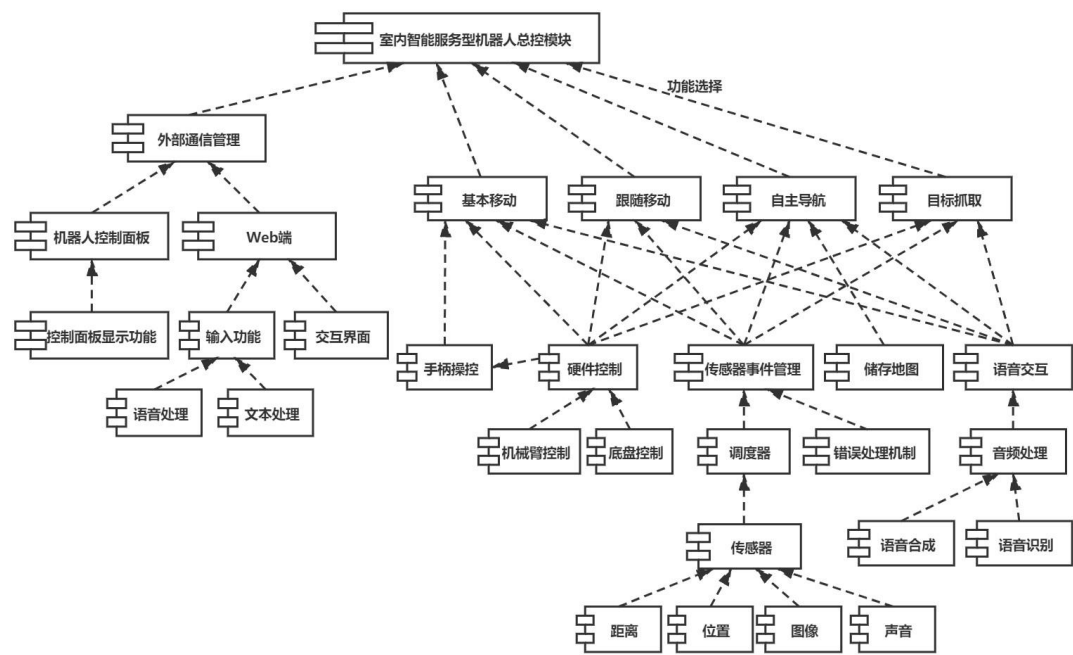


图 6 系统构件图

系统的核心单元为外部通信管理模块，机器人总控模块，以及基本移动、跟随移动、自主导航、目标抓取四种功能的控制模块。

外部通信管理模块获取来自机器人控制面板和 Web 端的指令，向机器人总控模块发送消息。机器人控制面板需具备显示功能；Web 端需要设置交互界面并具备处理语音和文本输入的功能。

机器人总控模块监听外部通信管理模块，解析指令，按需激活功能控制模块。

基本移动、跟随移动、自主导航、目标抓取四种功能的控制模块调用硬件控制模块和传感器事件管理模块完成任务，基于语音交互模块完成语音的输入和输出。硬件控制模块需具备控制机械臂和底盘的功能，同时可以接受手柄的操控；传感器事件管理模块通过调度器来接收各传感器的状态及信息、与事件相关联，同时具备必要的错误处理机制。此外，地图作为重要信息存储在自主导航模块中。

4.2 软件体系结构

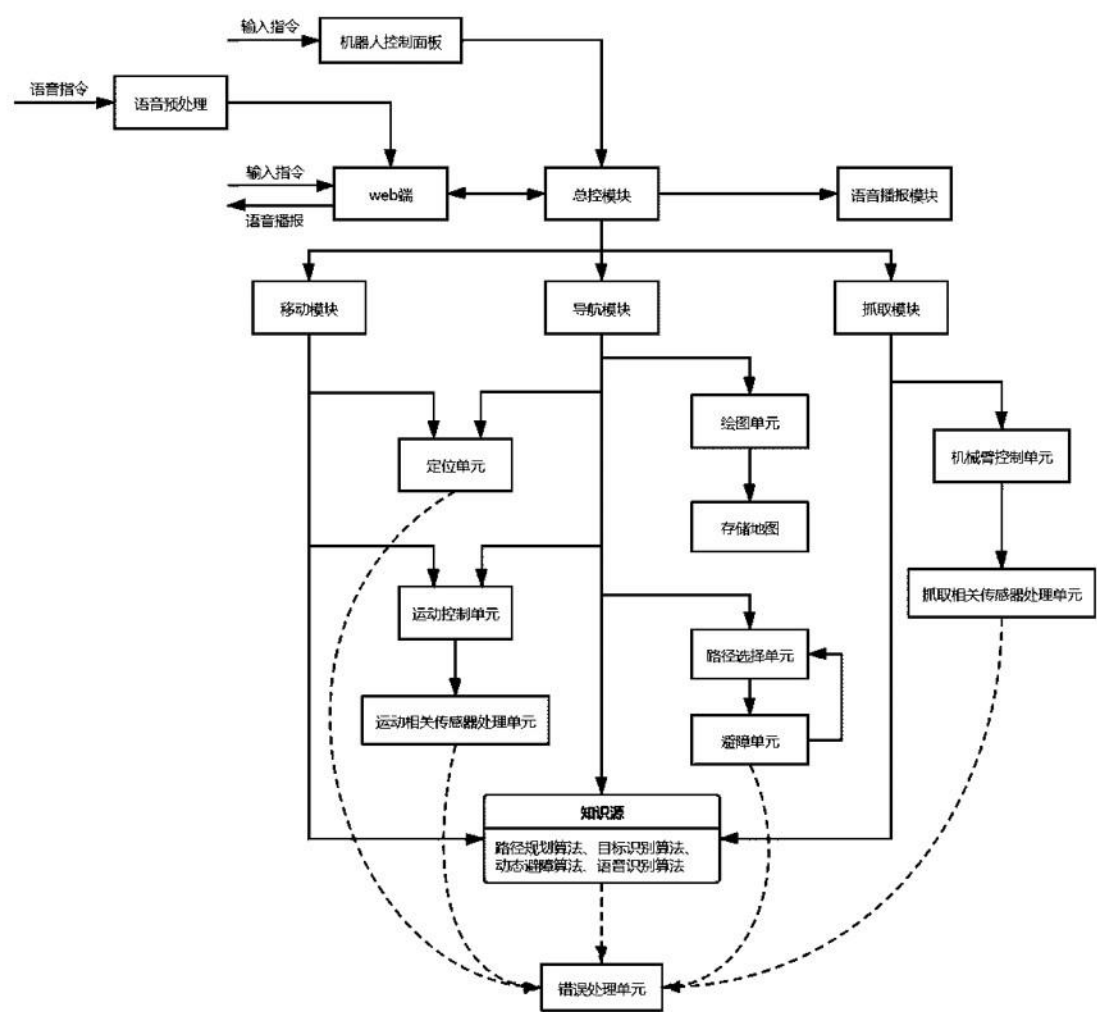


图 7 软件体系结构图

软件体系结构采用混合结构风格。

在 web 端和总控模块间采用分层结构模式（客户/服务器风格），提高了室内智能服务型机器人的软件复用性和可扩展性。

在总控模块和移动、导航、抓取模块间采用以数据为中心的结构模式（仓库系统风格）。基于知识源中的路径规划算法、目标识别算法和动态避障算法，总控模块调度移动模块、导航模块、抓取模块执行任务，提供基本移动、跟随移动、自主导航、目标抓取四项功能。

