

doi: 10.7690/bgzd.2018.03.004

未知环境下室内移动机器人定位导航设计与实现

丁林祥, 陶卫军

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为实现室内移动机器人在未知环境下的定位导航, 设计了一台基于机器人操作系统(robot operating system, ROS)的室内移动机器人, 研究了增量式构建栅格地图、代价地图的环境地图构建方法和自适应蒙特卡罗(amcl)定位方法以及运用 Trajectory Rollout 和 Dynamic Window Approaches 算法的路径规划方法。实验结果表明: 该自主导航与定位软件能增量式绘制环境地图, 所规划的路径符合最优路径; 机器人按照规划路径行走时的导航定位精度能够达到 10 cm, 偏转精度达到 $\pm 5^\circ$, 能够实现未知环境下室内移动机器人的定位与导航。

关键词: 定位; 导航; ROS; 栅格地图; 自适应蒙特卡罗; Trajectory Rollout; Dynamic Window Approaches

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Design and Realization of Indoor Mobile Robot Location and Navigation in Unknown Environment

Ding Linxiang, Tao Weijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to achieve the locating and navigation functions of the indoor mobile robot in the unknown environment, we designed an indoor mobile robot which based on robot operating system (robot operating system, ROS). We studied the method of building grid maps and cost maps incrementally, and the adaptive Monte Carlo locating and navigation method, and path planning method which using Trajectory Rollout and Dynamic Window algorithms. The results of test show that the designed autonomous navigation and location software can incrementally draw the environment map, and the planned path is the optimal path. When the robot walks in the room according to the planning path, location accuracy can reach 10 cm and deflection accuracy can reach $\pm 5^\circ$ which can achieve the locating and navigation functions of the indoor mobile robot in the unknown environment.

Keywords: location; navigation; ROS; grid map; adaptive Monte Carlo; Trajectory Rollout; Dynamic Window Approaches

0 引言

智能导航是移动机器人的关键技术, 主要由地图构建、定位和路径规划 3 部分构成^[1-4]。地图构建是指移动机器人根据自身传感器感知周围的环境信息, 建立其工作环境模型的过程^[5-7]; 定位是指确定移动机器人在其工作环境中具体位置的过程, 即移动机器人在虚拟地图中的坐标和姿态^[8-9]; 路径规划是指在复杂的环境中, 在满足一定的约束条件下, 如行走路径的长度及时间短等, 找到一条从指定起始位置到目标位置的安全、无碰撞的优化路径^[10-12]。

近年来, 基于 ROS 操作系统的室内移动机器人引起广泛关注, 其兼容性与模块化的优势得到广泛认可^[13-15]。从解决室内移动机器人导航定位的实际问题出发, 笔者设计了一套基于 ROS 操作系统的室内移动机器人定位与导航方案, 并在所开发的样机上进行了实验测试。

1 机器人结构设计

笔者制作的室内移动机器人采用常见的四轮差速驱动底盘, 同侧两驱动轮采用同步运动信号。Rplidar 激光雷达安放在小车的顶部, 且处于 4 个驱动轮构成四边形的几何中心位置, 其底盘结构如图 1。

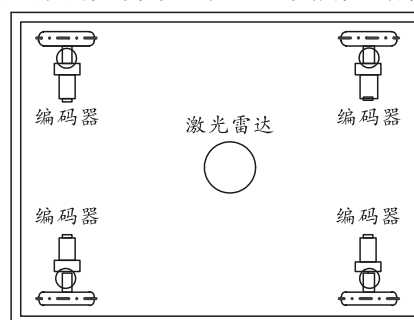


图 1 室内移动机器人的底盘结构

室内移动机器人本体采用模块化设计, 小车身由 5 mm 厚的板件构成, 能很方便地增加其他功

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-01-17

基金项目: 中国自然科学基金(51275244, 61428304)

