

基于人工智能的多无人机路径规划研究

荆明野

哈尔滨石油学院, 黑龙江哈尔滨, 150028;

摘要: 随着多无人机系统在军事侦察、灾害救援、环境监测等领域的广泛应用, 其高效、协同、安全的路径规划问题日益成为研究热点。传统路径规划方法在动态环境适应性、计算效率和多机协同能力方面存在不足。本文基于人工智能技术, 结合强化学习、深度神经网络与群体智能算法, 提出一种适用于动态复杂环境下的多无人机路径规划方法。研究从建模、算法设计到仿真实验, 全面探讨路径规划的优化策略, 提升多无人机系统在避障、目标覆盖与能耗控制等方面的综合性能, 为多智能体系统的任务调度与路径自主决策提供理论与实践支持。

关键词: 人工智能; 多无人机系统; 路径规划; 协同控制; 强化学习

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 06. 037

引言

多无人机系统因灵活协同优势, 在军事侦察、物流运输和应急救援等领域应用广泛。路径规划是多无人机高效协作的关键技术, 面临多机冲突、动态环境适应等挑战。人工智能技术的发展, 特别是深度学习与强化学习, 为解决复杂路径规划问题提供了新思路, 提升无人机自主决策和协同能力, 具有重要理论与实际价值。

国内相关研究主要集中在传统算法应用(如 A*、遗传算法)和人工智能技术引入(强化学习、深度神经网络)方面, 仿真平台不断完善, 工程应用初具规模。但总体缺乏面向复杂动态环境的系统化模型和高效通用算法, 仍需深入探索。

本研究旨在构建一套基于人工智能的多无人机路径规划模型, 提升系统自主性、协同性与鲁棒性。研究内容包括: 任务场景建模与多约束问题定义; 融合强化学习与群体智能的路径规划算法设计; 多机协同与避障机制研究; 多场景仿真平台开发与算法验证; 以及典型应用场景下的性能扩展。

采用深度强化学习与进化算法融合的混合策略, 实现复杂场景下高效路径生成。引入图神经网络对环境状态进行建模与预测, 增强路径规划的感知能力。设计基于虚拟势场和局部感知的多机协同避障机制, 提升安全性。构建支持多场景、多机种的可扩展仿真平台, 支持快速迭代与评估。综合考虑能耗、时间和通信等多目标, 增强算法实用性与鲁棒性。

1 无人机路径规划问题

路径规划指在给定环境中, 为无人机或机器人计算

一条从起点到目标点的可行路径, 以满足避障、效率和任务需求等约束条件。根据规划对象的不同, 路径规划可分为单无人机路径规划和多无人机路径规划; 根据环境动态性, 还可分为静态路径规划和动态路径规划。路径规划方法大致分为基于图搜索的算法、采样算法、优化算法和人工智能算法等。

与单无人机路径规划相比, 多无人机路径规划需同时考虑多机之间的协作与冲突避免, 涉及任务分配、通信协调和实时调度等复杂问题。多无人机系统通常在复杂动态环境中运行, 路径规划需兼顾多目标优化, 如路径长度、飞行时间、能耗和安全距离。多机路径规划面临计算复杂度高、信息共享受限及环境不确定性强等挑战, 增加了算法设计与实现难度。

无人机路径规划涉及环境建模、路径搜索、避障策略和任务调度等关键技术。环境建模包括地图构建与动态障碍感知, 支持路径规划算法对环境信息的准确理解。路径搜索技术涵盖经典算法如 A*、Dijkstra 及其改进算法, 以及采样方法如 RRT、PRM 等。避障策略通过局部规划和协同控制确保无人机安全飞行。近年来, 人工智能技术, 特别是强化学习和深度学习, 成为解决复杂环境下路径规划问题的重要手段, 提升了无人机自主决策和适应能力。