在移动、导航、抓取模块内部采用调用/返回结构（主程序结构）。其中，移动模块依照总控模块传来的模式信息，通过调用运动控制单元和定位单元提供基

本移动、跟随移动两项功能；导航模块基于总控模块传来的目标位置信息、内部存储的地图信息以及知识源中的路径规划算法和动态避障算法，调用定位单元、运动控制单元以及路径选择单元提供自主导航功能；抓取模块基于总控模块传来的目标物体信息和知识源中的目标识别算法，调用机械臂控制单元，提供目标抓取功能。

在定位单元、运动相关传感器处理单元、避障单元和抓取相关传感器处理单元中均加入了错误处理机制。当调用知识源中算法出错时，也会调用错误处理单元。

4.3 硬件体系结构

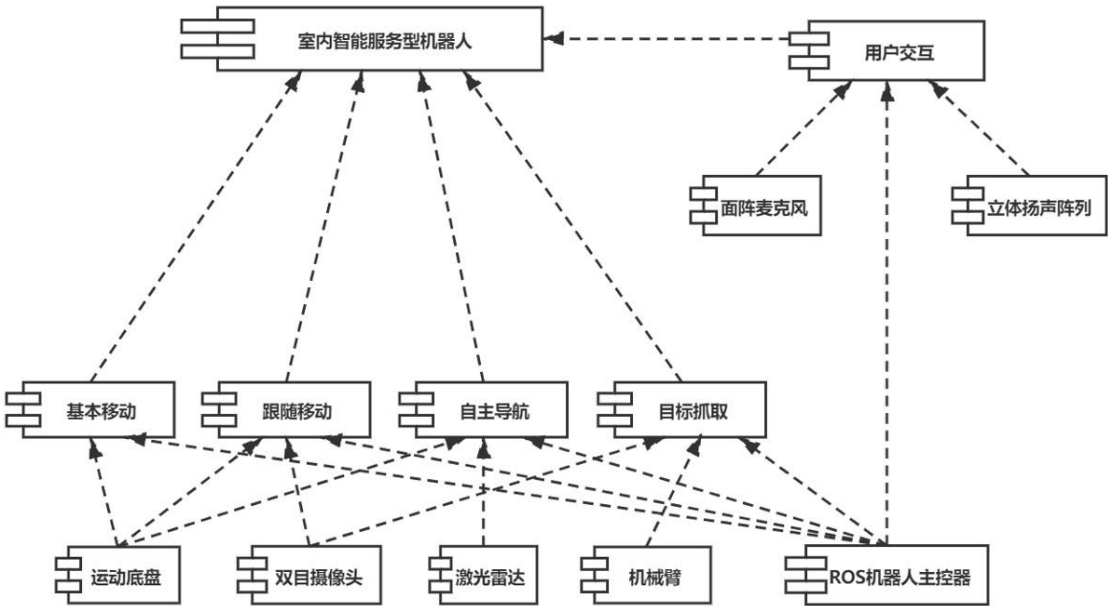


图 8 硬件体系结构图

本节主要分析了室内智能服务型机器人提供的各项功能的硬件依赖关系。其中，基本移动功能依赖于运动底盘和 ROS 机器人主控器；跟随移动功能依赖于运动底盘、双目摄像头和 ROS 机器人主控器；自主导航功能依赖于运动底盘、激光雷达和 ROS 机器人主控器；目标抓取功能依赖于双目摄像头、机械臂和 ROS 机器人主控器；用户交互功能依赖于 ROS 机器人主控器、面阵麦克风和立体扬声器阵列。

4.4 软件整体类图

软件整体类图如下:

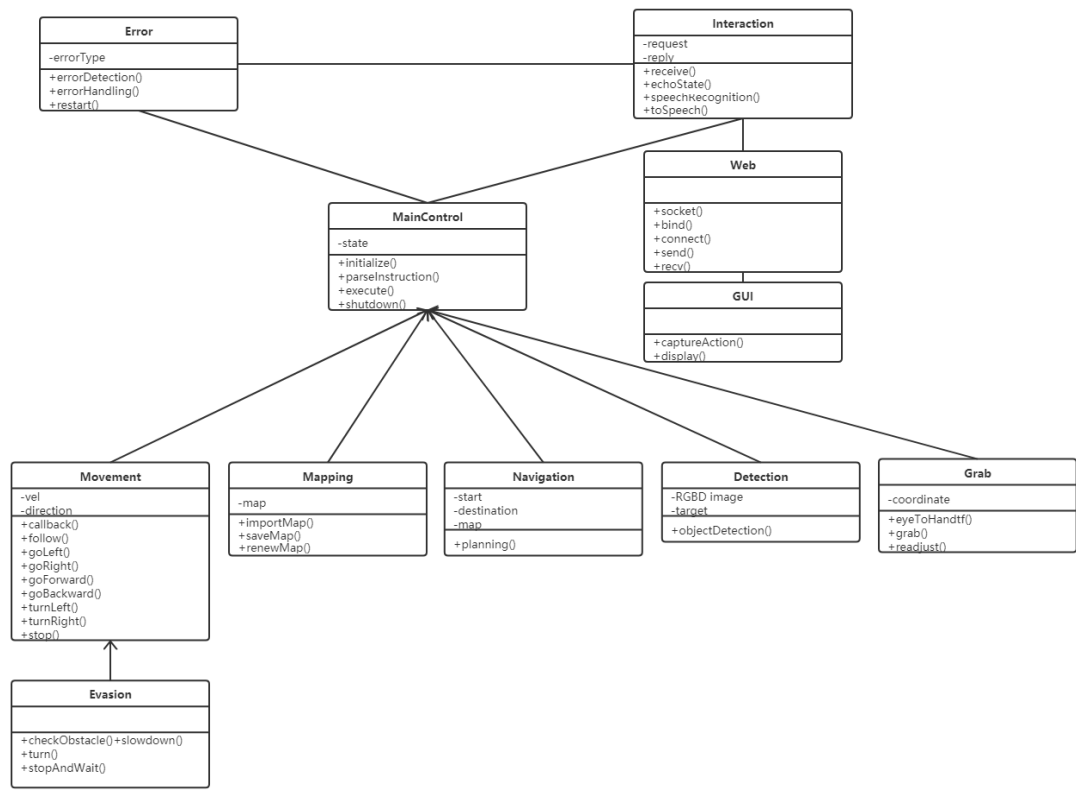


图 9 软件整体类图

类之间协作关系如下图:

