

# 基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统设计

王险峰, 邱祖泽, 丁子琳, 赵通, 杨浩伟

(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:** 传统的机器人导航系统在复杂的地形环境中常常无法引导机器人躲避突然出现的障碍物, 无法精准采集数据; 为此提出一种改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统, 对系统硬件和软件进行设计; 改进 RBPF 算法是一种滤波算法, 将激光雷达与里程计的信息作为提议分布, 提高了导航精度; 系统硬件主要由导航功能模块、底盘驱动模块、控制模块组成, 利用 RPLIDAR A1 型激光雷达设计导航功能模块, 并设计底盘驱动模块和控制模块; 软件设计中, 以改进 RBPF 算法为基础, 设计了轮式机器人 SLAM 导航系统的实现程序, 应用算法代入的方式加强了普通轮式机器人导航算法对粒子计算与卡尔曼滤波的敏感程度; 实验结果表明, 在有障碍物的室内场景中, 与传统滤波算法以及基于软件库系统相比, 改进 RBPF 算法规划的路径更短, 导航错误点出现率降低了 30% 左右。

**关键词:** 改进 RBPF 算法; 轮式机器人; 机器人导航; SLAM 导航; 系统设计; 导航设计

## Design of Wheeled Robot SLAM Navigation System Based on Improved RBPF Algorithm

WANG Xianfeng, QIU Zuze, DING Zilin, ZHAO Tong, YANG Haowei

(College of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** Traditional robot navigation system is often impossible to guide robots to avoid sudden obstacles in complex terrain environments, and the navigation data cannot accurately collected. To this end, a wheeled robot SLAM navigation system with improved RBPF algorithm is proposed, and the system hardware and software are designed respectively. The improved RBPF algorithm is a filtering algorithm that uses the information of lidar and odometer as the proposed distribution, which improves the navigation accuracy. The system hardware is mainly composed of navigation function module, chassis drive module, and control module. Type RPLIDAR A1 laser radar is used to design navigation function modules, chassis drive module, and control module. In the software design, based on the improved RBPF algorithm, the implementation program of wheeled robot SLAM navigation system is designed, and the applying algorithm substitution enhances the sensitivity of ordinary wheeled robot navigation algorithm for particle calculation and Kalman filtering. Experimental results show that in indoor scenes with obstacles, compared with traditional filtering algorithm and software library-based system, the path planned by the improved RBPF algorithm is more shorter, and the occurrence rate of navigation error is reduced by about 30%.

**Keywords:** improved RBPF algorithm; wheeled robot; robot navigation; SLAM navigation; system design; navigation design

## 0 引言

人工智能技术与机器人技术已经成为当前社会中不可或缺的一部分, 机器人与自主学习功能的相互融合便成为未来的主要发展方向之一。在每个行业中高度的智能化机器人设备均可以起到促进效率、提升工作质量的效果, 例如工业领域的自主化流水线生产、监测领域的智能数据监测等。对于这些高智能化发展的机器人能够精准识别出实时所处的环境和位置是帮助人们生产生活的重要前提, 这也是科研人员一直所追求的智能机器人成果之一。传统轮

式机器人主要在 SLAM 技术的引导下实现对真实环境相关数据的监测和提取, 然后通过机器人自身的激光雷达处理数据完成规划目标路径的任务, 从而达到智能导航的目的。SLAM 技术还可以为机器人搭建一套未知地形的地图资源共享平台, 帮助机器人中的各个激光雷达更好地实现定位功能。

轮式机器人 SLAM 导航系统的研究已经有将近 40 年的历史, 传统方法对于此类机器人自动导航系统的研究主要基于卡尔曼滤波算法, 利用这种算法对机器人周边线性高

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-09。

作者简介: 王险峰(1973-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 副教授, 主要从事机器人、人工智能、物联网方向的研究。

引用格式: 王险峰, 邱祖泽, 丁子琳, 等. 基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4):

172-176.

