

移动机器人自主导航与路径规划算法研究

文豪 刘贵容 王哲
重庆移通学院 重庆 401420

摘要: 随着人工智能与传感技术的飞速发展,移动机器人已广泛应用于智能仓储、无人配送、安防巡检及空间探索等诸多领域。自主导航能力是移动机器人实现智能化、无人化作业的核心支撑,其性能直接决定了机器人的工作效能与应用前景。在复杂的现实环境中,机器人需具备感知、决策与控制的完整能力链,才能实现从起点到目标点的安全、高效与可靠移动。因此,对移动机器人自主导航与路径规划技术的深入研究,不仅是机器人技术演进的内在要求,更是推动相关产业智能化升级的关键动力,具有重要的理论价值与广阔的实践意义。

关键词: 移动机器人;自主导航;路径规划;算法

引言

当前,移动机器人正从结构化室内环境走向大规模、动态不确定的开放场景,这对自主导航技术提出了更高挑战。导航系统通常遵循感知、规划、控制的经典架构,其中路径规划作为决策环节的核心,连接着环境感知与底层执行,其算法的优劣至关重要。尽管A-Star、DWA等传统规划算法在特定场景下已较为成熟,但在面对高度动态、非结构化的复杂环境时,其在实时性、鲁棒性及适应性方面仍存在明显不足。近年来,混合规划策略与深度强化学习等新方法的兴起,为提升机器人的自主智能水平开辟了新的路径。深入探索各类算法的特性并进行有效优化,是推动该领域持续前进的关键。

一、移动机器人自主导航技术基础

1. 环境感知与地图构建

环境感知与地图构建是移动机器人实现自主导航的基础支撑技术,其核心任务是解决机器人的实时定位与环境建模问题。该过程主要通过同步定位与地图构建技术实现,该系统以前端-后端架构为基础:前端通过激光雷达、视觉惯性里程计等多源传感器获取环境特征信息,后端通过非线性优化或滤波器算法实现位姿图优化,从而同步完成环境地图的增量式构建和机器人自身位姿的精确估计。在具体实现层面,激光SLAM基于点云匹

配算法实现高精度建图,视觉SLAM则通过特征点提取与匹配实现更丰富的场景理解。该技术构建的栅格地图或语义地图为后续路径规划提供环境先验,而持续的定位更新则确保了规划决策的时效性。SLAM系统的精度与鲁棒性直接决定了导航系统的性能边界,是机器人实现真正自主移动的首要技术前提。

2. 智能路径规划与决策

在已知地图和自身位置后,机器人需要规划一条从起点到目标点的最优路径。这通常分为全局规划和局部规划两个层次。全局规划基于已有地图信息,像汽车导航一样规划一条宏观最优路线。而局部路径规划则侧重于战术层面的实时决策,当机器人在执行全局路径的过程中,利用激光雷达、深度相机等传感器实时感知周围环境,应对全局地图中未标明的未知障碍物或动态物体,例如突然出现的行人或其他移动设备。此时,局部规划器如动态窗口法DWA,会对全局路径进行在线微调,生成瞬时、安全、可行的运动指令,实现实时避障。正是这种全局与局部相结合的决策机制,使得移动机器人不仅拥有明确的行动方向,更具备了在复杂多变的环境中灵活应对的智能。

3. 运动控制与执行

路径规划模块生成了一条理想参考轨迹,而运动控制与执行环节的核心任务,是将此数字化的路径指令转化为机器人精准的物理运动。该层级作为导航系统的最终执行者,通过底层的闭环控制器,持续计算并精确调节机器人的轮子转速与转向角度,其目标是确保实际运动轨迹能够平稳且准确地跟踪规划路径。实现这一目标

基金项目: 2024年重庆市教育委员会科学技术研究项目,项目名称:复杂物流环境下移动机器人障碍物识别及导航研究(项目编号:KJQN202402405)