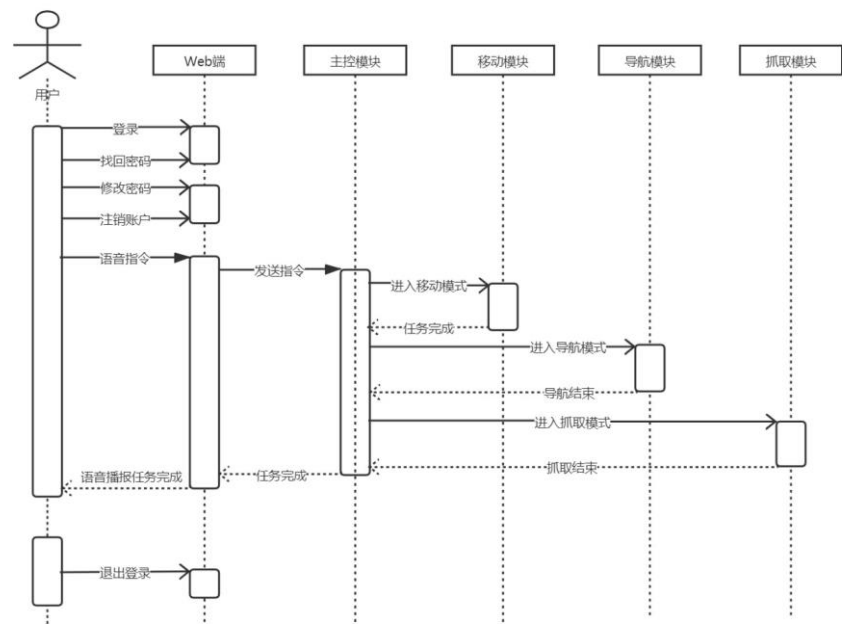


图 10 总体交互图

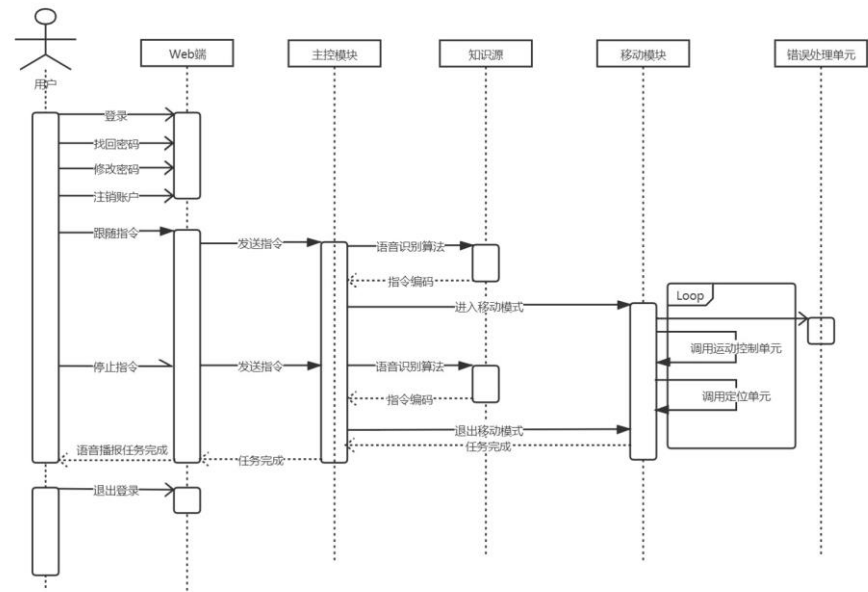


图 11 移动模式交互图

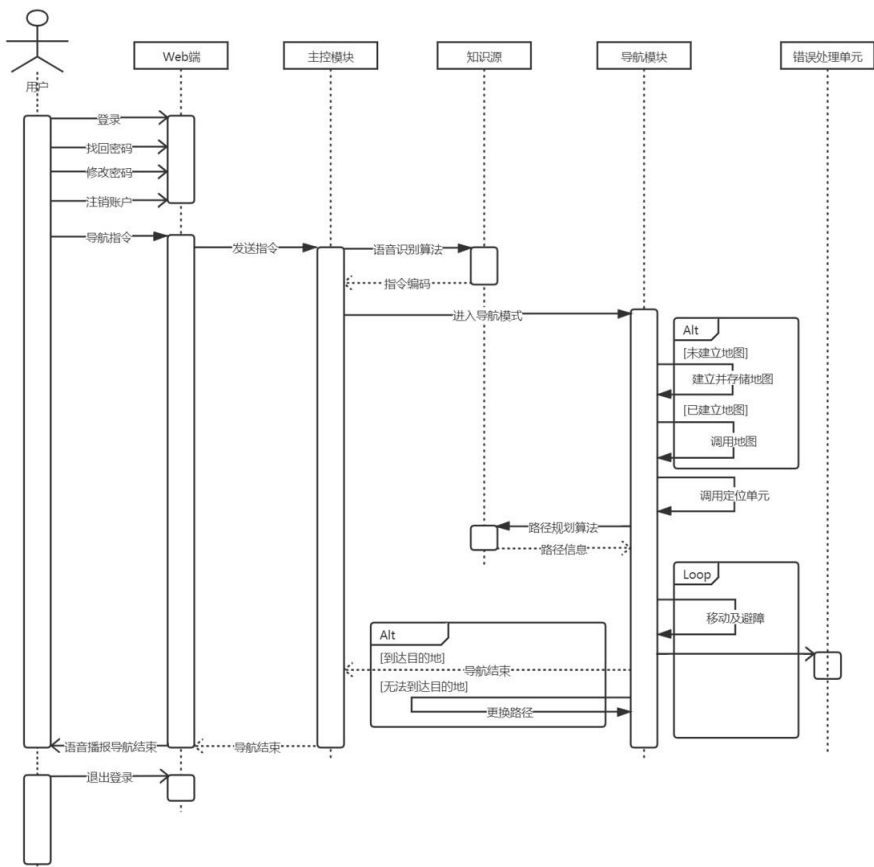


图 12 导航模式交互图

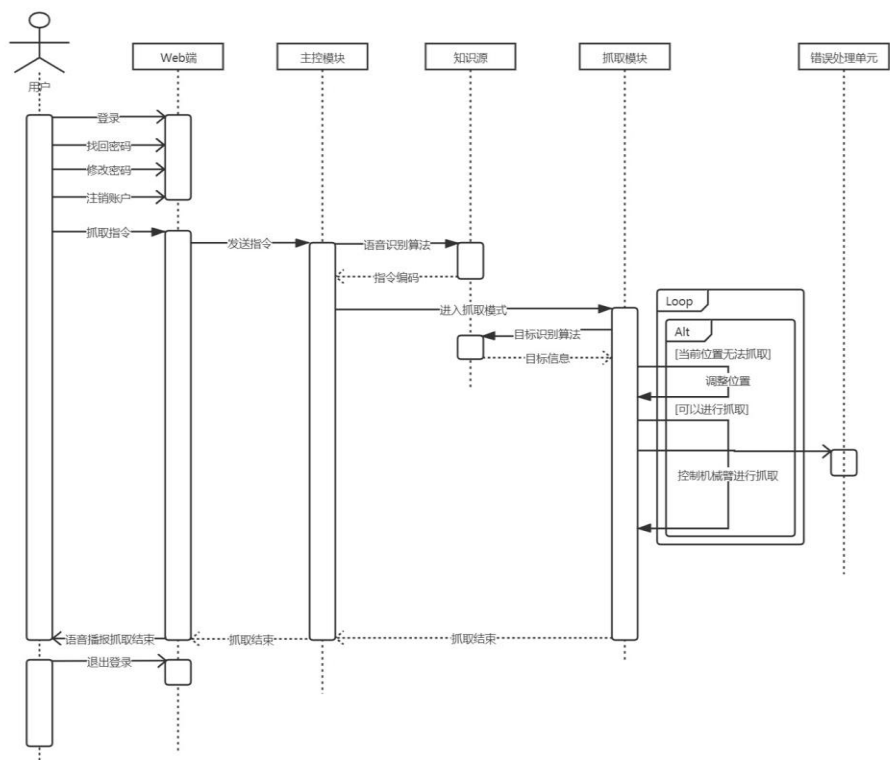


图 13 抓取模式交互图

5. 接口设计

5.1 用户界面

用户通过远程电脑上的 web 端控制机器人。控制需要有选择模式的界面、控制机器人进行移动的界面和让机器人完成指定操作的按钮。界面及按钮如下图所示：

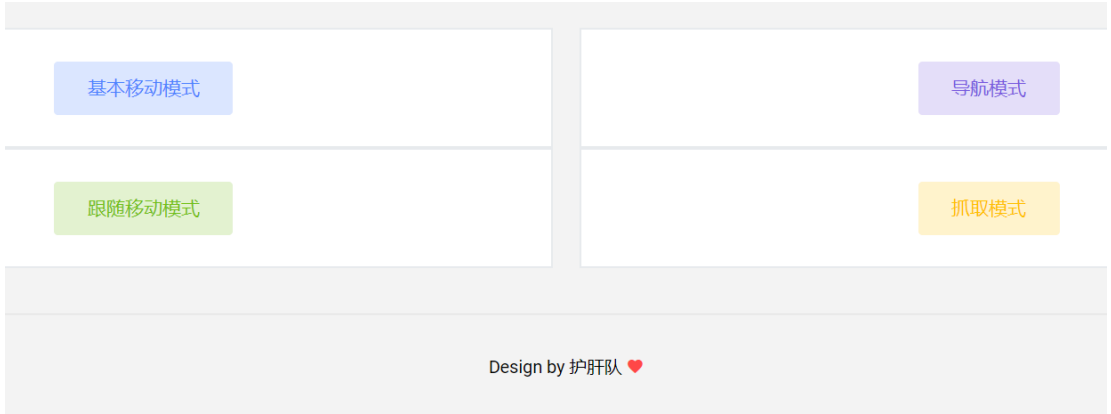


图 14 主界面



图 15 基本移动模式界面



图 16 跟随移动模式界面



图 17 导航模式界面

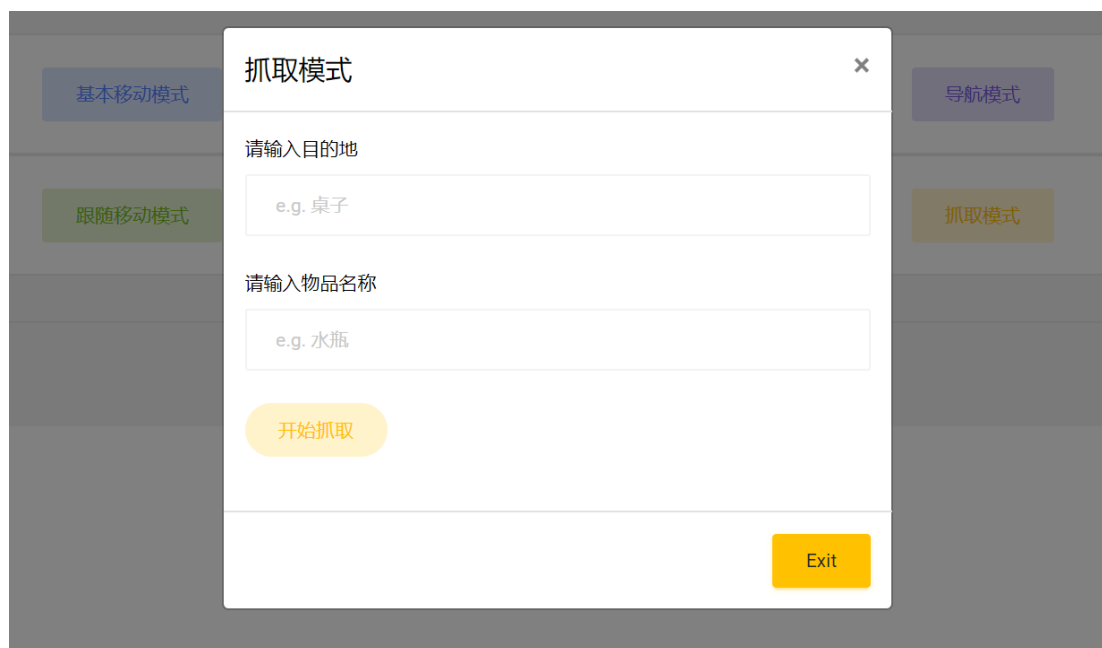


图 18 抓取模式界面

5.2 外部接口

机器人顶部配备了一个 Kinect2 相机，一个可以在上下前后运动的机械臂，扬声器及麦克风阵列。位于机器人躯干部分外挂的平板电脑运行 ROS 操作系统，通过 USB 接口与机器人底盘内的 USB-HUB 连接。USB-HUB 将计算机的 USB 接口扩展为多路。扩展后的 USB 接口分别连接到启智控制器（以异步串口方式访问）、USB 转以太网接口、激光雷达、面板接口（用于用户自行连接设备，例如 U 盘、控制手柄）。

软件外部接口主要为 web 端应用，界面设计如上一节所示。

5.3 内部接口

5.3.1 无线传输接口

socket() 创建 socket;