速噪声系统进行优质处理, 再通过其他不同种类的算法进行非线性系统的设计与数据处理, 可以截取算法中产生的误差。例如文献 [1] 中提出的基于滤波算法的导航系统, 这种系统下的轮式机器人 SLAM 技术与卡尔曼滤波直接共享位置信息, 利用粒子群的分布表示导航系统中障碍的存在位置, 以粒子滤波的方式表示轮式机器人可以通行的路径, 这种系统在较为复杂的地形中更容易应用。文献 [2] 中提出的是基于软件库 cartographer 的导航系统, 此系统利用激光计算机器人所在环境到目的地之间的距离, 然后采用后端非线性优化方式验证距离数据的真实性与准确性, 最后在软件库中搭建地形图场景平台, 减少轮式机器人 SLAM 导航系统提供的路径误差。文献 [3] 提出基于多自适应神经模糊推理的移动机器人导航系统。分别将 3 个红外距离传感器安装在机器人的前、左和右侧, 读取环境中的前、左前和右前静态和动态障碍物。将该传感器数据信息作为输入值输入到 MANFIS 架构中, 为机器人的左右电机生成适当的速度控制命令。

上述方法均具有一定的有效性, 但对轮式机器人 S 导航过程中的路障采集精度仍有待提升。本文将主要研究基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统, 利用改进 RBPF 算法的数据特征优化传统导航系统中存在的缺陷。

## 1 基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统硬件设计

本文研究的基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统硬件主要由导航功能模块、底盘驱动模块、控制模块组成, 系统硬件结构如图 1 所示。

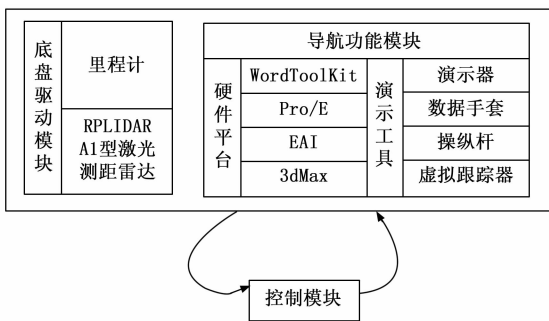


图 1 基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统硬件

### 1.1 导航功能模块设计

导航功能模块是由多方面的硬件结构共同组成的, 主要包括负责功能数据采集的传感器结构和负责数据处理的处理器结构, 两者相互配合从而形成了较为完整的导航功能模块。本文首先介绍传感器硬件结构, 传感器在轮式机器人中是极其重要的数据感知和采集手段, 可以为导航功能模块提供稳定且精准的环境数据, 传感器中一般会存在一定的算法来保障导航功能模块的精准性。

传感器采用 RPLIDAR A1 型激光雷达, 传统的超声波激光雷达大多方向性差、监测范围有限, 甚至还存在数据

错漏现象, 而本文选用的 RPLIDAR A1 型激光雷达按顺时针旋转, 可实现 360 度全方位扫描, 感知环境信息不受光线影响, 在光线不足的地方同样也能完成导航任务<sup>[4-5]</sup>。其能够为导航功能模块中的数据处理单元提供优质的可感知单元。这种传感器还可以在 SLAM 算法基础上引用改进 RBPF 算法, 具有更广泛的算法空间, 这也是本文选用此款传感器的主要原因。其基本参数如表 1 所示。

处理器是导航功能模块的核心结构, 负责处理激光雷达上传的全部内容。本文采用的处理器为嵌入式处理单元, 配置了 i7 6700 芯片, 可以在芯片中安装多种类算法, 芯片在进行算法计算过程中还可以处于低功耗处理状态, 并对外提供丰富的数据接口, 保障数据量计算与交互的同时运行。

表 1 RPLIDAR A1 型激光雷达参数

项目	参数
测量半径	0.15~12 m
采样频率	8 k
扫描频率	5.5 Hz
供电电压	5 V
供电电流	100 mA
功耗	0.5 W
输出	3.3 V 电平
工作温度范围	0~40 °C

### 1.2 底盘驱动模块设计

轮式机器人的底盘可以实时控制机器人的运动速度, 一个好的底盘驱动可以精准进行差速控制, 大多数底盘驱动由两个主动轮子和多个从动轮子组成, 每个主动轮具有独立的驱动模块, 能够为主动轮提供稳定可靠的动力, 而从动轮主要是起到改变方向、辅助支撑的作用, 跟随主动轮的驱动方向来改变整个机器人的运动方向。

带齿轮的底盘驱动是以齿轮作为动力的传输结构, 可以将主动轮轴与从动轮轴相互拉开距离, 保证轮式机器人的多个轮子在运动过程中不相互影响且可以起到相互辅助的作用, 这样的设计结构极大减少了底盘总占用面积, 从而为轮式机器人提供了更广泛的运动空间。本文还在底盘中增加了悬挂系统, 悬挂系统具有增强动力的作用, 再在悬挂系统中添加改进 RBPF 算法, 使悬挂系统也具备数据识别功能, 针对不同的路况提供相应的动力供给量<sup>[6-7]</sup>。

