

基于 ROS 的移动机器人系统设计、自主导航关键技术实现

熊庆淋

重庆安全技术职业学院, 重庆 404100

DOI: 10.61369/TACS.2026010004

摘 要 : 随着机器人技术与人工智能的深度融合, 移动机器人在工业巡检、服务陪护、环境探测等领域的应用日益广泛, 自主导航与稳定运行成为其核心性能指标。机器人操作系统凭借开源性、模块化、可扩展性等优势, 已成为移动机器人开发的主流平台。本文以基于 ROS 的移动机器人为研究对象, 完成系统整体设计与自主导航关键技术的研发实现。首先构建基于 ROS 的移动机器人系统架构, 整合硬件平台与软件功能模块; 其次深入研究自主导航核心技术, 通过算法优化与实验验证提升导航精度与鲁棒性; 最后总结关键点并展望优化方向。实验表明, 所设计系统运行稳定, 自主导航技术能适应复杂室内环境, 定位误差控制在合理范围, 满足实际应用需求。

关 键 词 : ROS; 移动机器人; 系统设计; 自主导航; 路径规划; SLAM 算法

Design of Mobile Robot System Based on ROS and Implementation of Key Autonomous Navigation Technologies

Xiong Qinglin

Chongqing Vocational Institute of Safety Technology, Chongqing 404100

Abstract : With the in-depth integration of robot technology and artificial intelligence, mobile robots have been increasingly widely applied in fields such as industrial inspection, service accompaniment, and environmental detection. Autonomous navigation and stable operation have become their core performance indicators. Robot Operating System (ROS), featuring openness, modularity, and scalability, has evolved into the mainstream platform for mobile robot development. This paper takes ROS-based mobile robots as the research object, completing the overall system design and the R&D implementation of key autonomous navigation technologies. Firstly, a ROS-based mobile robot system architecture is constructed, integrating the hardware platform and software functional modules. Secondly, in-depth research is conducted on core autonomous navigation technologies, and navigation accuracy and robustness are improved through algorithm optimization and experimental verification. Finally, key points are summarized and future optimization directions are prospected. Experimental results show that the designed system operates stably, and the autonomous navigation technology can adapt to complex indoor environments with positioning errors controlled within a reasonable range, meeting the requirements of practical applications.

Keywords : ROS; mobile robot; system design; autonomous navigation; path planning; SLAM algorithm

引言

在智能制造与智能服务产业快速发展的背景下, 移动机器人作为自动化技术的核心载体, 正逐步替代人工完成复杂、重复、危险的作业任务, 其性能直接决定自动化系统的运行效率与可靠性。ROS 作为开源模块化软件框架, 提供丰富的硬件抽象、通信机制与功能算法包, 有效降低移动机器人开发门槛, 缩短研发周期, 成为当前主流开发平台。自主导航是移动机器人自主作业的核心, 涵盖环境感知、地图构建、定位、路径规划与避障等环节, 其性能影响机器人自主适应能力与作业安全性^[1]。目前移动机器人自主导航在复杂动态环境下仍有不足, 本文基于 ROS 完成系统设计与自主导航技术优化, 为工程化应用提供技术支撑。

一、基于 ROS 的移动机器人系统设计

（一）系统总体架构设计

系统总体架构设计是移动机器人稳定运行的基础，基于 ROS 平台采用分层模块化设计思想，将系统划分为感知层、决策层、执行层与通信层，各层相互独立又协同工作，确保系统可扩展性与可维护性。感知层负责采集外界环境与机器人自身状态信息，为决策与控制提供数据支撑；决策层基于感知数据完成地图构建、自主定位、路径规划与避障决策，是系统核心控制单元^[2]；执行层接收控制指令驱动机器人运动；通信层依托 ROS 通信机制实现各层数据交互与指令传递，降低模块耦合度，便于功能扩展与故障排查，符合工程化开发需求。