bind() 将本地地址与 socket 绑定;

connect() 建立连接;

send() 发送数据;

recv() 接收数据，写入本地绑定的 socket 中。

5.3.2 导航控制接口

sendGoal() 将导航信息传递给导航服务客户端；
waitForResult() 等待导航结果直到整个导航过程结束，或导航过程被其他原因中断。

5.3.3 物体识别接口

objectDetection() 调用 kinect2 摄像头进行物体识别。

5.3.4 机械臂运动（物体抓取）接口

init() 定义一个机械臂控制消息对象并初始化；
publish() 将控制消息发布至机器人控制节点，实现对机械臂的控制。

6. 详细设计

6.1 基本移动

输入：移动速度、移动方向
输出：转化为控制底盘运动的指令，控制底盘

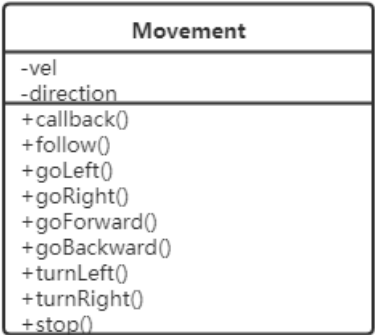


图 19 移动模块类图

功能：控制机器人基本的运动，包括前进后退以及左右转向，使机器人可以根据输入的速度和方向进行移动。在此过程中，机器人完全遵从人的指令进行移动。

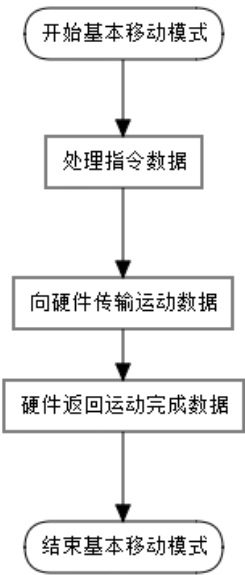


图 20 基本移动模式活动图

详细说明: Movement 类有两个控制运动的属性, 其中, vel 代表运动速度, direction 代表运动方向 (0 代表向前, 1 代表向后, 2 代表向左, 3 代表向右)。若接收到速度和方向的消息, 则调用 callback 函数, 先将运动的速度和方向转换为线速度和角速度, 之后向底层运动硬件发送转化过的运动信息, 使得机器人可以按照输入的移动速度和移动方向进行移动。