作者简介: 丁林祥(1992—), 男, 湖北人, 硕士, 从事智能机器人研究。

能模块。制作的室内移动机器人样机如图 2 所示。



图 2 室内移动机器人样机

2 控制系统方案设计

2.1 运动学模型

针对设计的四轮差速驱动机器人，笔者只考虑车轮发生纯滚动，且同侧两驱动轮的运动同步，根据此假设首先建立其运动学模型。

假设机器人参考中心 C 位于四驱驱动轮构成矩形几何中心处，初始时参考中心 C 与世界参考系原点 O 重合。 X 轴为机器人初始运动方向， Z 轴垂直于水平面向外，根据右手笛卡尔坐标系确定 Y 轴。机器人参考中心的坐标为 (x_c, y_c) ，机器人四驱驱动轮半径 R ，两相对驱动轮的间距为 l 。2 维平面下机器人具有 3 个自由度，其位姿向量 $\mathbf{P}=(x_c, y_c, \theta)$ 。四轮差速驱动机器人运动学模型如图 3 所示。

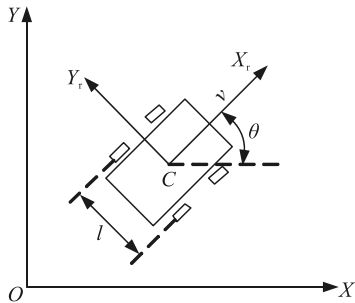


图 3 室内移动机器人四轮差速运动模型

四轮差速驱动机器人运动学方程：

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/l & -1/l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_r \\ v_l \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (2)$$

其中： v 为机器人参考点 C 处线速度； ω 为机器人转动角速度； v_r 和 v_l 分别为机器人左右侧驱动轮的线速度； θ 为机器人运动方向与 X 轴所成航向角； l 为左右两侧驱动间的距离。

由式(1)和式(2)可得机器人的里程计算模型：

$$\left. \begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + v_k \Delta T \cos(\theta_k + \omega_k \Delta T) \\ y_{k+1} &= y_k + v_k \Delta T \sin(\theta_k + \omega_k \Delta T) \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \omega_k \Delta T \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

其中： v_k 为 k 时间的室内移动机器人的线速度； ΔT 为单位采样时间； (x_{k+1}, y_{k+1}) 和 (x_k, y_k) 分别为当前时间 $k+1$ 和前一时间 k 时，室内移动机器人参考中心的坐标； θ_{k+1} 和 θ_k 分别为当前时间 $k+1$ 和前一时间 k 时，室内移动机器人的航向角。

在 k 时间，机器人位姿 (x, y, θ) ，激光雷达测得障碍物 M 相对机器人的距离 ρ 和夹角 ϕ ，该时刻 M 的全局位置坐标为 (x_M, y_M) ，则在该时刻机器人对障碍物 M 的测量值由机器人观测模型图 4 可得。

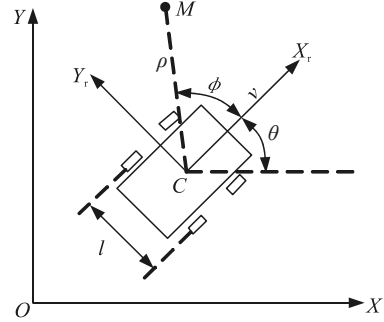


图 4 机器人的观测模型

障碍物 M 的全局坐标为：

$$\left. \begin{aligned} x_M &= x + \rho \cos(\theta + \phi) \\ y_M &= y + \rho \sin(\theta + \phi) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

2.2 硬件系统

机器人的上位机选用嵌入式开发平台 raspberry Pi-3B，在此平台上搭载 ROS 操作系统，主要接收来自激光雷达的数据，构建周围环境地图，同时融合来自下位机的里程数据，实现机器人的自定位与导航功能。下位机选用具有丰富 I/O 接口的 Arduino Mega 单片机，通过 PID 速度调节来控制驱动轮上的电机，实现机器人的运动和避障，同时将接收到的编码器反馈信号处理后，得到里程计数据，并将里程数据传送给上位机的相应功能节点。上位机和下位机之间通过 USB 串口进行通信。硬件控制系统的模块如图 5 所示。