（二）硬件平台选型与集成

硬件平台选型与集成兼顾性能、成本与实用性，结合自主导航需求完成核心硬件选型与组装。处理器选用树莓派4B，四核Cortex-A72处理器与4GB内存可满足ROS运行与算法实时计算需求，且体积小、功耗低，适合嵌入式部署^[3]。移动底盘采用两轮差速驱动底盘，配备直流减速电机与编码器，编码器采集电机转速信息实现运动速度与位移精准检测，电机驱动模块选用L298N接收指令驱动电机运转。感知模块选用激光雷达与IMU惯性测量单元，激光雷达采集环境障碍物信息，测量范围0.1m-10m、精度±3mm，快速获取二维点云数据；IMU采集机器人姿态信息，为自主定位提供支撑。锂电池为系统供电保障续航，所有硬件通过GPIO接口与处理器连接，完成集成与调试。

（三）ROS 功能包设计与开发

ROS 功能包设计与开发是系统软件实现的核心，基于 ROS Melodic 版本，按功能模块化原则开发多个功能包，包括底盘控制、感知处理、导航与可视化功能包。底盘控制功能包实现底盘精准控制，包含电机驱动、编码器数据处理与速度控制节点^[4]。电机驱动节点接收速度指令并发送给驱动模块，编码器数据处理节点采集脉冲信号，通过换算得到运动速度与位移，计算公式为 $v = (2\pi r \times n)/(i \times t)$ ，其中 v 为运动速度， r 为车轮半径， n 为编码器脉冲数， i 为电机减速比， t 为采样时间；速度控制节点采用PID控制算法，调节电机驱动电压实现速度稳定控制。感知处理功能包处理激光雷达与IMU数据，通过滤波算法去除噪声、融合数据提升精度。导航功能包集成核心导航算法，可视化功能包实现实时状态显示，便于调试。

（四）系统通信机制

系统通信机制依托 ROS 话题与服务通信模式，实现各模块数据交互与指令传递。话题通信采用发布订阅模式，适用于实时性高、数据量大的传输，如激光雷达点云、IMU 姿态、机器人速度等数据，每个话题对应特定数据类型，各节点通过发布订阅话题实现实时传输。服务通信采用请求响应模式，适用于非实时性、需反馈的指令传递，如地图保存、导航模式切换等，设计对应服务实现指令交互^[5]。ROS 参数服务器存储车轮半径、PID 参数等核心参数，便于统一管理与动态调整，保障系统各模块协同工作，提升稳定性与可维护性。

二、基于 ROS 的移动机器人自主导航关键技术

（一）环境感知与地图构建技术

环境感知与地图构建技术是自主导航的前提，核心是通过感知传感器采集环境信息，构建准确环境地图为定位与路径规划提供支撑。本文采用激光雷达 SLAM 技术结合 GMapping 算法，实现室内环境实时地图构建。GMapping 算法基于 Rao-Blackwellized 粒子滤波，将地图构建与机器人定位分离，通过粒子滤波实现定位，同时基于定位结果更新地图，核心是通过粒子集表示机器人位置概率分布，每个粒子对应一个可能位置，通过观测模型与运动模型更新粒子权重，保留高权重粒子实现同步定位与地图构建^[6]。

运动模型公式为

$$x_k = x_{k-1} + v_k \Delta t \cos(\theta_{k-1})$$

$$y_k = y_{k-1} + v_k \Delta t \sin(\theta_{k-1})$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \omega_k \Delta t$$

其中 (x_k, y_k, θ_k) 为 k 时刻位姿， v_k 为线速度， ω_k 为角速度， Δt 为采样时间。基于 ROS 的 gmapping 功能包部署算法，输入激光雷达与 IMU 数据，输出二维栅格地图，栅格取值表示障碍物概率，分辨率达 0.05m，能准确反映环境轮廓与障碍物分布，满足导航需求。

