

# 户外轮式清扫机器人的平台设计

张瑜, 宋荆洲

(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对户外停车场的停车位之间的人工清扫存在人员少、清扫效率低等问题, 本文提出了一款具有自主导航、自主清扫功能的户外轮式清扫机器人。首先为了适应停车场车位间的狭窄空间, 提出独立悬架、四轮独立驱动独立转向的移动底盘和清扫密封装置; 然后为了解决小车的自主导航和运动控制问题, 提出了基于STM32的底层运动控制系统, 以及基于激光SLAM的导航定位系统, 最后在地下停车场的停车位进行了实物实验。实验结果表明, 本文提出的户外轮式清扫机器人在清扫区域与车辆之间的最小距离为5cm, 平均清扫速度0.3m/s, 可以替代人工清扫, 验证了本平台在进行清扫工作时的安全性和高效性。

**关键词:** 机械电子工程; 四轮独立驱动独立转向; 清扫机器人

**中图分类号:** TP242.6

## Platform design of outdoor wheel cleaning robot

ZHANG Yu, SONG Jingzhou

(School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract:** Aiming at the problems of manual cleaning between parking spaces in outdoor parking lots with few people and low cleaning efficiency, this paper proposes an outdoor wheeled cleaning robot with autonomous navigation and autonomous cleaning functions. Firstly, in order to adapt to the narrow space between the parking spaces of the parking lot, an independent suspension, a four-wheel independent drive and independent steering mobile chassis and a cleaning and sealing device are proposed; then in order to solve the problem of autonomous navigation and motion control of the car, a STM32-based bottom motion control is proposed. The system, as well as the navigation and positioning system based on laser SLAM, finally carried out a physical experiment in the parking space of the underground parking lot. The experimental results show that the outdoor wheel cleaning robot proposed in this paper has a minimum distance of 5cm between the cleaning area and the vehicle, and an average cleaning speed of 0.3m / s, which can replace manual cleaning, which verifies the safety of the platform when performing cleaning work and efficiency.

**Key words:** Mechatronics engineering; four-wheel independent drive and independent steering; cleaning robot

## 0 引言

城市中的道路环境卫生和道路上的垃圾清扫程度是城市环境卫生工作的重心<sup>[1]</sup>。在城市里, 道路两旁停车随处可见, 车与车之间狭小地带由于清扫车体型过大, 车辆无法进入, 只能依赖人体的灵活性进入区域内进行清扫, 但是人工效率较低, 给道路卫生清洁带来了很大的阻碍<sup>[2]</sup>。尤其像北方, 秋天一到, 树叶漫天飞舞, 地面上到处都是落叶, 使得车位间的清扫更加艰难, 人工成本较高, 人工效率较低。另一方面, 现在许多年轻人不愿意干清扫保洁这种比较脏、累、技术含量低的工作, 清洁工人趋于老龄化, 工人招收越来越艰难。因此自动化、智能化的道路清扫必将成为发展的主流<sup>[3]</sup>。

随着机器人技术的掀起, 扫地机器人目前主要分为室内扫地机器人和室外扫地机器人,

**作者简介:** 张瑜 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 移动机器人

**通信联系人:** 宋荆洲 (1976-), 男, 副教授, 主要研究方向: 虚拟现实技术, 遥操作技术. E-mail: sjz2008@bupt.edu.cn

室内扫地机器人的不足之处：移动底盘主要采用差分或者全向轮行驶，运动控制算法较为简单，对路况较差的环境无法适应<sup>[4]</sup>。

清扫车应用于道路清洁方面，在国外的研究虽然只有短短的几十年历史，但是取得的成果却很多<sup>[5]</sup>，应用的领域也很广泛，相应的制造技术也形成体系化，清扫工作已经可以实现机械化，仅仅在一些狭窄区域内才采用人工清扫<sup>[6]</sup>。为了适应不同的场地，国外的扫地机器人厂家生产了不同尺寸的清扫车，比如位于日本的车岗公司和富士公司<sup>[7]</sup>。国内发展较晚，上个世纪 80 年代，我国的第一台清扫车在四川被制造而出，填补了我国在清扫车方面的销售空白<sup>[8]</sup>。如今自动驾驶技术也快速发展，2018 年北京环卫集团与百度等多家企业合作，基于阿波罗技术研发了国内第一辆无人驾驶清扫机器人<sup>[9]</sup>，采用高精度 GPS（Global Positioning System）定位，多线激光雷达和超声波阵列进行避障，进行道路两侧垃圾清扫，路况适应性很好，但是由于体积较大，对停车场车位间等狭窄空间还无法使用<sup>[10]</sup>。几类清扫机器人见图 1 所示：