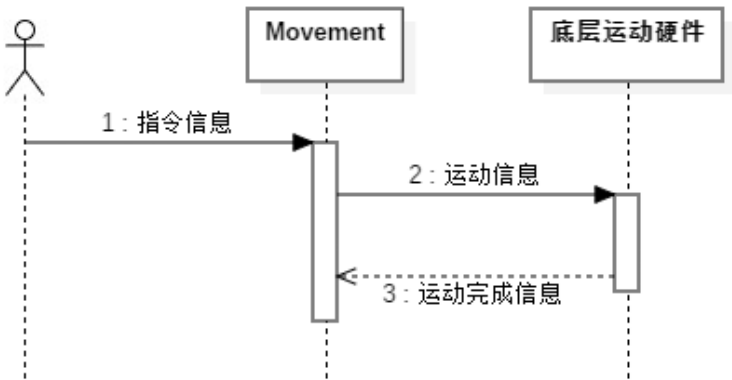


图 21 基本移动模式交互图

6.2 跟随移动

输入: 无

输出: 无

功能：控制机器人跟随引导人员进行移动。

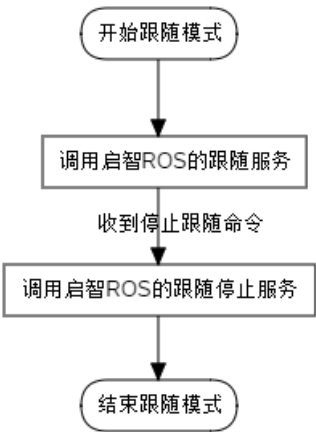


图 22 跟随模式活动图

详细说明：跟随移动使用启智机器人内置跟随模块，开启跟随模式后，调用启智 ROS 的跟随服务开始跟随。收到停止信号后，调用启智 ROS 的停止跟随服务停止跟随。

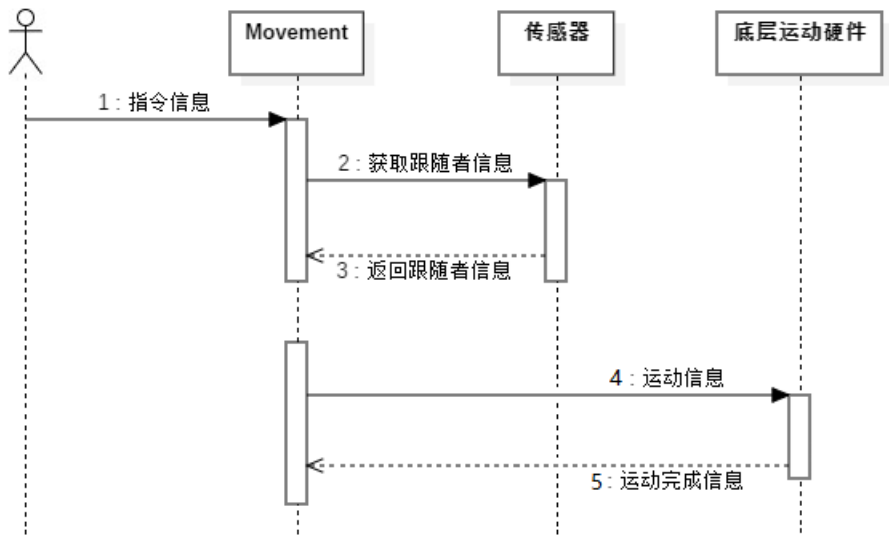


图 23 跟随模式交互图

6.3 避障

输入：无

输出：无

功能：实现在移动过程中的避障功能。

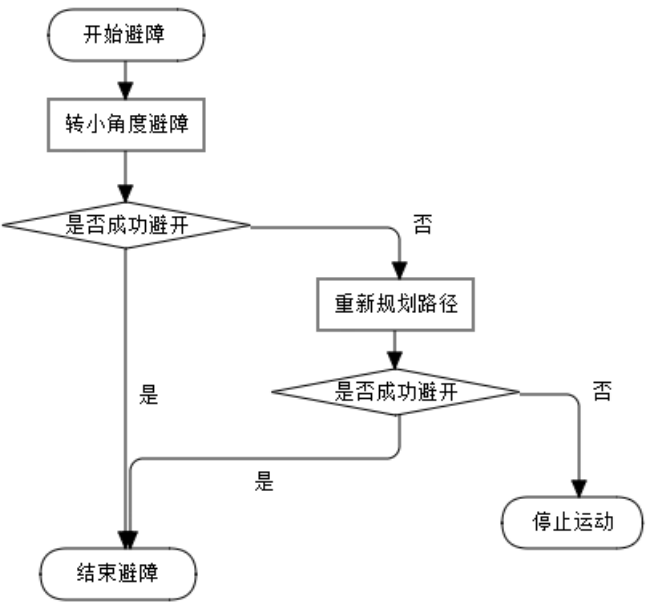


图 24 避障活动图

详细说明：避障在机器人自主运动时一直运行，checkObstacle()函数接收雷达的距离数组 range 信息并处理，判断当前通道内是否有障碍物，如果有障碍物则先进行小角度避障。若小角度避障失败，则退回原点，沿着新的路径重新行进。其中，得到路径规划后的移动速度、移动方向信息，由 Movement 模块接收。

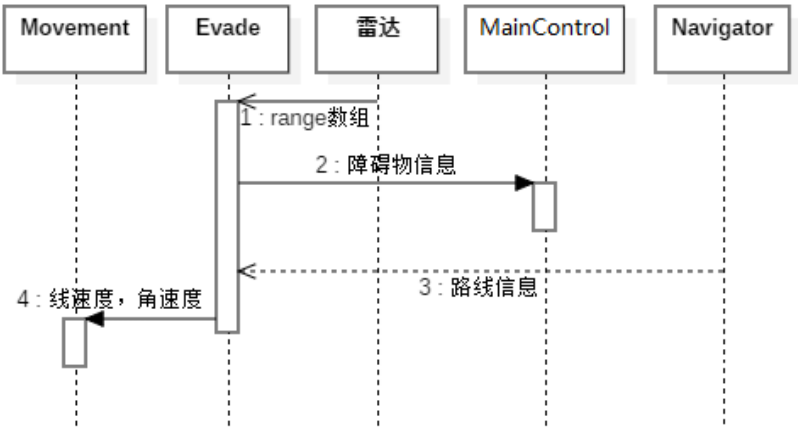


图 25 避障交互图

6.4 建立环境地图

输入：激光雷达的传感器信息或外部导入的地图

输出：该环境内完整的环境地图，包含障碍物轮廓、障碍点、无静态障碍物区域以及没有探测到的未知区域等详细信息

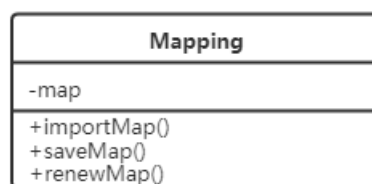


图 26 建图模块类图

功能： 根据激光雷达信息建立环境地图或保存外部导入的地图。

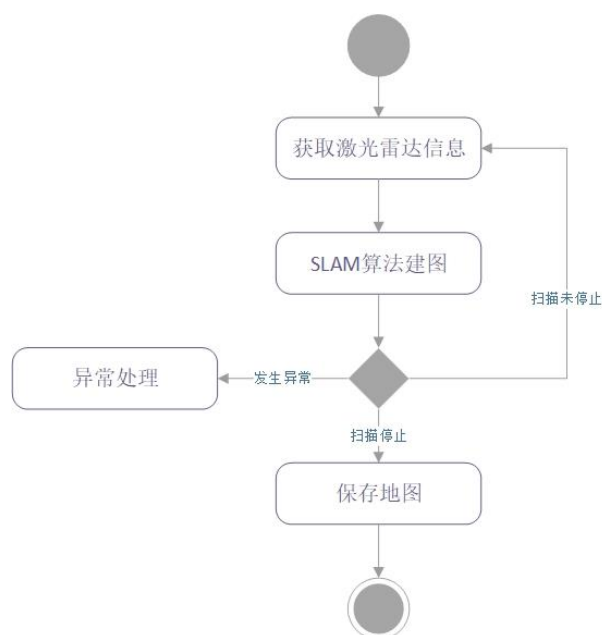


图 27 建图模块活动图

详细说明： 激光雷达测量机器人周围 360 度的障碍物的分布状况，返回障碍物轮廓的二维点阵的俯视图。根据激光雷达扫描返回的结果，获取机器人周围的障碍物分布状况，使用 **Hector SLAM** 或 **Gmapping** 算法，创建环境地图。当机器人绕场地一圈后，就可以将地图保存下来，便于之后自主导航等功能进行使用。