底盘驱动结构电路如图 2 所示。

### 1.3 控制模块设计

本文在控制模块中安装了扩展卡尔曼滤波器, 将此装置中扩展卡尔曼滤波算法和改进 RBPF 算法相配合, 扩展卡尔曼滤波算法用来估计导航地图环境特征位置, 改进 RBPF 算法用来估计机器人所处的位置, 通过两者相互配合, 形成了能够处理不确定性高斯噪声的新算法。

传统机器人的 SLAM 算法中含有大量的噪音, 从而影响了控制模块的数据判断, 为此本文设计的新算法可以较

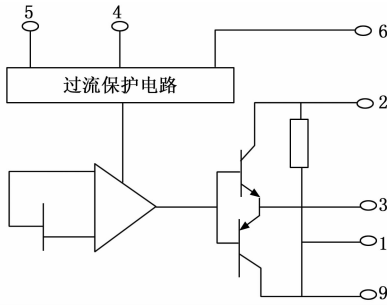


图 2 底盘驱动结构电路图

大程度地减少控制模块的数据判断误差，机器人会根据控制模块对外输出数据来决定实时运动状态，控制模块再通过扩展卡尔曼滤波装置对激光雷达采集数据进行信息融合，制定机器人下一阶段的运动目标。控制模块电路如图 3 所示。

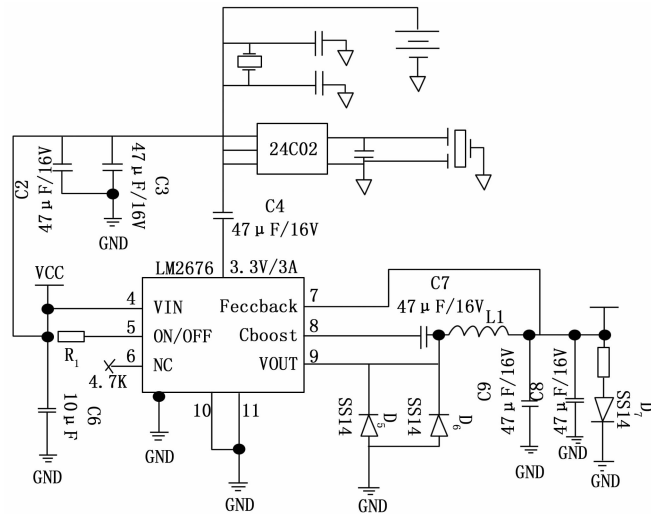


图 3 控制模块电路图

## 2 基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统软件设计

### 2.1 改进 RBPF SLAM 算法

传统的 RBPF 算法中只将里程计信息作为提议分布，机器人在运动的过程中偶尔会发生轮子打滑或漂移的情况，在该情况下里程计所记录的信息会发生较大误差，从而得到的提议分布与现实后验概率分布差距较大。本文中改进的 RBPF 算法将高测量精度的激光雷达信息与里程计信息进行整合优化，得到更能靠近现实后验概率分布的提议分布。改进后的提议分布为：

$$p(x_t | x_{t-1}^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}, z_t, u_{t-1}) = \frac{p(z_t | x_t, m_{t-1}^{(i)}) \cdot p(x_t | x_{t-1}^{(i)}, u_{t-1})}{p(z_t | x_{t-1}^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}, u_{t-1})} \quad (1)$$

其中： $x_t$  表示机器人在  $t$  时刻的动作状态， $x_{t-1}^{(i)}$  表示  $t-1$  时刻的状态， $m_{t-1}^{(i)}$  表示  $t-1$  时刻的环境地图信息， $z_t$  表示  $t$  时刻的观测信息， $u_{t-1}$  表示  $t-1$  时刻的里程计信息。

然而提议分布中的似然函数无法直接获得，因此不能对其进行采样。解决方法是把提议分布近似看作为高斯分布：

$$p(x_t | x_{t-1}^{(i)}, m_{t-1}^{(i)}, z_t, u_{t-1}) \cong N(\mu_t^{(i)}, \sum_t^{(i)}) \quad (2)$$

$$\mu_t^{(i)} = \frac{1}{\eta^{(i)}} \cdot \sum_{j=1}^k x_j \cdot p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, x_j) \cdot p(x_j | x_{t-1}^{(i)}, u_{t-1}) \quad (3)$$

$$\sum_t^{(i)} = \frac{1}{\eta^{(i)}} \cdot \sum_{j=1}^k p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, x_j) \cdot p(x_j | x_{t-1}^{(i)}, u_{t-1}) \cdot (x_j - \mu_t^{(i)})(x_j - \mu_t^{(i)})^T \quad (4)$$

