

基于模糊控制与蚁群算法的移动机器人路径自适应优化

王娜

昆明冶金高等专科学校

摘要：为提升移动机器人在复杂环境中的自主导航能力，本文提出一种融合模糊控制与改进蚁群算法的路径自适应优化方法。通过构建全局—局部协同架构，利用改进蚁群算法实现路径的全局优化，并采用模糊控制完成局部避障与姿态调整，从而增强系统对动态障碍与环境不确定性的适应性。仿真结果表明，该方法在路径长度、避障成功率、规划效率与轨迹平滑性方面均优于传统算法，能够有效提升移动机器人导航性能。研究为智能移动机器人路径规划提供了一种高鲁棒性与高实时性的可行方案。

关键词：移动机器人；蚁群算法；模糊控制；路径规划；自适应优化

在智能制造、智慧物流与服务机器人快速发展的背景下，移动机器人在复杂环境中的路径规划与自主导航已成为智能控制领域的核心研究问题之一。传统路径规划方法包括 Dijkstra、A* 算法以及基于势场法的局部规划方法，在确定性环境中取得了良好效果，但在包含不确定性、动态障碍、传感器噪声与环境结构模糊性的实际场景中常表现出收敛慢、陷入局部最优或规划路径不平滑等问题。为解决这一难题，智能优化算法与模糊控制方法逐渐成为提升机器人自主导航能力的有效手段。

模糊控制具有对不确定性鲁棒性强、易于表达专家知识、无需精确数学模型等优点，可用于处理移动机器人在避障、转向与速度调节中的模糊输入，例如障碍物距离、相对方向变化等，从而通过规则库实现类人式决策。而蚁群算法作为一种典型的群智能优化方法，在路径搜索、全局优化和多目标权衡上具有显著优势，但其早期收敛、路径抖动及计算量偏大等问题限制了其在实时导航中的应用。因此，将模糊控制用于局部规避与动态调节，再通过改进蚁群算法实现全局路径优化，构建融合式路径规划框架，成为提升移动机器人智能化水平的关键技术路线。

近年来，国内外学者相继开展基于改进蚁群算法的路径规划研究，例如引入信息素挥发动态调节、启发式因子分段更新、路径熵最小化等策略，以实现更高效的搜索性能。同时，模糊推理被用于局部避障与轨迹修正，可在动态环境中提高路径的顺应性与连续性。然而，如何在两者之间建立信息交互机制，实现全局与局部规划的自适应耦合，成为当前研究的重点与难点。

基于这一背景，本文提出一种融合模糊控制与改

进蚁群算法的移动机器人路径自适应优化方法。该方法利用蚁群算法完成整体路径的全局规划，通过模糊控制系统对局部避障、姿态调整与速度规划进行在线调节，并构建信息素更新与模糊输出的双向耦合机制，以实现路径平滑性、避障可靠性及计算效率的协同优化。研究旨在为移动机器人在复杂场景下的自主导航提供更高稳定性、实时性与适应性的优化路径规划方案。

1 方法

1.1 系统总体架构设计

本研究构建的移动机器人路径自适应优化系统由环境建模、全局路径规划和局部避障控制三部分组成。环境建模基于栅格地图，将连续空间离散化为统一坐标体系，使机器人能够在标准化环境中执行搜索与定位。该模型不仅能描述静态障碍物，也能根据传感器数据实时更新局部栅格，从而保证动态环境下的可行性。系统在起点与终点间生成多个候选路径，并根据路径可行性、长度与平滑度进行综合评价。蚁群算法依据信息素及启发式因子执行概率式搜索，使机器人能够在复杂结构下获得全局近似最优路径。为增强实时性，系统采用增量式规划机制，当本地避障导致偏离全局路线时，规划模块会立即接收偏差信息并优化后续节点选择。机器人通过激光雷达或超声传感器实时获取障碍物距离与方位信息，控制器将其模糊化后输入规则库，通过推理推送速度与转向调整量，使机器人在不依赖精确模型条件下实现柔性避障。三个模块通过数据交互实现协同，使系统具备“全局规划—局部响应—全局修正”的闭环优化能力。