的关键在于控制器必须深度融合机器人的运动学模型，例如差速驱动模型或阿克曼转向模型，使生成的控制指令符合机器人自身的物理约束。面对现实环境中不可避免的地面滑动、轻微颠簸等动态干扰，一个鲁棒的运动控制器能够通过实时测量与反馈补偿，主动抵消这些扰动带来的轨迹偏差。因此，运动控制与执行的性能直接决定了导航任务的成败，它是将上层智能决策无缝、可靠地转化为现实世界精准行动的桥梁与保障。

二、移动机器人路径规划算法

1. 全局路径规划算法

全局路径规划算法在已知环境地图的基础上，解决移动机器人从起始点到目标点的最优路径搜索问题。该类算法基于环境完全已知的假设，通过图搜索或采样等策略，在构型空间中寻找满足特定指标（如路径最短、能耗最低或安全性最高）的可行路径。经典算法A采用启发式搜索策略，其代价函数 $f(n) = g(n) + h(n)$ 综合考量已走路径的实际代价 $g(n)$ 和到达目标的预估代价 $h(n)$ ，在保证最优性的同时显著提升搜索效率。针对高维或复杂约束的规划问题，基于采样的快速扩展随机树（RRT）及其优化版本（如RRT*）通过概率完备性保证，有效解决复杂环境中的路径发现难题。全局路径规划的结果为后续局部规划层提供了重要的参考轨迹，是确保整个导航系统性能的基础。

2. 局部路径规划算法

局部路径规划是移动机器人导航系统中的实时决策层，主要解决动态未知环境下的在线避障问题。该算法以前端感知数据为输入，在全局路径约束下进行局部轨迹优化。其技术特点体现在三个方面：首先是实时性，算法需要在毫秒级时间内完成运动指令的生成；其次是动态适应性，能够有效处理移动障碍物的运动预测与避让；最后是运动约束符合性，保证生成的轨迹满足机器人运动学特性。典型算法如动态窗口法，通过在速度空间进行采样，结合障碍物距离约束和运动学模型，评估轨迹的代价值。而时间弹性带算法则通过数值优化方法，将全局路径视为可形变的弹性带进行局部调整。这些方法通过模型预测控制框架，实现了动态环境下的安全导航，是机器人应对环境不确定性的关键技术保障。

3. 智能仿生路径规划算法

智能仿生路径规划算法是通过模拟自然界生物群体的智能行为来解决复杂优化问题的一类方法。这类算法的核心优势在于其自组织、自适应特性，不依赖精确的

环境模型即可实现分布式决策。蚁群算法模拟蚂蚁觅食过程中的信息素正反馈机制，通过信息素浓度来表征路径优劣，最终促使群体智慧收敛到最优解。粒子群优化算法则模拟鸟群飞行中的社会行为，通过个体经验与群体经验的平衡来搜索最优路径。与传统的确定性算法相比，仿生算法在处理高维、非线性问题方面展现出独特优势，特别是在环境模型不完整或存在多个局部最优解的场景下。这类算法为移动机器人在复杂动态环境中的路径规划提供了新的解决思路，但其收敛速度和参数敏感性仍是需要持续优化的研究方向。

三、算法优化与改进

1. 融合多种算法优势的混合策略

针对单一算法在复杂环境中存在的局限性，采用混合策略成为提升系统性能的重要途径。该策略通过有机结合不同算法的优势，实现功能互补。典型实现方式是将全局规划算法与局部规划算法进行分层融合。首先利用A*或快速探索随机树等全局规划器生成一条基于先验地图的参考路径，作为导航的基准轨迹。随后通过动态窗口法或时间弹性带等局部规划器进行实时轨迹优化，在跟踪全局路径的同时规避动态障碍物。这种架构既保留了全局规划的宏观最优性，又兼具局部规划的实时避障能力。系统通过设置重规划机制，当环境发生重大变化时能够重新调用全局规划器更新参考路径，从而保证系统在动态环境中的长期可靠性。混合策略有效平衡了路径质量与实时性能，是当前最实用的工程解决方案。