(a) 室内扫地机器人 (b) 无人驾驶户外清扫车

图 1 清扫机器人

Fig. 1 Cleaning robot

本文针对户外停车场停车位之间的清扫工作，研发了一款户外轮式清扫机器人，用于停车场车位间的垃圾清扫，通过一个柔性管道和一旁跟随的大车连接，大车负责垃圾回收和能源提供。基于四轮独立驱动独立转向移动底盘，具有在狭窄空间内全向运动的性能，搭载激光雷达和超声波阵列，具有自主导航和自主清扫的功能。

1 机械结构设计

户外轮式清扫机器人整体结构如图 2 所示：

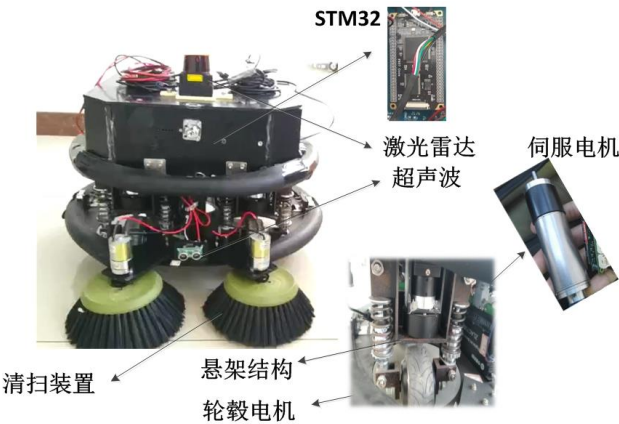


图 2 户外轮式清扫机器人

Fig. 2 Outdoor wheel cleaning robot

清扫机器人配有 4 个 60 W 直流伺服电机, 以及 4 个 4 寸 200 W 轮毂电机, 以及 STM32f407 嵌入式控制器和工业小电脑 i7 处理器<sup>[11]</sup>, 运行 ROS(robot operating system), 版本为 Kineti-  
70 传感器配有 2D 激光雷达、IMU (inertial measurement unit)、GPS、轮式编码器等。为了更好的适应户外停车场不同路况下的清扫工作, 户外清扫机器人的机械结构主要包括清扫密封结构、驱动轮悬架结构, 本节将分别进行介绍。

### 1.1 清扫密封装置

考虑到清扫小车内部空间有限, 小车内部并不安装吸尘器, 而是由管道的另一端连接大-  
75 车, 由大车通过管道提供吸力和动力, 清扫密封结构是为了清扫过程中, 将地面上的落叶进行回收收到车体之中, 再通过软管输送出去, 如图 3 所示。



图 3 实际工作图

Fig. 3 Actual working drawing

80 首先介绍清扫装置, 图 2 中的两只扫刷将前进途中的落叶往小车底盘下进行收拢, 考虑到户外停车场路面存在较大的落叶, 卡在扫刷口无法进入底盘下, 扫刷的刷毛之中夹杂钢丝, 会对落叶进行初步打碎, 当落叶到达底盘之下时, 为了防止落叶堵塞吸管口, 会由吸管口的-  
85 铰刀进行打碎, 然后通过吸管将车底的垃圾通过管道吸走, 完成清扫工作。

为了保证清扫过程中的吸力不外漏, 需要对整辆车进行密封, 密封结构主要分为两部分-  
85 组成。第一部分是车体外壳的密封, 即车体最上层板和最下层板之间的密封, 考虑到这里的外壳需要有一定的防撞性, 所以采用不锈钢 304 的钣金结构, 厚度 0.5mm, 总重量约为 2.5kg。第二部分由橡胶做成的贴地密封结构, 该处的密封结构离地面约 1cm, 为了保证遇到障碍物时能够越过, 将橡胶下部剪成条状, 可保证同时具有一定的密封性和越障性能, 如图 4 所示:



图 4 贴地密封结构

Fig. 4 Ground seal structure

## 1.2 驱动悬架结构

户外清扫小车的移动底盘为四轮独立驱动独立转向结构，由 4 个驱动悬架结构组成，单独的驱动悬架结构如图 5 所示，主要由悬架结构和独立驱动独立转向结构组成。本小节将分别进行介绍：

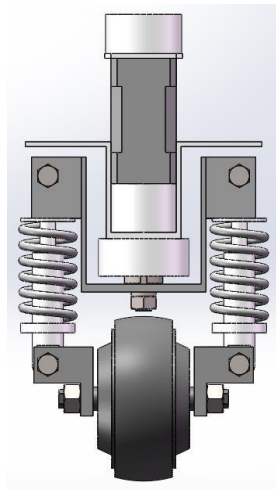


图 5 驱动悬架结构

Fig. 5 Drive suspension structure

### 1.2.1 悬架结构

考虑到停车场路面环境较差，存在着大量空心砖路面和破坏路面，轮胎与地面之间的接触不良，同时路面的颠簸，也会导致车体的抖动，为了保证轮胎与地面之间的良好的接触和缓冲车体的抖动，采用四轮独立悬架结构，单个悬架结构的受力图如图 6 所示：

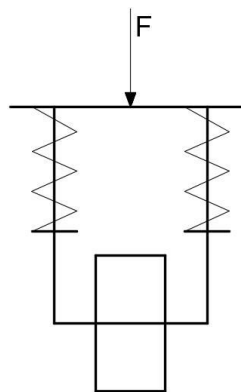


图 6 悬架结构受力图

Fig. 6 Suspension structure stress diagram

机器人平台的重量  $m$  为 30kg，该平台的减震装置一共有 8 根弹簧。设弹簧承受的最大压力与机器人平台总重相同，则每根弹簧所受压力为

$$F = \frac{mg}{8} = \frac{30 \times 9.8}{8} = 36.75N \quad (1)$$

为了保证轮胎与地面之间有一定的伸缩量，结合实际路况，取弹簧压缩量  $dx = 3mm$ ，则弹簧的刚度系数  $k$  计算如下：

$$k = \frac{F}{dx} = \frac{36.75}{3.3} = 11.14 \text{ N/mm} = 1.114 \text{ kgf/mm} \quad (2)$$

压簧的弹簧刚度系数<sup>[12]</sup>计算如下:

$$k = \frac{G \times d^4}{8 \times N_c \times D_m^3} \quad (3)$$

式中:  $G$ :弹簧材料的刚性模数, 查资料得到  $G = 8000 \text{ kg/mm}^2$

$D_m$ :弹簧圈中径;

$N_c$ :弹簧有效圈数, 等于总圈数-2;

$d$ :弹簧丝的直径

本课题初步选  $d = 2.5 \text{ mm}$ ,  $N_c = n - 2 = 6$ , 将式(2)代入式(3)可得:

$$1.114 = \frac{8000 \times 2.5^4}{8 \times 6 \times D_m^3} \quad (4)$$

可得  $D_m = 13.27 \text{ mm}$ , 则去弹簧外径为  $19 \text{ mm}$ 。

综上可得: 弹簧减震器的弹簧选型为: 外径  $19 \text{ mm}$ , 线圈直径  $2.5 \text{ mm}$ , 总圈数  $8$  的压簧。

### 1.2.2 独立驱动独立转向结构

单个独立驱动独立转向结构主要由轮毂电机、减速器、直流无刷伺服电机组成。底盘由四个独立的轮毂电机驱动, 轮胎直径  $120 \text{ mm}$ , 平台速度可达  $2 \text{ m/s}$ , 最大爬坡角度  $20$  度。采用轮毂电机的好处是电机和轮胎一体化减小占用空间, 其次由于轮胎重量较大, 且靠近地面, 大大降低了重心, 提高了小车的稳定性。

驱动轮转向系统由直流无刷伺服电机、减速器、和双列圆锥滚子轴承组成, 为了提高转向电机的扭矩, 减速器的减速比为  $1:28$ , 同时为了防止轮毂电机受到横向载荷对减速器的轴产生横向冲击, 在中间采用双列圆锥滚子轴承过渡, 减小减速器轴受到的横向载荷。直流无刷电机末端配有单圈绝对值编码器, 可以对角度进行实时测量, 整体结构如图 7 所示。