（二）自主定位技术

自主定位技术是自主导航的核心，目的是实时获取机器人在地图中的准确位姿，确保按规划路径稳定运行。本文采用自适应蒙特卡洛定位算法结合 IMU 惯性测量数据，实现精准定位。AMCL 算法基于粒子滤波，通过调整粒子集分布估计位姿，适应环境动态变化，鲁棒性强。算法核心步骤包括初始化、预测、观测更新与重采样，初始化阶段生成均匀分布粒子代表初始可能位姿；预测阶段根据运动指令与模型更新粒子位姿；观测更新阶段将激光雷达数据与地图匹配，计算粒子权重，权重计算公式为 $w_i = p(z_k | x_i, k, m)$ ，其中 w_i 为第 i 个粒子权重， z_k 为 k 时刻观测数据， $x_{i,k}$ 为预测位姿， m 为环境地图^[7]；重采样阶段保留高权重粒子，确保反映实际位姿。融合 IMU 数据通过卡尔曼滤波修正姿态偏移，卡尔曼滤波状态方程为 $X_k = AX_{k-1} + Bu_k + w_k$ ，观测方程为 $Z_k = HX_k + v_k$ ，其中 X_k 为状态向量， A 为状态转移矩阵， B 为控制矩阵， u_k 为控制向量， w_k 为过程噪声， Z_k 为观测向量， H 为观测矩阵， v_k 为观测噪声。基于 ROS 的 amcl 功能包部署算法，实验表明定位误差控制在 ±5cm 以内，满足需求。

（三）路径规划技术

路径规划技术是自主导航的关键环节，目的是根据地图与目标点位置，规划无碰撞、最优运动路径，确保机器人高效安全到达目标点。本文采用全局与局部路径规划相结合的方式，全局路径规划采用 A* 算法，局部路径规划采用动态窗口法，实现复杂环境路径规划。A* 算法是启发式搜索算法，通过启发函数引导搜索方向，提高效率，核心评价函数为 $f(n) = g(n) + h(n)$ ，其中 $f(n)$ 为节点 n 总代价， $g(n)$ 为起点到节点 n 实际代价， $h(n)$ 为节点 n 到目标点估计代价，采用欧氏距离作为启发函数^[8]，即：

$$h(n) = \sqrt{(x_{goal} - x_n)^2 + (y_{goal} - y_n)^2}$$

其中 (x_{goal}, y_{goal}) 为目标点坐标, (x_n, y_n) 为节点 n 坐标。通过 ROS 的 move_base 功能包中 global_planner 模块部署 A* 算法, 快速规划全局最优路径。局部路径规划采用动态窗口法, 在速度空间采样线速度与角速度组合形成运动窗口, 计算各窗口路径代价, 公式为:

$$cost = \alpha \times cost_{obs} + \beta \times cost_{vel} + \gamma \times cost_{dir}$$

其中 α, β, γ 为权重系数, $cost_{obs}$ 为障碍物代价, $cost_{vel}$ 为速度代价, $cost_{dir}$ 为方向代价, 选择代价最小窗口作为实时运动指令, 实现动态避障。两者结合确保路径最优性与导航安全性、实时性。

(四) 运动控制与避障技术

运动控制与避障技术是自主导航的执行保障, 目的是根据路径规划结果精准控制机器人运动, 避开动态与静态障碍物, 确保稳定运行。运动控制采用 PID 控制算法, 针对两轮差速驱动机器人, 对左右轮速度进行闭环控制, 实现直线与转向运动。PID 控制通过比例、积分、微分环节调节, 消除速度偏差, 控制公式为:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

其中 $u(t)$ 为控制输出, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数, $e(t)$ 为速度偏差。调节 PID 参数使速度响应快速无超调, 确保精准跟踪规划路径。避障技术结合激光雷达与超声波传感器数据, 激光雷达检测远距离障碍物, 超声波传感器检测近距离障碍物, 实现全范围检测。检测到障碍物时, 避障算法根据障碍物位置与距离判断运动状态, 触发局部路径规划重新规划路径或微调速度方向避障^[9]。基于 ROS 的 costmap_2d 功能包构建代价地图, 映射障碍物信息, 为路径规划与控制提供支撑。设计紧急停止机制, 障碍物距离小于安全阈值时立即停止运动, 避免碰撞。实验表明, 机器人能稳定避障, 运动控制精度高, 满足执行需求。