1.2 改进蚁群算法的全局路径规划方法

针对传统蚁群算法收敛慢和容易陷入局部最优的

问题,本研究从信息素更新与启发式因子设计两方面进行了改进。首先采用自适应信息素挥发策略,使挥发系数随搜索阶段动态调整:搜索初期保持较高值以增强探索,后期降低以强化优良路径。其次,启发式因子不再只依赖欧氏距离,而是加入路径曲率惩罚和栅格复杂度权重,以避免在狭窄区域反复探索,提升路径平滑度。此外,系统引入精英路径强化机制,每代选择多条质量较高的路径进行信息素增强,而对明显欠优路径进行弱化。通过此方式,搜索过程逐渐收敛于方向性更明确的最优解。综合改进后,蚁群算法在路径长度、搜索稳定性和执行效率方面均有显著提升,为局部控制提供了更可靠的全局规划基础。

1.3 模糊控制的局部避障与轨迹调整策略

为解决动态障碍与环境不确定性带来的瞬时决策难题,本文构建了以障碍物距离和相对角度为输入,以线速度变化量和角速度变化量为输出的模糊控制系统。输入量经隶属函数模糊化后进入规则库,规则库由典型避障场景与专家经验构成,可生成具有类人判断特征的避障控制行为。例如,当障碍距离较近且位于前方,系统会自动降低速度并调整转向角,以确保安全通过。

推理结果通过质心法解模糊化得到最终控制量,并加入平滑因子以避免速度与角度急剧变化导致的路径振荡。为提升适应性,系统会根据历史避障成功率微调部分规则权重,使控制器在长期运行中保持稳定性能。

当局部避障导致轨迹偏离全局路径时,偏差值会回传至蚁群算法,使规划模块对后续节点权重进行修正,从而实现局部决策与全局规划的一致性。通过这一互动机制,机器人能够在复杂环境中保持路径连续性,提高整体导航可靠性。

2 结果

2.1 实验环境与仿真平台构建

为验证所提出方法的有效性,本研究在 MATLAB 与 ROS 联合环境下构建了仿真平台。环境包括静态障碍场景、动态障碍场景以及多障碍密集场景三种,地图大小设置为 50×50 栅格。机器人搭载激光雷达模拟器,传感器更新频率为 20Hz,运动模型采用差速驱动模型。蚁群算法参数选取初始信息素 $\tau_0=1.0$ 、自适应挥发系数范围 $\rho \in [0.2, 0.7]$,蚁群规模为 50,最大迭代代数为 100。

2.2 全局路径规划性能分析

在静态环境下,改进蚁群算法相比传统蚁群算法在平均收敛代数上减少了约 38%,规划路径平均长度

缩短了约 12%。其主要原因在于自适应信息素调节机制有效提高了搜索的方向性与路径平滑度。同样情况下,传统算法常在狭窄空间徘徊,而改进方法能快速完成有效探索。在动态障碍场景中,由于障碍物移动导致路径节点可用性动态变化,改进蚁群算法结合模糊控制的反馈机制表现出更强的适应性,最终路径成功率达到 96.3%,明显优于对比算法的 82.5%。这说明全局路径规划模块与局部控制模块之间的数据交互机制有效提升了路径调整能力。

2.3 模糊控制局部避障性能分析

在动态环境中,机器人在接近障碍物时能通过模糊控制迅速调整速度与方向,实现平滑绕行。测试显示,在障碍物随机运动速度为 0.3m/s 时,机器人平均最小距离保持在 0.25m 以上,未发生碰撞。与 PID 控制相比,模糊控制在避障转弯阶段的轨迹偏移幅度更小,速度曲线更平稳,体现出良好的鲁棒性。

2.4 融合式路径规划的整体性能评估

综合测试表明,融合蚁群算法与模糊控制的路径规划系统在路径总长度、到达时间、避障成功率和路径平滑度等指标上均取得明显优势。整体性能提升主要体现在两方面:一是全局优化能力增强,使机器人在初始阶段便获得高质量的路径方案;二是局部避障能力提升,使机器人能根据动态变化灵活调整运动轨迹并回归全局路线。