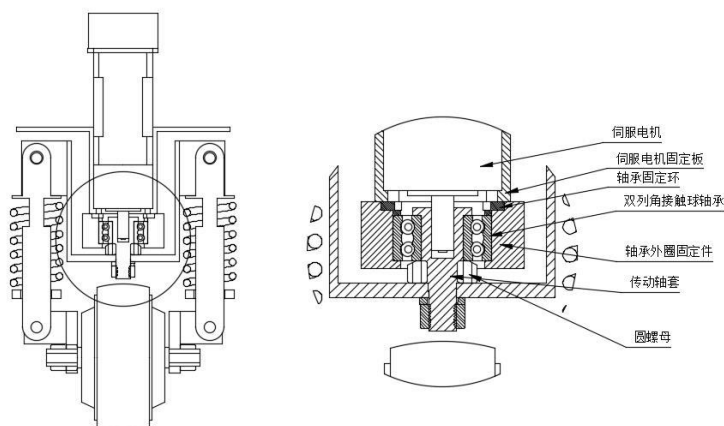


图 7 独立驱动独立转向结构

Fig. 7 Independent driving independent steering structure

## 2 运动控制与导航定位系统设计

### 2.1 运动控制系统设计

为了实现户外清扫小车在狭窄空间内的灵活运动，底盘采用了四轮独立驱动独立转向的伪全向结构，四个驱动结构，一共八个电机，加上每个电机各有一个编码器，总共 8 个编码器，此外还有 6 个超声波传感器等。硬件关系图如图 8 所示：

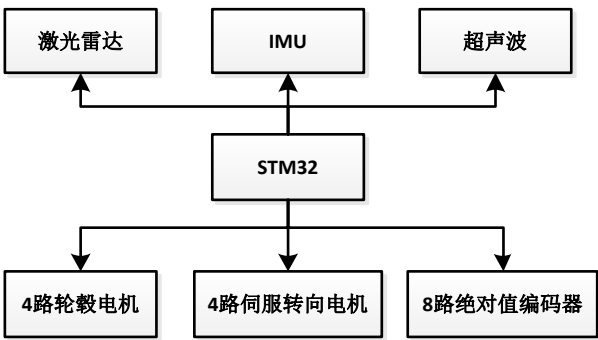


图 8 硬件资源框架图

Fig. 8 Hardware resource framework diagram

为了协调如此多的硬件，主控制器选择 STM32F407ZGT6 核心板，采用 rosserial 协议<sup>[13]</sup>与上层导航定位系统进行通讯，接受小车的速度控制指令，以及实时反馈底层的传感器数据。接收到速度控制指令之后，再进行运动学反解，最后采用 CAN 总线协调控制各个伺服电机，控制小车行驶，运动控制流程图如图 9 所示：

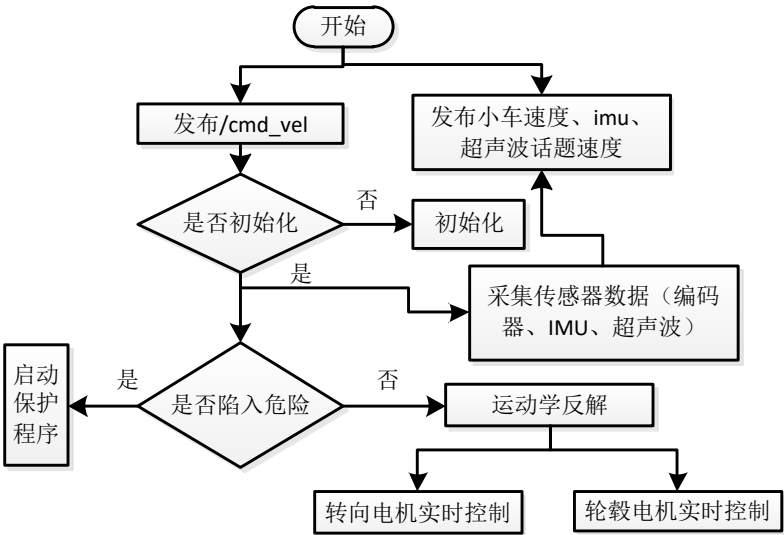


图 9 运动控制流程图

Fig. 9 Motion control flow chart

### 2.2 导航定位系统设计

导航定位系统运行在工业小电脑 Linux 系统下的 ROS 框架中，ROS 系统可根据实际的应用需求启动不同的功能包完成相应的功能，各功能之间相互独立，功能包间可以通过话题、服务的形式传递信息，从而完成整体的功能。