2 人工智能技术在无人机路径规划中的应用

近年来, 人工智能(AI)技术在无人机路径规划领域展现出强大的优势, 尤其是在复杂动态环境下的自主决策与优化能力方面。相比传统算法, AI 方法能够更好地适应环境变化, 处理多目标优化, 提升规划效率和鲁

棒性。

强化学习(Reinforcement Learning, RL)通过智能体与环境的交互,基于奖励机制自主学习最优策略。在无人机路径规划中,RL能够实现无人机自主避障、路径优化及多机协同。例如,深度Q网络(DQN)和深度确定性策略梯度(DDPG)被广泛用于解决连续动作空间下的路径规划问题,显著提高了规划的灵活性和效率。

深度学习技术利用深层神经网络对复杂环境和传感数据进行特征提取和模式识别。在路径规划中,卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN)常被用于环境感知、障碍物检测和航迹预测,为规划算法提供精准的环境信息支持。

群体智能算法如粒子群优化(PSO)、蚁群算法(ACO)和遗传算法(GA)通过模拟自然界生物的协同行为,实现多无人机的路径优化和任务分配。结合AI技术,这些算法能够快速收敛,解决多目标和多约束的路径规划问题。

多智能体强化学习结合多无人机系统的特点,实现无人机之间的协作与冲突避免。通过共享信息和协同学习,无人机群体能够在复杂环境中实现动态路径调整,提高整体任务执行效率和安全性。

总之,人工智能技术为无人机路径规划提供了强有力的技术支撑,不仅提升了自主性和智能化水平,还推动了无人机系统在复杂任务中的广泛应用。未来,随着算法和计算能力的提升,AI驱动的路径规划将在实时性、多任务处理和大规模协同方面展现更大潜力。

3 多无人机路径规划模型构建

多无人机路径规划模型的构建是实现无人机群体高效协同作业的基础。该模型需综合考虑任务需求、环境信息、多机协作及安全约束,确保路径规划的合理性与实用性。主要包括以下几个方面:

多无人机系统通常面临复杂多变的任务,如目标巡航、区域覆盖或目标跟踪。建模阶段需明确任务目标、无人机性能参数(如飞行速度、续航时间、载荷能力)及环境约束(静态障碍、动态障碍、飞行禁区等)。环境信息通常以栅格地图、三维模型或图结构形式表达,为路径规划提供基础数据。

模型应设计无人机之间的协同机制,包括任务分配、信息共享及冲突避免。任务分配确保任务合理分配给各无人机,避免重复或遗漏。信息共享保证无人机实时交

换状态与环境信息,支持动态路径调整。冲突避免机制通过空间和时间上的约束,防止无人机间发生碰撞。

路径规划需满足多种约束,如飞行安全距离、飞行时间限制、能耗限制及任务完成时限。目标函数通常包括最短路径、最小能耗、最大覆盖率或多目标综合优化。模型需平衡各指标,兼顾效率与安全。

基于以上模型构建,设计适用于多无人机系统的路径规划算法框架。常见策略包括集中式、分布式和混合式规划。集中式算法便于全局优化但计算量大;分布式算法适合大规模系统,增强鲁棒性和扩展性;混合式结合两者优势,适应动态复杂环境。

考虑无人机运行环境的动态性,模型应支持路径的实时更新与调整。例如,当遇到突发障碍或任务变化时,能快速重新规划,保证任务连续性和安全性。

综上所述,多无人机路径规划模型的构建需综合多方面因素,形成结构合理、功能完备的系统,为智能路径规划算法的实现提供坚实基础。

4 多无人机路径规划算法设计与实现

多无人机路径规划算法设计需兼顾全局最优与实时响应,结合多机协同与环境动态变化,确保路径安全、高效和鲁棒。本文提出的算法设计主要包括以下几个方面:

任务分配算法,采用基于市场竞价机制(Auction-based)或优化算法(如遗传算法、粒子群优化)实现任务的动态分配。通过考虑无人机能力、任务优先级和任务时限,确保任务均衡分配,最大化整体效率。