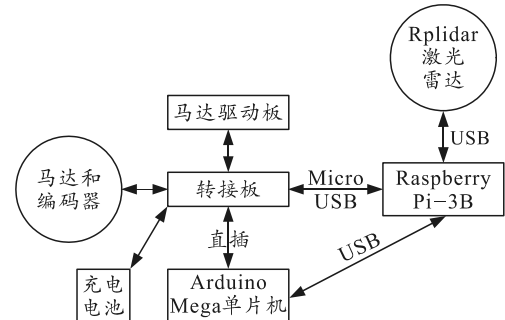


图 5 室内移动机器人硬件结构

激光雷达的环境信息测量主要采用激光三角

测距原理，来获得激光雷达扫描到的物体相对激光雷达的距离和角度信息。信息数据获取后通过 USB 串口传送给上位机的 ROS 相应的功能节点。

2.3 软件系统

笔者设计的室内移动机器人的软件结构如图 6 所示。在上位机嵌入式开发平台 raspberry Pi-3B 上搭载 ROS indigo 机器人操作系统来运行实现环境地图构建和自主定位与导航功能的各个功能节点。其中 Arduino_ros_bridge 包含了用于 Arduino 兼容微控制器的 ROS 节点。Rplidar_driver 包含激光雷达的驱动程序，形成激光雷达所对应的 ROS 节点。Hector_mapping 节点接收来自 rplidar 激光雷达扫描的数据构建环境地图，并构建环境栅格地图。Amcl 即自适应蒙特卡罗定位节点。Move_base 节点实现路径规划。下位机 Arduino mega 编写 Arduino Custom Driver 驱动程序以及 PID 速度控制程序。同时，可在 PC 上安装 ROS indigo 机器人操作系统，来运行 ROS 工具软件 rviz 去观察所设计的室内移动机器人构建的地图，以及显示导航目标和所规划的实时路径。

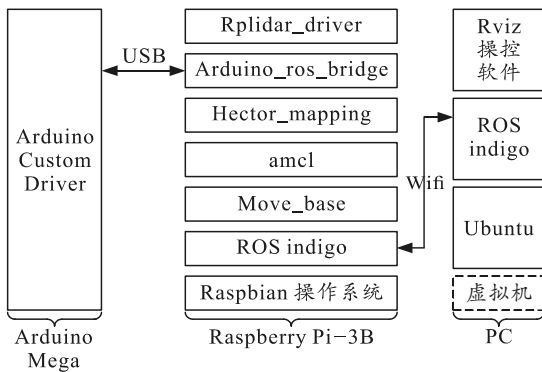


图 6 定位与导航软件的结构

所设计的室内移动机器人，各 ROS 节点之间通信关系以及发送和接收的 topic 和消息类型如图 7。

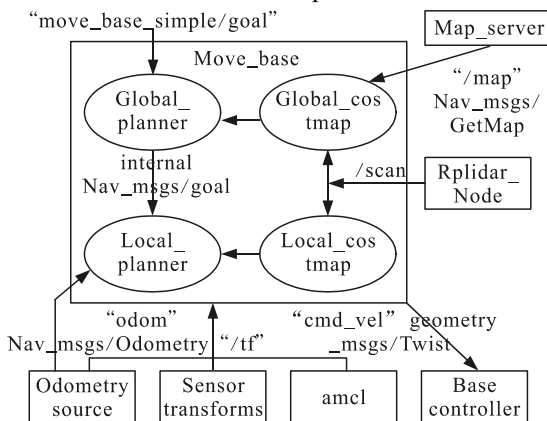


图 7 室内移动机器人上功能包之间通信

图 6 中 Hector_mapping 节点接收来自 Rplidar A2 激光雷达扫描的数据构建环境地图，并通过图 7 中 Map_server 功能包将构建的 Nav_msgs/Getmap 类型“/map”地图数据发送给 move_base 节点。Amcl 节点融合激光扫描数据和里程数据对小车进行定位。笔者采用蒙特卡罗定位方法进行优化，采用自适应的 KLD 方法来更新粒子，能获得更准确的定位信息。图 6 中 Arduino_ros_bridge 节点，利用节点生成的基础控制器 base_controller，通过串口发布上位机运动控制指令“cmd_vel”到下位机，并且读取编码器反馈数据形成数据类型为 Nav_msgs/Odometry 的里程数据“odom”。所有数据的坐标转换都由功能模块 tf 来完成。Move_base 节点实现路径规划，并发布/cmd_vel(geometry_msgs/Twist)主题给 base_controller 节点来控制机器人移动。为了规划出合理的运动轨迹，move_base 会在 Map_server 提供的栅格地图上生成 costmap 代价地图。在 global_costmap 上进行全局的路径规划 global_planner，在 local_costmap 上进行局部的路径规划 local_planner。