整体系统主要由四个功能包组成，分别是机器人功能包、定位建图包，负责路径规划和

导航的全覆盖路径规划包以及导航包。其中机器人功能包的主要作用是收集小车底层传感器数据，如超声波数据、小车速度信息，进而打包成里程计数据发布出去，同时接收导航包发布的速度指令。其中定位和建图功能包采用的是谷歌开发的 `cartographer`，用来采集多传感器信息进行融合定位，以及根据雷达数据对周围环境进行建图，生成栅格地图，并发布位姿转换关系。全覆盖路径规划包的主要作用是在清扫区域内生成全局路径点，用于弓字形路径的清扫。对于导航包来说，负责接受全局路径点，并对生成控制清扫机器人的指令，使小车尽可能的跟随全局路径并完成避障等动作，其中全局规划器采用 A\*算法，局部规划器采用 DWA（dynamic window approach）<sup>[14]</sup>。

运动控制系统运行在底层的嵌入式平台中，主要通过 `rosterial` 通讯模块接受导航包发来的速度控制指令，负责控制小车整体动作执行。系统模块的通信示意图如图 10 所示：

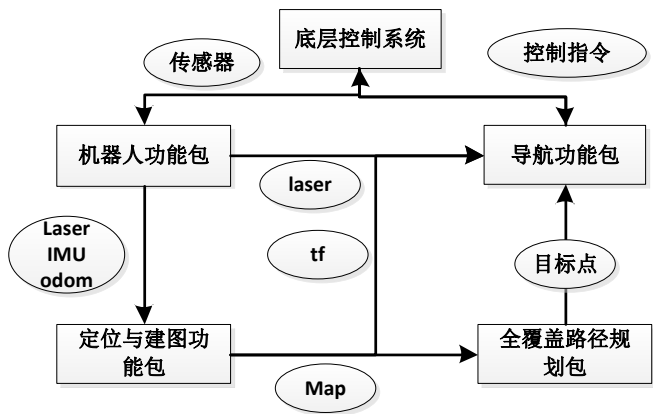


图 10 系统模块通讯示意图

Fig. 10 System module communication diagram

### 3 实验

#### 3.1 实验任务描述

为了对户外清扫小车的清扫能力进行测试，验证小车在工作过程中具有安全性、高效性，本文在地下停车场的停车位之间进行车位间的清扫遍历实验，实验场景如图 11 所示：



图 11 实验场景

Fig. 11 Experimental scene

每个停车位的尺寸在 100\*200cm 左右。为了整个过程中的可视化方便，导航定位系统运行在手持的笔记本电脑中，笔记本型号为联想 Y7000P，系统为 ubuntu16.04。实验的步骤如下：首先是清扫小车对整个清扫区域进行初步的建图，并将地图进行保存，再回到出发点

进行遍历清扫工作。

### 3.2 实验结果

图 12 是建图之后的整个停车场地图，黑色的代表汽车，红色方框之内的区域为停车位。

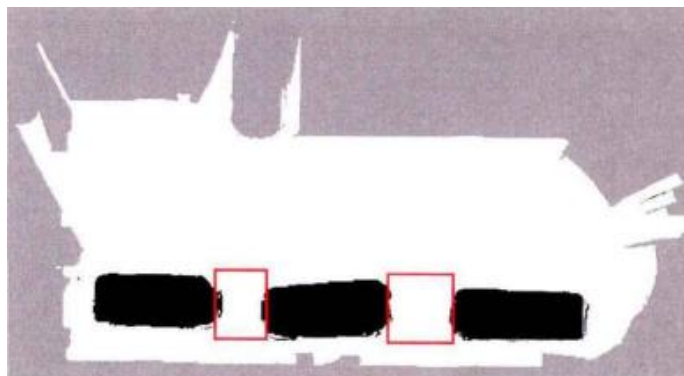


图 12 清扫区域地图

Fig. 12 Cleaning area map

图 13 为整个清扫遍历过程中的视频截图，为了更好的记录实验过程，整个拍摄采用双视角进行，其中仅对停车位之间的清扫区域采用弓字形遍历清扫的方式，在停车位之外采用沿着车身直线行驶的方式。