其中： $\eta^{(i)} = \sum_{j=1}^k p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, x_j) \cdot p(x_j | x_{t-1}^{(i)}, u_{t-1})$  表示归一化因子。

改进后的 RBPF SLAM 算法能够自主适应不同运动模式下的提议分布，且能够在普通的粒子运动模型中提取较高权重的粒子，使机器人时刻处于平稳状态，如下所示为较高权重粒子的计算方式<sup>[8-10]</sup>：

$$\omega_t^{(i)} = \omega_{t-1}^{(i)} p(z_t | m_{t-1}^{(i)}, x_t^{(i)}) \quad (5)$$

利用算法公式进行权重计算时，加入激光雷达信息会减小权重方差，此时的粒子分布群出现现峰值，再使用滤波器对粒子群进行发散，便可以调控运动模型与周围环境之间的 1:1 比例关系<sup>[11-13]</sup>。检测实际机器人运动场景和预测场景之间的差异，然后持续进行重采样，评估粒子数是否达到表示路径的标准<sup>[14-16]</sup>。

改进后的 RBPF SLAM 算法具体实现步骤如图 4 所示。

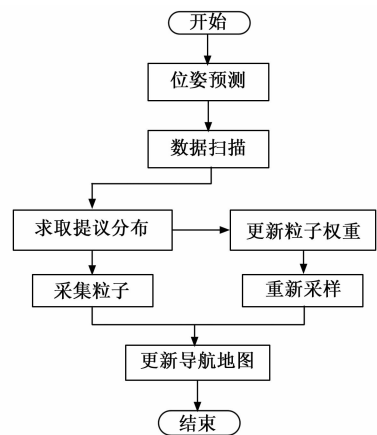


图 4 改进后的 RBPF SLAM 算法实现步骤

### 2.2 基于改进 RBPF SLAM 算法的机器人 SLAM 导航流程实现

改进的 RBPF SLAM 算法在轮式机器人导航中运行首先需要对每个粒子进行卡尔曼过滤，将过滤后的粒子传送到计算矩阵中，等待后期的算法计算；其次是要选择权重较高的粒子初步判断机器人现阶段所在的位置，根据外部地形环境等因素聚集粒子到特殊位置，并防止这些粒子出现大量的离散状态，尽量控制粒子在有限的空间内分布<sup>[17]</sup>；然后对有限空间中的粒子进行统计，为卡尔曼的深

度过滤提供数据保障, 所统计的粒子数必须是在一个独立的粒子群中, 当粒子群中统计的数据量在正常范围区间, 则证明改进的 RBPF SLAM 算法适用于该轮式机器人导航系统, 若粒子群数据量较少或过多, 则证明改进的 RBPF SLAM 算法不适应该轮式机器人导航系统<sup>[18-20]</sup>。改进的 RBPF SLAM 算法在轮式机器人导航中运行过程如图 5 所示。

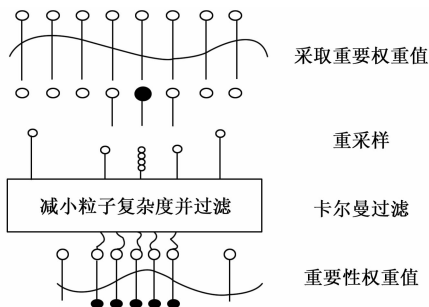


图 5 改进 RBPF SLAM 算法在导航中运行过程

根据图 5 可知, 本文设计的算法实现程序是在普通的粒子权重中提取高质量的粒子, 以便组成更高质量的粒子群, 这样的卡尔曼滤波才会实现路径的距离筛选和障碍物的识别, 保障算法结果的精准性。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验场地设置以及实验过程

本文设计的实验主要针对本文所设计导航系统下的轮式机器人能否在复杂的路径环境中实现精准避障以及减少运动误差等项目, 从这些项目中还对系统设计的完整性和功能性进行判断。

本次实验环境为计算机学院实验楼 1 楼的走廊过道, 在过道的  $3\text{ m} \times 4\text{ m}$  的区域上布置了 8 张椅子作为大障碍物, 2 个纸箱子作为小障碍物。大障碍物的体积为  $64\ 000\text{ cm}^3$ , 小障碍物的体积为  $5\ 850\text{ cm}^3$ 。为了方便地控制机器人, 需要在笔记本电脑和轮式机器人的上位机配置相同的 ROS 系统, 笔记本电脑通过 ROS 系统与机器人进行通信。