全局路径规划(global_planner)主要用来计算机器人到目标位置的全局路线。该功能通过 A*最优路径的算法，计算 costmap 上的最小花费路径，作为机器人的全局路线^[16]。A* 算法实施策略^[16]为：

$$F'(n) = G'(n) + H'(n) \tag{5}$$

其中： $F'(n)$ 为起始节点经由节点 n 到目标节点的评估函数； $G'(n)$ 为起始节点到当前节点 n 的最优路径值，其为已经确定的值； $H'(n)$ 作为 A* 算法评价函数的核心，其为当前节点 n 到目标节点的启发值，即预估开销。对于 A* 算法的搜索过程如下：创建 OPEN 和 CLOSED 2 个表，其中 OPEN 表保存所有已经生成而未考察的节点，CLOSED 表保存已访问过的节点。首先将初始点 S 放入 OPEN 表中，并且将 CLOSED 表置为空。接下来，重复执行以下步骤直到找到最优路径为止：

- 1) 遍历 OPEN，查找 $F'(n)$ min 并将其作为预处理节点。
- 2) 将 1)得到的节点移入 CLOSED 表中。
- 3) 对于当前节点的 8 个相邻节点的每一个节点作如下处理：
 - ① 如果其为障碍物或者已经移入 CLOSED 表中，则忽略掉此节点；
 - ② 如果其不在 OPEN 表中，将其移入 OPEN

表，并将当前节点设置为其父节点，并记录 $F'(n)$ ；

③ 如果其已经在 OPEN 表中，通过 $G'(n)$ 对 OPEN 表中节点再判断，如果有更小值，则将其父节点设置为当前节点，并重新计算 $F'(n)$ 和 $G'(n)$ ；

④ 将目标节点加入 OPEN 表中，即表示路径已找到，否则查找失败，且 OPEN 为空，即无路径。

4) 保存路径，路径即为从目标节点开始，沿着父节点移动至起始节点。

局部实时规划 (local planner) 使用 Trajectory Rollout 和 Dynamic Window approaches 算法计算机器人每个周期内应该行驶的速度和角度 (dx , dy , $d\theta$ velocities)。根据代价地图数据 (costmap)，通过算法搜索到达目标的多条路径，利用一些评价标准 (是否会撞击障碍物，所需要的时间等等) 选取最优的路径，并且计算所需要的实时速度和角度。其中，Trajectory Rollout 和 Dynamic Window approaches 算法的主要思路^[17]如下：

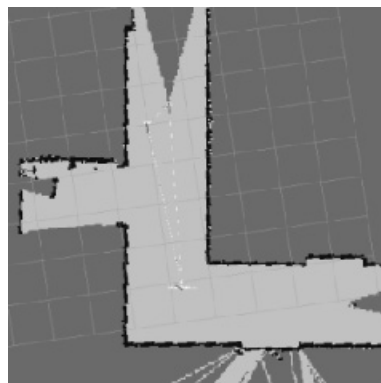
- 1) 采样机器人当前的状态 (dx , dy , $d\theta$)；
- 2) 针对每个采样的速度，计算机器人以该速度行驶一段时间后的状态，得出一条行驶的路线；
- 3) 利用一些评价标准为多条路线打分；
- 4) 根据打分，选择最优路径；
- 5) 重复上面过程，直到找到局部最优路径为止。

3 实验

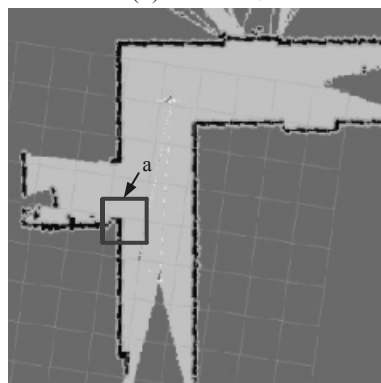
室内移动机器人要实现在未知环境下的定位与导航，必须包含地图构建、机器人自定位和路径规划 3 个部分。为验证所设计的室内移动机器人能够实现未知环境下的定位与导航功能，笔者对这 3 个部分的功能进行了测试实验。