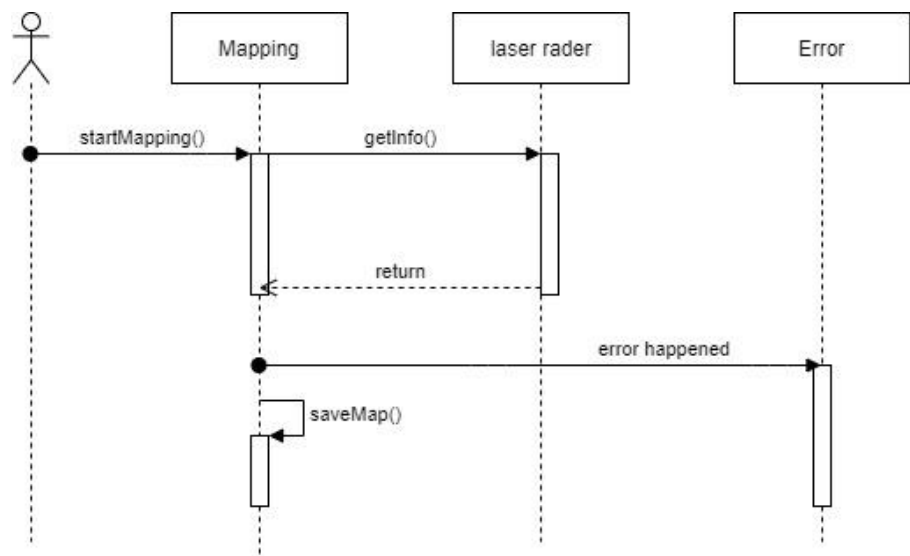


图 28 建图模块交互图

6.5 路径规划

输入： 机器人的起始位置和目标位置。如果起始位置缺省，则设置为机器人的当前位置

输出： 机器人的运行速度、运行方向和运动路径

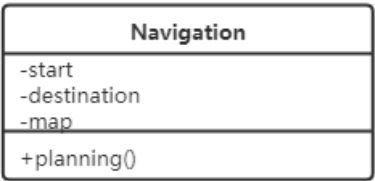


图 29 路径规划类图

功能： 根据用户或系统设定的起点和终点坐标及地图，规划一条或多条从起点到终点的路径。

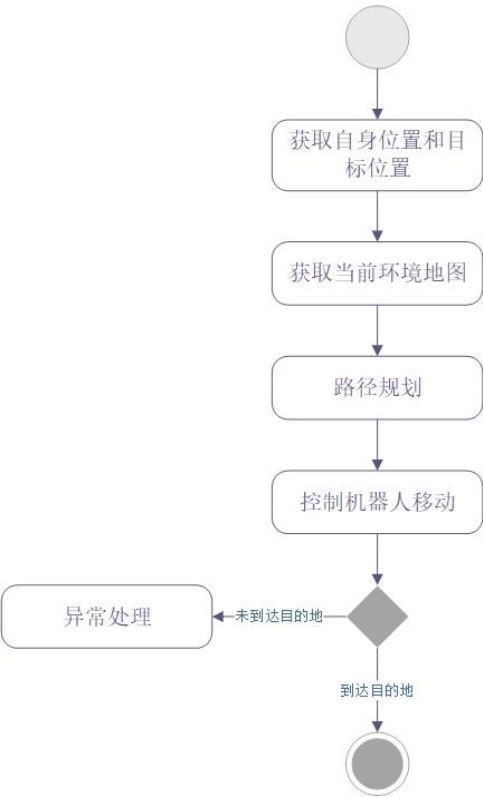


图 30 路径规划活动图

详细说明：当存在多条可行路径时，会返回最短路径，其余路径供遇到无法躲避的障碍时选择。

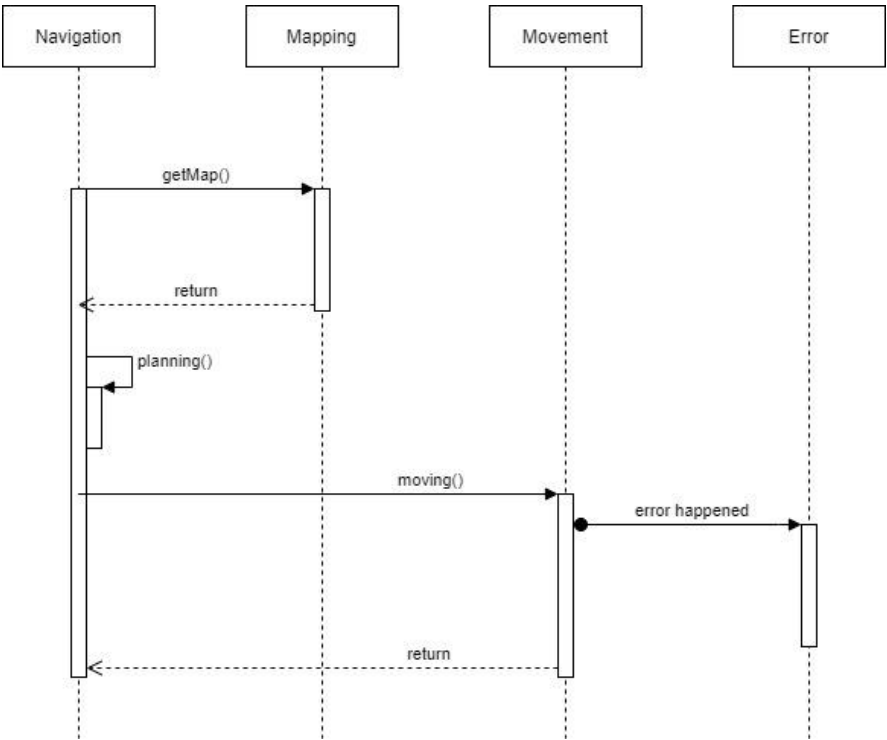


图 31 路径规划交互图

6.6 目标检测

输入: RGB-D 图像及检测目标

输出: 目标检测结果

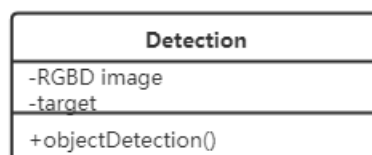


图 32 目标检测类图

功能: 检测是否存在目标物。

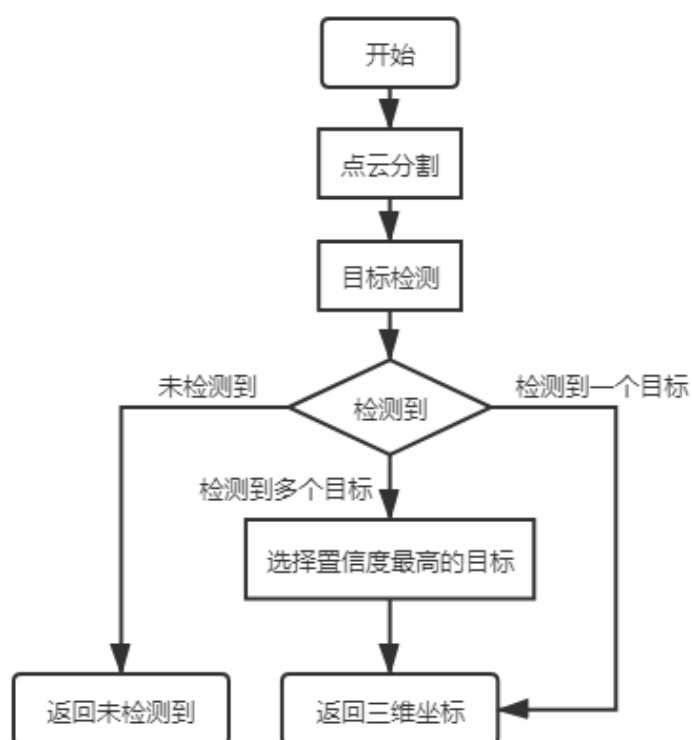


图 33 目标检测活动图

详细说明: 对双目摄像头传来的 RGB-D 图像进行 PCL 点云分割, 并检测目标物, 若检测到, 则计算并返回该目标物的三维坐标 (若有多个同类目标物, 返回置信度最高的检测结果); 若未检测到, 返回不存在目标物。