首先将轮式机器人放到起始点, 如图 6 所示。然后启动轮式机器人初始化程序, 加载改进 RBPF SLAM 算法导航程序, 改进 RBPF SLAM 算法利用激光雷达与里程计信息实时更新导航地图。通过笔记本电脑端发送目的地坐标, 轮式机器人接收到坐标信息后会进行从起始点到目的地之间的路径规划, 当轮式机器人靠近路障时, 导航系统识别到该障碍物并绕开, 如图 7 所示。绕开路障后, 轮式机器人会继续沿着导航系统的规划路径运动, 当导航系统判断达到目的地的位置时就会退出导航程序, 机器人停止运动, 如图 8 所示。

#### 3.2 实验结果对比与分析

在完成了本文提出的改进 RBPF SLAM 算法的导航实验后, 在相同的实验环境中使用同一个轮式机器人来完成



图 6 轮式机器人初始状态

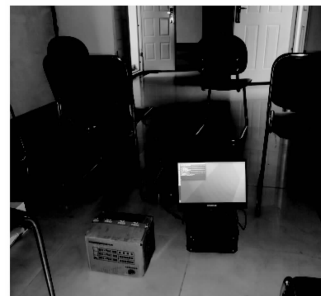


图 7 轮式机器人运动过程



图 8 轮式机器人到达目的地

基于滤波算法系统的导航实验以及基于软件库系统的导航实验。为了统一控制变量, 不同导航系统中的算法计算的初始粒子数均设置为 100, 所计算出的结果将会以特有的格式储存在系统文件中, 保证每组计算数据的类型一致。

本文先分析不同导航系统下轮式机器人的避障效果, 实验中用 A 代表机器人在路径中的初始位置, D 点代表机器人的目的地, C、B 两点均代表机器人因不同导航引导而产生的路径偏差, 设定实验环境中的轮式机器人运动速度保持一致, 3 种系统下的路径引导结果如图 9 所示。

根据图中的路径结果可知, 本文系统下轮式机器人选择的路径最短, 能够在躲避障碍物的前提下完成最短路径的规划, 而其他两种系统下的轮式机器人虽然也能够躲开障碍物, 但是所选择的路径在不同程度上长于本文系统, 因为本文系统所采用的改进的 RBPF SLAM 算法能够对粒子群进行最高权重的筛选和多次选择, 能够判断出到达目的地的最佳距离, 所以本文系统具有更加高效的避障能力。

接着对 3 种系统下轮式机器人内部算法数据储存空间

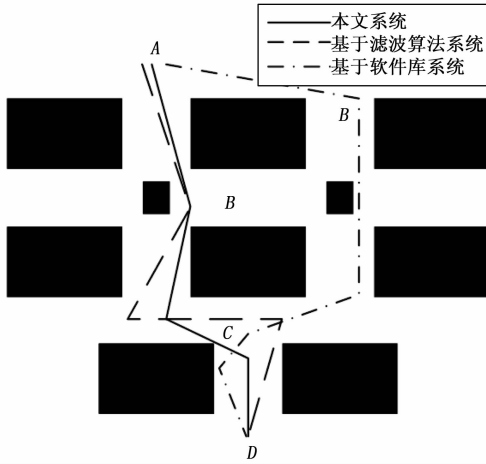


图 9 不同导航系统下的路径选择情况

中的数据误差进行对比, 实验中随着机器人运动时间的增长, 误差也会随之累积, 对外则表现出导航界面中出现错误点的数量增长, 3 种导航系统算法下的误差累积对比结果如图 10 所示。

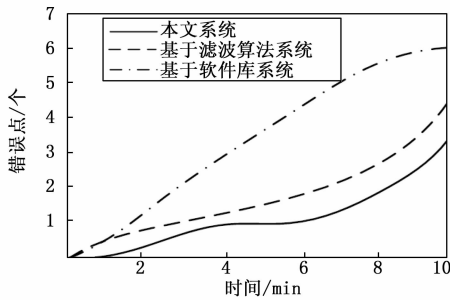


图 10 算法误差对比结果

根据图 10 中的对比结果可知, 本文系统下的算法误差导致的错误点数量在相同的运动时间内, 出现次数最少, 相比其他两种系统平均每 10 分钟少 1~3 个错误点。原因是本文所采用的算法基于控制模块与导航功能模块与算法之间建立了数据共享机制, 加强了算法运算过程中的错误识别率, 进而减少了误差的累积。