3.1 构建栅格地图和代价地图

在未知环境下采用增量式构图，主要步骤是在未知环境中的不同地点构建局部地图，然后根据里程计数据将各个局部地图合并起来构建全局地图。实验地点为一楼道的拐角处。图 8(a) 是所设计的室内移动机器人绘制的实验场地全局栅格地图，其每个方形栅格的边长为 0.005 m。由于室内移动机器人是把本体当成一个质点来进行路径规划，且质点位于本体的中心位置，而路径规划是不考虑室内移动机器人的实际尺寸。为了避免机器人沿规划的路径移动时与墙壁发生碰撞，在所构建的全局栅格地图上对障碍物所在的栅格进行一定尺寸的屏障，构建了如图 8(b) 的全局代价地图。



(a) 栅格地图



(b) 代价地图

图 8 构建的全局地图

图 8(b) 方框 a 部分的放大显示如图 9 所示。在图 9 中可以看到，黑色部分的障碍物所在的栅格外加了一层灰色的膨胀区。规划的轨迹不能穿过障碍物膨胀区，这样可以防止室内移动机器人沿所规划的路径移动时与障碍物发生碰撞。

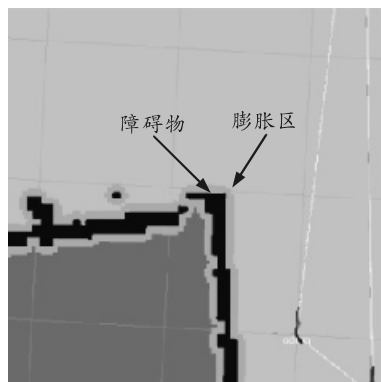
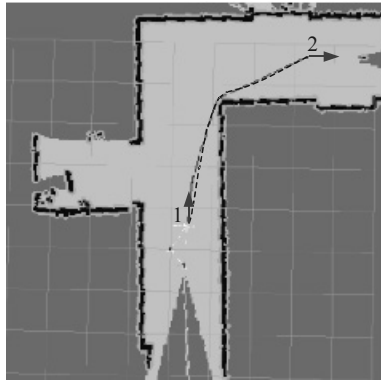


图 9 代价地图局部放大图

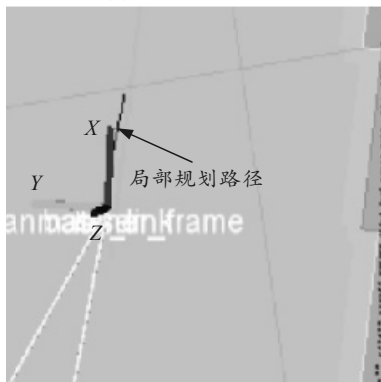
3.2 路径规划实验

进行路径规划实验需要通过 PC 上的 rviz 软件设置目标点，设置目标点时会给定目标处的位姿。图 10(a) 中箭头 1 和箭头 2 分别表示室内移动机器人出发点和目标点的位姿，实线所示的轨迹线是 move_base 节点规划的全局路径，虚线所示的轨迹

线是根据机器人轮子上的编码器数据得到的机器人移动的实际轨迹。图 10(b)中的坐标是固定在机器人中心的坐标，各个坐标轴的方向如图 10(b)所示。固定在机器人上坐标的移动反应了室内移动机器人的运动情况。图 10(b)中短线是 move_base 节点规划的局部路径。



(a) 全局规划路径



(b) 局部规划路径

图 10 路径规划

从图 10(a)中可以看到：move_base 规划的理论全局路径符合最短路径的特点，且线条非常流畅平滑。由里程数据得到的室内移动机器人移动轨迹曲线虽然存在小幅度的波动，但其基本是围绕在 move_base 规划的理论路径上，实现了全局路径规划的功能。

3.3 导航精度测试实验

导航的目的是为了让机器人移动到指定的位姿，由此笔者进行了导航精度测试实验。在图 10(a)全局地图中，以(4 000, -3 000)为目标点坐标，沿 Z 轴的偏转角 90°为目标偏转角。让室内移动机器人从原点以相同的指向角度出发，移动到指定的目标点。图 11 是 20 次重复实验中机器人实际到达点的坐标分布情况。图 12 是 20 次重复实验中机器人实际到达目标点后沿 Z 轴偏转角的分布情况。