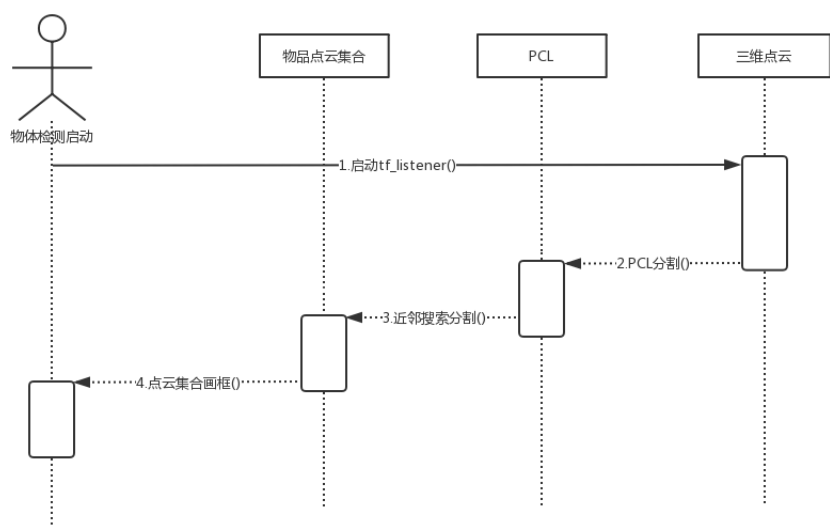


图 34 目标检测交互图

6.7 目标抓取

输入：抓取目标物的三维坐标

输出：抓取结果

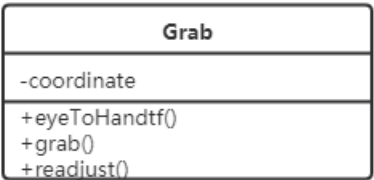


图 35 目标抓取类图

功能：按三维坐标抓取目标物，若抓取失败则调整机器人位置姿态重新抓取。

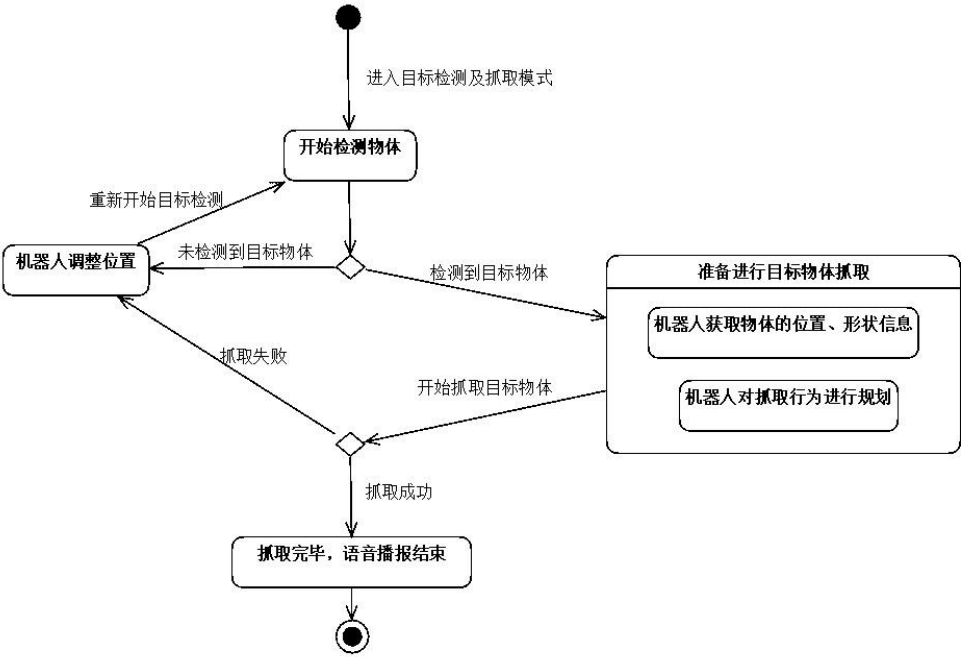


图 36 目标抓取活动图

详细说明：根据机器人参数做摄像头与机械臂的坐标转换，使机械臂移动至目标处并抓取目标物。

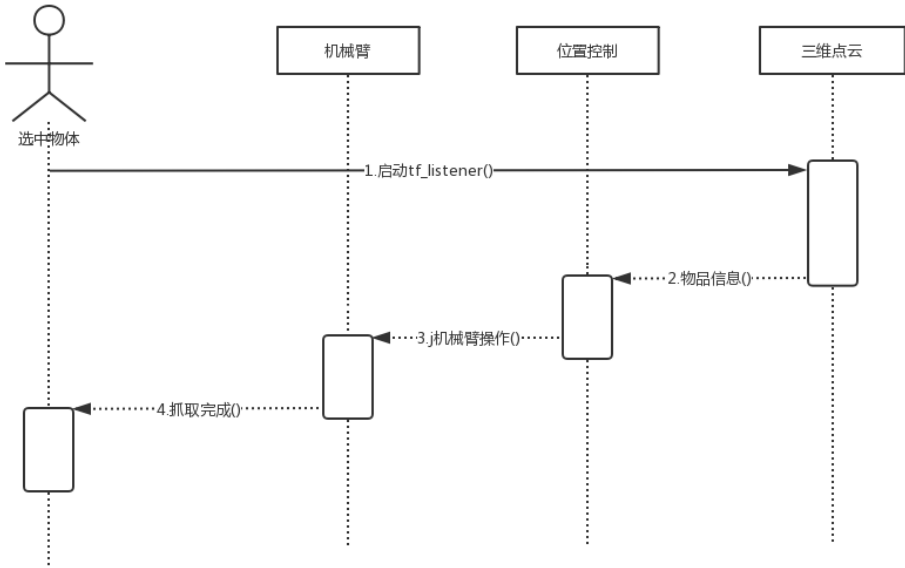


图 37 目标抓取交互图

6.8 交互

输入：用户指令

输出：语音回复

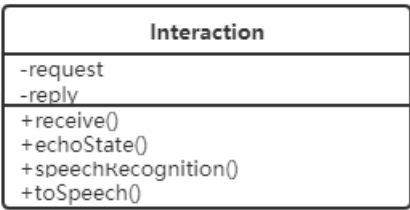


图 38 交互类图

功能：接收用户指令，及在执行过程中进行语音回复，汇报状态。

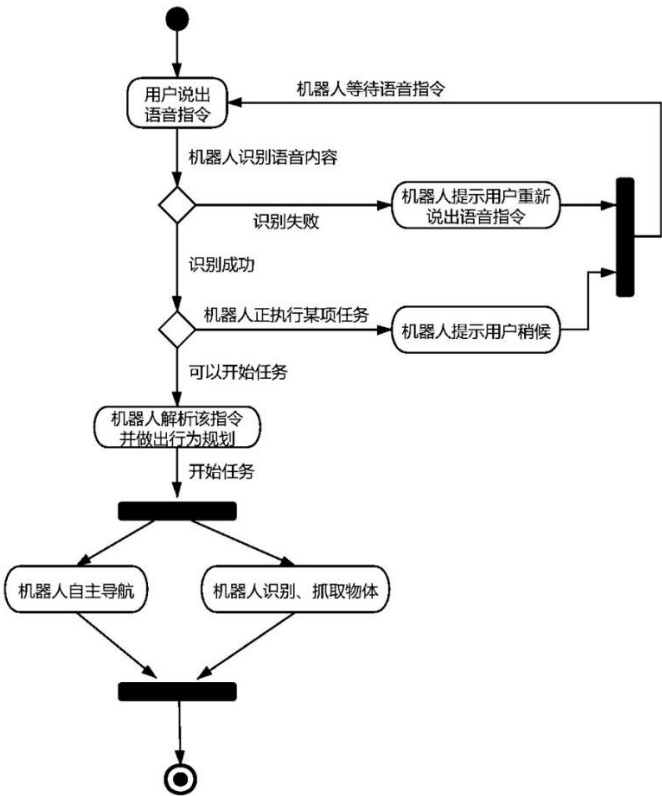


图 39 语音交互活动图

详细说明：支持的指令输入形式包括语音指令，Web 端远程指令和从控制面板获取的指令，机器人收到指令后对其进行解析并开始执行相应功能。执行过程中机器人会分别在收到指令后，开始移动时，到达目的地后，检测到目标后，抓取到目标后，故障时通过扬声器语音播报当前状态。

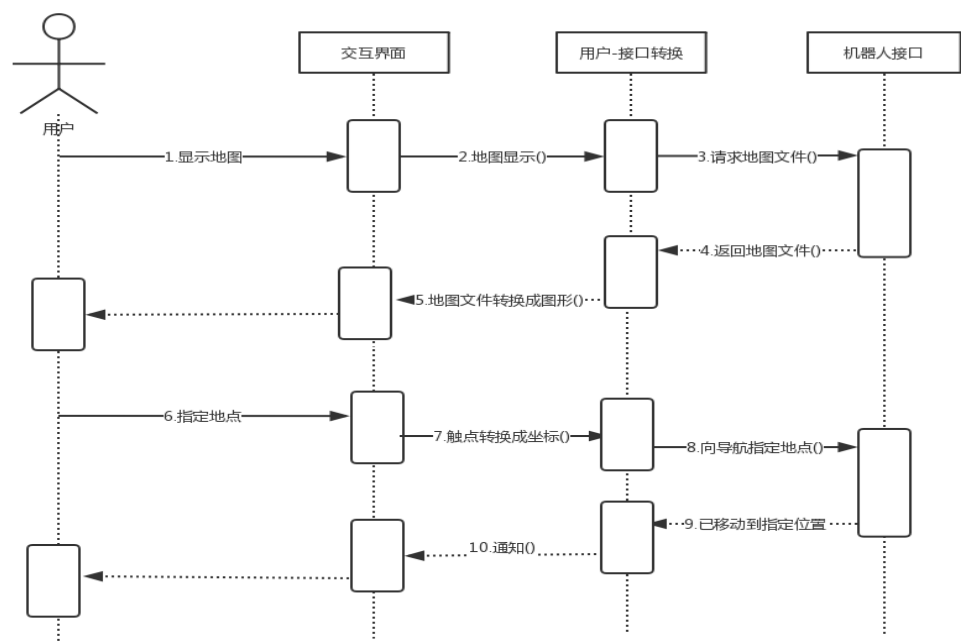


图 40 交互模块交互图

7. 运行与开发环境

7.1 运行环境

硬件环境：启智机器人（详情如下表）。

名称	数量	参数
主控器	1	Intel I3 处理器、4G 内存、128GSSD、触摸屏、键盘
激光雷达	1	360° 无死角、最大距离 8 米
视觉传感器	1	Kinect 2
伺服电机模块	3	20W 伺服电机、内置驱动
轮子	3	3 个全向轮
电池	1	24V3.5AH 锂离子动力电池

软件环境:

ROS: kinetic 版本 ROS 系统, 基于 Ubuntu 16.04。

软件包: 启智机器人的源码包 wpb_home_bringup、wpb_home_behaviors、wpb_home_tutorials 、 wpbh_local_planner, 和 xfyun_waterplus 、 waterplus_map_tools 等启智机器人扩展软件包。软件功能包括: URDF 模型描述、电机码盘里程计、IMU 姿态传感、三维立体视觉、SLAM 环境建图、自主定位导航、动态目标跟随、物品检测、人脸检测、传感器融合、语音识别。

7.2 开发环境

硬件环境:

处理器: intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU @ 3.00GHz 3.00GHz