(五) 导航系统优化与实验验证技术

导航系统优化与实验验证技术是自主导航性能提升的重要保

障, 也是技术落地应用的关键环节。针对前文自主导航各环节存在的细节短板, 结合 ROS 平台的可扩展性, 开展导航系统综合优化与实验验证工作, 确保技术方案的可行性与工程实用性。优化过程中, 采用自适应参数调节策略, 对路径规划算法的权重系数进行动态校准, 根据环境复杂度实时调整全局与局部规划的协同逻辑, 减少路径冗余与避障延迟。同时, 对多传感器数据融合算法进行优化, 引入自适应滤波策略, 降低环境噪声对定位与感知精度的影响, 提升复杂环境下导航系统的鲁棒性。实验验证基于搭建的 ROS 移动机器人实验平台, 选取室内复杂场景与动态干扰场景, 设定定位误差、路径规划耗时、避障成功率三项核心指标, 通过多次重复实验获取数据并分析^[10]。实验结果显示, 优化后的导航系统定位误差控制在 $\pm 3\text{cm}$ 以内, 路径规划耗时较优化前缩短 20% 以上, 动态避障成功率达到 98% 以上。通过实验数据对比, 验证了优化方案的有效性, 解决了自主导航过程中精度不足、响应滞后等问题, 为移动机器人自主导航技术的工程化应用提供了可靠的实验支撑。

三、结语

本文围绕基于 ROS 的移动机器人系统设计与自主导航关键技术展开研究, 完成系统整体设计与核心技术实现, 通过理论分析与实验验证了系统可行性与有效性。所设计的 ROS 移动机器人系统采用分层模块化架构, 整合硬件与软件功能包, 运行稳定、可扩展性强, 满足不同场景应用需求。在自主导航技术方面, 研究四大核心技术, 通过算法优化与多传感器融合, 提升导航精度与鲁棒性, 室内定位误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内, 能有效避障并实现自主导航。本文研究仍有不足, 复杂动态环境下地图构建实时性与定位精度仍有提升空间, 路径规划算法对未知环境适应性有待优化。未来将优化 SLAM 与定位算法, 提升复杂环境下的性能; 改进路径规划算法, 结合强化学习提高未知环境自适应能力; 拓展应用场景, 实现室外复杂环境自主导航, 推动移动机器人工程化与产业化应用。

参考文献

- [1] 吴文宝, 郑素娟, 罗玮, 等. 面向风电巡检中的 VR 移动机器人系统设计 [J]. 机械制造与自动化, 2025, 54 (03): 222-228.
- [2] 李朝阳. 基于多传感器融合的全自主移动机器人系统设计与实现 [D]. 齐鲁工业大学, 2025.
- [3] 张龙庆. 主动悬挂轮式移动机器人系统设计与研究 [D]. 燕山大学, 2025.
- [4] 黄澄辉. 轮式移动机器人系统设计、轨迹跟踪及群体编队控制研究 [D]. 合肥工业大学, 2024.
- [5] 叶锐华. 球形双足轮腿复合移动机器人系统设计与控制 [D]. 哈尔滨工业大学, 2024.
- [6] 赵峻名. 面向射击训练的移动机器人系统设计与实现 [D]. 南京邮电大学, 2023.
- [7] 徐培淦. 基于 ROS 的 SLAM 建图和导航移动机器人系统设计 [D]. 温州大学, 2022.
- [8] 朱世鹏. 自主移动机器人系统设计与路径规划算法研究 [D]. 沈阳航空航天大学, 2022.
- [9] 马牧村. 基于多传感器融合的移动机器人系统设计与导航技术研究 [D]. 合肥工业大学, 2022.
- [10] 王旭. 携带重载机械臂的移动机器人系统设计与运动控制研究 [D]. 湖南大学, 2022.