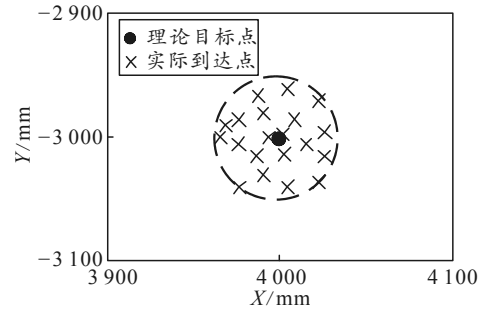


图 11 室内移动机器人实际到达点分布

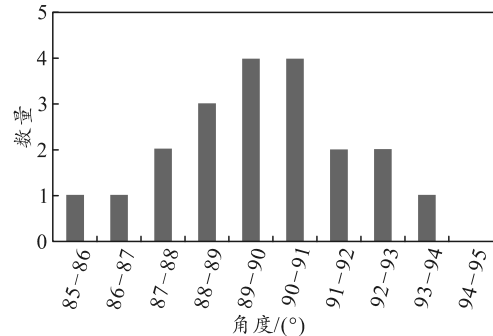


图 12 室内移动机器人导航结束后偏转角分布

由图 11 可以看到：室内移动机器人实际导航到达的点与设置的理论目标点之间存在一定偏差，但目标点基本分布在以(4 000, -3 000)为圆心，半径为 50 mm 的圆内。由图 12 可以看到：室内移动机器人实际偏转的角度也都在目标角度 90°左右小幅波动，且越靠近目标点密度越大。

4 结论

针对所制作的室内移动机器人，笔者实现了低成本、高性能的定位与导航方案，并进行了环境地图构建、路径规划和导航定位精度测试实验。实验结果表明：笔者设计的自主导航与定位软件能增量式绘制环境地图，其所规划的路径符合最优路径；机器人在室内按照规划路径行走时的导航定位精度能够达到 10 cm，偏转精度达到±5°，具有较好的应用前景。

参考文献：

- [1] 蒋浩然, 陈军, 王虎, 等. 移动机器人自动导航技术研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(12): 207-213.
- [2] 邓志, 黎海超. 移动机器人的自动导航技术的研究综述[J]. 科技资讯, 2016, (33): 142-144.
- [3] 弋英氏, 刘丁. 动态环境下基于路径规划的机器人同步定位与地图构建[J]. 机器人, 2010, 32(1): 83-90.
- [4] 白亮亮, 平雪良, 仇恒坦, 等. 分布式室内移动机器人的定位与导航[J]. 轻工机械, 2016, 34(4): 54-57.
- [5] 李志雄. 基于 ROS 的移动机器人导航技术研究[D]. 绵

- 阳：西南科技大学，2016：1-8.
- [6] 沈俊. 基于ROS的自主移动机器人系统设计与实现[D]. 绵阳：西南科技大学，2016：1-6.
- [7] DISSANAYAKE G, DURRANT-WHYTE H, BAILEY T. A computationally efficient solution to the simultaneous localisation and map building (SLAM) problem[J]. Robotics & Automation IEEE Transactions on, 2000, 17(3): 229-241.
- [8] CIVERA J, DAVISON A J, MONTIEL J. Inverse Depth Parametrization for Monocular SLAM[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 24(5): 932-945.
- [9] 曲丽萍. 移动机器人同步定位与地图构建关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2013：1-12.
- [10] 薛永胜. 变电站巡检机器人 SLAM 算法及其应用研究[D]. 绵阳：西南科技大学，2015：1-15.
- [11] 李昀泽. 基于激光雷达的室内机器人 SLAM 研究[D]. 广州：华南理工大学，2016：1-9.
- [12] GRISETTI G, STACHNISS C, BURGARD W. Improving Grid-based SLAM with Rao-Blackwellized Particle Filters by Adaptive Proposals and Selective Resampling[J]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2005, 312(20): 2432-2437.
- [13] 夏汉均. 基于 ROS 的机器人即时定位与地图构建技术的研究[D]. 沈阳：东北大学，2013：1-10.
- [14] 董学会. 基于 ROS 的移动服务机器人进门过程关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016：1-7.
- [15] 卜燕. 基于 ROS 的移动机器人地图创建方法与应用研究[D]. 绵阳：西南科技大学，2016：1-13.
- [16] 马静，王佳斌，张雪. A*算法在无人车路径规划中的应用[J]. 计算机技术与发展，2016, 26(11): 153-156.
- [17] 徐保来，管贻生，苏泽荣，等. 改进动态窗口法的阿克曼移动机器人局部路径规划器[J]. 机电工程技术，2016, 45(9): 21-26.