内存(RAM): 8.00GB

系统类型: 64 位操作系统, 基于 x64 的处理器

软件环境:

操作系统: Ubuntu 16.04

IDE: RoboWare Studio

8. 需求可追踪性说明

8.1 功能性需求

本节将主要从设计的角度论述本文档中体系结构设计的内容和 SRS-软件需求规格说明书中功能/非功能需求的对应关系。

8.1.1 机器人建立环境地图

1. 设计方案: 在导航模块中加入绘图单元, 绘制地图并存储地图。

2. 模块：绘图单元。

8.1.2 机器人的自主导航

1. 设计方案：导航模块基于总控模块传来的位置信息、内部存储的地图信息以及知识源中的路径规划算法和动态避障算法，调用定位单元、运动控制单元和路径选择单元提供自主导航功能。
2. 模块：定位单元、运动控制单元、路径选择单元。

8.1.3 机器人的目标检测及抓取

1. 设计方案：抓取模块基于总控模块传来的目标物体信息和知识源中的目标识别算法，调用机械臂控制单元，提供目标抓取功能。
2. 模块：机械臂控制单元。

8.1.4 机器人的语音交互

1. 设计方案：Web 端发来的经过预处理的语音指令或机器人搭载的面阵麦克风收集到的语音指令会在总控模块中被编码为机器人的行动指令；机器人在完成任务后会发出语音提示，播报任务完成情况。二者结合，即完成了语音交互。
2. 模块：语音交互模块。

8.2 非功能需求

本节将主要从实现的角度论述本文档中体系结构设计的内容和 SRS-软件需求规格说明书中功能/非功能需求的对应关系。

8.2.1 性能需求

1. 优化避障算法及语音识别算法，提高系统实时响应速率。
2. 优化 SLAM 建图算法，提高建图准确率，确保绕场一周即可建立地图模型。
3. 优化路径选择算法，避免出现摆荡，确保机器人平稳移动。

4. 优化目标识别及抓取算法，提高物体识别准确率及抓取成功率。
5. 优化语音的预处理算法，扩大语料库，提高语音识别准确率。
6. 降低算法复杂度，避免系统长时间高负荷运转。

8.2.2 易用性需求

1. 用户界面简洁易用，操作简单易懂。
2. 系统在用户首次操作时给出操作指南，在用户长时间未选定模式时给出操作建议。

8.2.3 可靠性需求

1. 优化错误处理机制，使系统具备一定的处理错误操作的容错能力。
2. 加入数据保护机制及复位机制，使系统即使在发生严重故障时，也依然可以在重启后恢复正常状态。

8.2.4 可扩展性需求

1. 在 web 端和总控模块间采用分层结构模式（客户/服务器风格），提高了室内智能服务型机器人的可扩展性。
2. 系统内部模块化、层次化清晰，便于新增、修改和删除系统功能。

8.2.5 可维护性需求

系统支持维护检修，可以通过更换硬件和修复软件 bug 的方式解决故障。