#### 4 结束语

本文提出的基于改进 RBPF 算法的轮式机器人 SLAM 导航系统较为注重粒子权重在卡尔曼滤波过程中的筛选阶段, 提高了导航系统的数据真实性, 减少了不必要软件程序的运行, 还可以提升算法对于粒子的重复应用。

本文设计的基于改进 RBPF 算法的导航系统只有在算法得到保障的前提下才可以运行, 即需要测量精度高的激光雷达和比较平坦的地面。虽然具有较高的计算效率, 但是实现过程中比较繁琐, 所以在后续的研究任务中, 还可以将算法的作用作为重点研究内容, 用于提升导航数据的可应用程度。

#### 参考文献:

- [1] 陈国军, 陈 巍. 基于改进 RBPF 算法的机器人 SLAM 方法研究 [J]. 自动化仪表, 2019, 40 (5): 65-68.
- [2] 王 慧, 王 平. 基于 RBPF-SLAM 算法的研究与实现 [J]. 计算机系统应用, 2019, 28 (7): 169-173.
- [3] PANDEY A, KASHYAP A K, PARHI D R, et al. Autonomous mobile robot navigation between static and dynamic obstacles using multiple ANFIS architecture [J]. Military Operations Research, 2019, 16 (2): 275-286.
- [4] 王铭艺, 贺利乐, 李 育, 等. 多传感器信息融合的机器人定位算法研究 [J]. 测试科学与仪器: 英文版, 2020 (2): 152-160.
- [5] 于 镭, 张国强, 王泽龙. 基于单舵轮搬运机器人的导航系统设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (18): 17-22.
- [6] 张廷军, 郭毅锋, 黄丽敏. 改进重采样的机器人 SLAM 算法 [J]. 计算机工程与设计, 2019, 40 (11): 3276-3281.
- [7] 石学文, 赵晓晨, 王庆兰, 等. 基于 ROS 的差分轮式机器人系统的设计 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (9): 92-96, 100.
- [8] 郭 娟. 基于粒子群算法的双臂机器人运动轨迹优化研究 [J]. 中国工程机械学报, 2020 (4): 324-329.
- [9] 封 硕, 谢廷船, 康 靖, 等. 基于双粒子群算法的矿井搜救机器人路径规划 [J]. 工矿自动化, 2020, 46 (1): 65-71.
- [10] 王 闯, 康庆洋, 宋江南, 等. 基于 SLAM 的机器人的导航算法设计 [J]. 智能机器人, 2019 (6): 62-66.
- [11] 成 怡, 佟晓宇. 基于改进 ORB 算法的机器人视觉 SLAM 方法研究 [J]. 电子技术应用, 2019, 45 (1): 16-19, 24.
- [12] 马 静, 朴金宁, 徐 军, 等. 基于激光雷达空气净化导航机器人的研究与设计 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (11): 154-157.
- [13] 金 展. 对于导航机器人关于 SLAM 实现的研究 [J]. 微计算机信息, 2019 (19): 142-143.
- [14] 郭世凯, 孙 鑫. 基于改进粒子群算法的机器人路径规划 [J]. 电子测量技术, 2019, 42 (3): 54-58.
- [15] 黄欣彬, 王 彬. 基于环境表示的机器人 SLAM 算法研究 [J]. 数学的实践与认识, 2020, 50 (20): 142-149.
- [16] 张岳星, 王铁群, 李 硕, 等. 基于海图和改进粒子群优化算法的 AUV 全局路径规划 [J]. 机器人, 2020, 42 (1): 120-128.
- [17] 茹淑慧, 王红旗, 唐 浩. 基于自适应多特征匹配的机器人 SLAM 研究 [J]. 传感器与微系统, 2019 (12): 33-35.
- [18] 尚 磊, 王 杰, 宋尊师, 等. 基于单目 ORB-SLAM2 算法的煤矿搜救机器人定位研究 [J]. 机床与液压, 2020, 48 (11): 54-57.
- [19] 丁斗建, 赵晓林, 王长根, 等. 基于视觉的机器人自主定位与障碍物检测方法 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (6): 1849-1854.
- [20] 董星亮, 苑 晶, 张雪波, 等. 室内环境下基于图像序列拓扑关系的机器人全局定位 [J]. 机器人, 2019, 41 (1): 85-96, 105.