2. 引入智能学习算法的自适应优化

基于机器学习的方法为路径规划提供了数据驱动的自适应优化途径。这类方法通过从数据中学习导航策略，有效克服传统算法依赖手工调参的局限性。深度强化学习是其中的典型代表，机器人通过与环境持续交互获得的奖励信号，自主学习在复杂场景下的决策策略。其核心优势在于能够处理高维感官输入并直接输出控制指令，实现端到端的规划控制。与基于模型的传统方法相比，学习型方法在非结构化环境和存在不确定性场景中表现出更强的适应性。特别是模仿学习技术，可以通过学习专家演示数据快速获得有效的导航策略。这类方法面临的挑战主要在于训练效率、安全性保证以及泛化能力，但为解决复杂动态环境中的路径规划问题提供了新的思路。

3. 针对具体约束的精细化模型改进

路径规划算法的精细化改进体现在对实际约束的更准确建模。运动学约束方面，除了基本的非完整约束外，

还需考虑转向机构几何约束和舵机转向速率限制。动力学约束则涉及加速度、加加速度的平滑性要求,以及负载变化对运动性能的影响。多目标优化框架逐渐取代单一指标优化,同时考虑路径长度、平滑度、安全裕度和能量消耗等多个性能指标。基于模型预测控制的规划框架能够显式处理各种约束条件,通过滚动优化生成符合实际运动能力的最优轨迹。此外,考虑执行器响应特性和系统延迟的规划器设计,能够有效减少轨迹跟踪误差,提升系统整体性能。这种精细化建模使生成的路径不仅理论可行,更具备良好的工程可实现性。

4. 考虑多机器人协同的集群路径规划

路径规划的优化不再局限于单个机器人,多机器人系统的协同作业对算法提出了新要求。集群路径规划的核心目标是解决任务分配、路径冲突消解和整体效率优化问题。算法需要为整个机器人群体规划出无碰撞、高效率的路径集合,而不仅仅是单个最优路径。这通常通过引入通信机制和顶层协调器来实现,例如基于共识的算法或市场拍卖机制,让机器人之间能够协商通行顺序或任务归属。此类优化显著提升了仓储物流、集群巡检等场景下的系统吞吐量与协作效率,是路径规划从单体智能迈向群体智能的关键一步。

5. 面向长期运行的语义导航与场景理解

语义导航通过将感知层的几何信息与语义信息相融合,显著提升了移动机器人对环境的认知层次与长期运行的自主性。该技术利用深度学习模型,对传感器数据进行分析,实现场景中物体类别、拓扑关系及功能区域的识别与分割,从而构建包含丰富语义标注的场景地图。基于此类语义地图,路径规划不再局限于几何空间的避障,而是能够执行以任务为导向的高层指令。例如,机器人可理解“前往接待区”的指令,并自主规划路径。

更重要的是,语义信息使预测性规划成为可能,如在走廊交叉处提前减速以防潜在碰撞风险,或在办公区域调整速度以适应人类活动模式。这种对环境深层语义的理解与利用,是移动机器人实现真正智能化、人性化交互,并保证长期可靠运行的关键技术进展。

结束语

综上所述,移动机器人自主导航与路径规划技术已形成从环境感知、全局局部规划到运动控制的完整技术体系。传统算法在不断优化中趋于成熟,而混合策略与智能学习算法的兴起为解决动态复杂环境下的导航难题开辟了新途径。未来,随着传感技术、算力提升及算法理论的持续突破,移动机器人将在更高层次的自主性、适应性和智能化方面取得长足进展,最终在更广阔的无人化场景中扮演关键角色。

参考文献

- [1] 彭忠成. 移动机器人自主探索与路径规划算法研究[D]. 中南林业科技大学, 2025.
- [2] 马明月, 周怀忠, 张洪飞, 等. 移动机器人自主避障最优路径规划算法设计[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(11): 32-36.
- [3] 白泽琨. 复杂环境下基于强化学习的自主移动机器人路径规划算法研究[D]. 西安理工大学, 2024.
- [4] 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.
- [5] 彭永昆. 移动机器人自主导航的路径规划方法研究与应用[D]. 广东工业大学, 2021.
- [6] 程志. 自主导航的移动机器人动态路径规划算法研究[D]. 南京理工大学, 2020.