(a) 沿着红车车身直线行驶

(b) 进入车位 1 进行清扫



(c) 在车位 1 中进行清扫

(d) 结束车位 1 的清扫



(e) 沿着灰车进行直线行驶

(f) 开始进入车位 2 进行清扫



(g) 在车位 2 进行清扫工作

(h) 结束车位 2 的清扫工作

图 13 实验过程视频截图

Fig. 13 Screenshot of experiment video

从视频截图中我们可以发现, 清扫小车在与车身以及车头等部门靠近时, 依旧能够保持一定的安全距离, 约为 5cm, 避免了与轿车发生碰撞的情况, 验证了户外轮式清扫机器人清扫过程中的安全性, 同时两个车位的整体清扫时间为 2 分钟, 平均清扫速度为 0.3m/s, 和人工进行清扫的速度基本一致, 体现了清扫的高效性。

## 4 结论

本文针对户外停车场停车位之间的清扫工作, 提出了一款基于四轮独立驱动独立转向的户外轮式清扫机器人, 具有很强的灵活性, 同时采用四轮独立悬架, 可以较好的适应户外停车场的路面, 搭载 2d 激光雷达和超声波传感器, 通过底层嵌入式的运动控制系统和工业小电脑中的导航定位系统协调控制, 从而达到清扫机器人可以在停车位之间进行自主导航、自主清扫的功能, 并进行了实物实验验证, 验证了该平台的安全性和高效性。

## [参考文献] (References)

- [1] 田忠江, 王坤, 张国鹏. 一种自动清扫垃圾的小车结构设计[J]. 南方农机, 2017, 48(17): 146-147.
- [2] 于博, 杨旭, 吴相利, 等. 中国城市环境污染监管水平的空间演化特征与影响因素[J]. 地理研究, 2019, 38(7).
- [3] 张贺, 胡越黎, 王权, 等. 基于改进D算法的移动机器人路径规划[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(11): 73-74.
- [4] 赵航, 刘玉梅, 卜春光, 等. 扫地机器人的发展现状及展望[J]. 信息与电脑(理论版), 2016(12): 167-168.
- [5] Shiomi M, Zanlungo F, Hayashi K, et al. Towards a Socially Acceptable Collision Avoidance for a Mobile Robot Navigating Among Pedestrians Using a Pedestrian Model[J]. International Journal of Social Robotics, 2014, 6(3):443-455.
- [6] David González, Joshué Pérez, Vicente Milanés, et al. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(4):1135-1145.
- [7] Guo Y, Hong S, Chafi H, et al. Modeling, analysis, and experimental comparison of streaming graph-partitioning policies[J]. Journal of Parallel & Distributed Computing, 2017, 108:106-121.
- [8] 季长明. 面向室外清扫作业的机器人移动平台研制[D]. 2019.
- [9] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进A算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 051(011): 137-143.
- [10] Nacer Hacene, Boubekeur Mendil. Fuzzy Behavior-based Control of Three Wheeled Omnidirectional Mobile Robot[J]. International Journal of Automation and Computing, 2019, 16(2):163-185.
- [11] J. S. Pershina, S. Ya. Kazdorf, A. V. Lopota. Methods of Mobile Robot Visual Navigation and Environment Mapping[J]. Optoelectronics Instrumentation & Data Processing, 2019, 55(2):181-188.
- [12] Nacer Hacene, Boubekeur Mendil. Fuzzy Behavior-based Control of Three Wheeled Omnidirectional Mobile Robot[J]. International Journal of Automation and Computing, 2019, 16(2):163-185.
- [13] X. Wang, L. He, T. Zhao. Mobile Robot for SLAM Research Based on Lidar and Binocular Vision Fusion[J]. Chinese Journal of Sensors & Actuators, 2018, 31(3):394-399.

- [14] Shunyi Zhao, Biao Huang, Fei Liu. Localization of Indoor Mobile Robot Using Minimum Variance Unbiased FIR Filter[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2018, 15(2):410-419.