3 讨论

3.1 融合算法在复杂环境中的优势分析

实验结果证明,模糊控制与蚁群算法的融合能有效克服单一算法的局限性。在复杂环境中,蚁群算法负责全局规划,其多路径搜索机制适合处理空间多岔路、多干扰因素的全局搜索问题;模糊控制则负责局部避障与即时调整,利用模糊推理克服环境不确定性、传感器噪声及模型不精确带来的误差。两者在信息交互机制的加持下实现全局导航与局部避障的协同,使机器人具备更高的安全性和自适应性。

3.2 信息融合机制对路径质量的影响

路径规划系统的稳定性与响应速度很大程度上受制于全局规划与局部控制之间的数据传递方式。传统方法普遍采用独立模块运行,导致路径偏移无法及时反馈。本文通过将模糊控制的避障输出作为蚁群算法节点权重更新的依据,使全局规划过程动态反映局部环境变化,从而使规划路径更符合机器人实时状态。这一机制显著减少了局部路径偏离累积造成的全局误差,使路径更连续、更可预测。同时,避免了因反复重新规划导致的计算资源消耗,提高了整体效率。

3.3 算法实时性与复杂度分析

尽管融合算法涉及两种不同性质的控制策略,但通过增量式规划与自适应策略,计算复杂度并未显著上升。蚁群算法通过引入自适应挥发系数和方向性更新减少了无效搜索,降低了迭代次数;模糊控制规则库经优化后计算开销较小,适合实时执行。在实验中,整体导航帧率保持在15Hz以上,满足移动机器人实时规划需求。实时性的保障意味着该方法具有实际部署的潜力,可用于服务机器人、仓储搬运机器人以及巡检机器人等场景。

3.4 方法局限性与未来改进方向

尽管提出的方法在实验环境中取得较好效果,但仍存在不足。首先,模糊规则的设计依赖专家经验,尽管加入了自学习机制,但仍希冀通过深度学习自动生成或优化规则,以进一步提升智能化程度。其次,蚁群算法在超大规模地图中仍可能存在计算量偏大的问题,未来可引入分布式计算结构或局部地图分区策略降低计算压力。此外,本文实验环境仍以二维平面为主,未来可将方法扩展至三维空间路径规划,如无人机、AGV与多机器人协作场景。

4 结论

本文提出的基于模糊控制与改进蚁群算法的移动机器人路径自适应优化方法,实现了全局路径规划与局部避障决策的有效融合。研究结果表明,改进蚁群算法通过自适应信息素调节与多因素启发式设计显著提升了全局搜索效率与路径平滑度;模糊控制在处理

动态障碍与不确定环境时表现出较高鲁棒性,使机器人能够在局部扰动下保持稳定、安全的运动轨迹。两者之间的双向耦合机制有效减少了路径偏离累计误差,提高了系统的整体智能性与实时性。在多场景仿真中,该方法在路径长度、避障成功率及规划时间等方面均取得优于传统方法的性能表现。

参考文献:

- [1] 赵贺杨,褚慧慧,周宏胭.ROS移动机器人路径规划算法的研究[J].现代信息科技,2025,9(18):163-168.
- [2] 刘天宝,刘美.移动机器人路径规划算法研究综述[J].广东石油化工学院学报,2025,35(04):62-68.
- [3] 刘清云,游雄,张欣,等.移动机器人路径规划算法综述[J].计算机科学,2025,52(S1):159-168.
- [4] 李畅.基于深度强化学习的移动机器人路径规划算法研究[D].长春工业大学,2025.
- [5] 邓冬冬,许建民,孟寒,等.基于蚁群算法与人工势场法融合的移动机器人路径规划[J].仪器仪表学报,2025,46(02):1-16.
- [6] 张彪,李永强.基于动态寻优蚁群算法的移动机器人路径规划[J].仪器仪表学报,2025,46(03):74-85.
- [7] 王珂,姜春艳,黄黎,等.基于三种群粒子群优化策略的移动机器人路径规划[J].深圳大学学报(理工版),2025,42(04):447-454.
- [8] 王淑民,陈兴文.基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划应用研究[J].山西电子技术,2025,(02):112-113+116.