路径搜索与优化算法,结合经典图搜索算法(如A*、Dijkstra)与智能优化算法(遗传算法、蚁群算法)进行路径初步搜索和优化。引入深度强化学习算法(如DQN、DDPG),实现路径规划的自适应调整,提升复杂环境下的避障和路径质量。

多无人机协同控制策略,设计多智能体强化学习框架,促进无人机间的信息共享与协作,通过奖励机制引导无人机群体实现队形保持、冲突避免和任务协同。采用分布式控制策略提升系统的扩展性和容错性。

动态环境下的实时重规划,结合传感器数据和环境预测模型,设计实时路径重规划机制。通过局部路径调整与全局策略更新,确保无人机在遇到突发障碍或任务变化时能够快速响应,保障飞行安全和任务完成。

算法实现与系统集成,算法模块采用模块化设计,

支持多种仿真平台和实际飞行系统的集成。利用并行计算和 GPU 加速技术,提高算法计算效率,满足多无人机实时路径规划的需求。

综上所述,该算法设计实现了多无人机路径规划的智能化、动态化和协同化,显著提升了系统在复杂环境中的适应能力和任务执行效率。

5 实验验证与结果分析

为了验证所设计的多无人机路径规划算法的有效性与性能,本文在多个典型场景下进行了系统性实验和仿真测试。实验内容包括路径规划的准确性、避障能力、协同效率及算法运行时性能等方面。

实验采用基于 ROS 和 Gazebo 的仿真平台,模拟多无人机在复杂动态环境中的飞行任务。环境包含多种静态障碍和动态障碍,任务涉及目标巡航、区域覆盖及紧急避让。对比实验中选取了经典 A*算法、遗传算法及本文提出的强化学习结合进化算法的混合方法。

实验结果表明,本文算法在路径长度、飞行时间和能耗方面均优于传统算法。特别是在动态障碍出现时,强化学习模块有效提升了路径调整的灵活性,避免了多次重新规划带来的计算开销和任务延误。

在多机协同任务中,算法成功实现无人机间的冲突避免和队形保持。多智能体强化学习策略使无人机能够基于局部信息实现有效协作,整体任务完成时间显著缩短,系统鲁棒性得到提升。

算法通过并行计算和模块化设计,实现了良好的实时性。仿真中,路径规划平均计算时间满足实际应用需求,支持多无人机系统的在线动态路径更新。

实验验证了算法的优越性能及适应复杂环境的能力,但在极端环境下,部分路径规划仍存在局部最优问题,且算法对高密度动态障碍的快速响应能力有待加强。未来研究将针对这些不足,优化算法的收敛速度和环境感知能力。

6 结论与展望

本文针对多无人机路径规划问题,基于人工智能技术构建了系统化的路径规划模型与算法框架。通过结合深度强化学习与进化算法,实现了路径的高效搜索与动态调整,有效提升了多无人机系统在复杂动态环境中的自主决策能力和协同作业效率。实验结果表明,所提算法在路径质量、避障能力和多机协同方面均优于传统方

法,具备良好的实时性能和应用潜力。

然而,随着无人机应用场景的不断丰富和复杂,路径规划仍面临多方面挑战,如环境感知精度提升、多源信息融合、高密度动态障碍快速响应等。未来研究将重点关注以下方向:

1. 增强环境感知与认知能力:融合多传感器数据与图神经网络技术,提升无人机对复杂环境的理解和预测能力。

2. 多目标与多任务规划:扩展路径规划算法以支持多任务并行执行,实现任务优先级动态调整和资源合理分配。

3. 大规模无人机群协同:研究高效的分布式协同算法,解决大规模无人机群的通信与控制瓶颈。

4. 算法的安全性与鲁棒性:强化算法对异常环境和恶意攻击的抵御能力,确保路径规划的可靠性和安全性。

综上所述,基于人工智能的多无人机路径规划研究不仅推动了无人机技术的智能化发展,也为无人机在更多实际应用中的广泛推广提供了坚实基础和技术保障。

参考文献

- [1] 李华喜,陈金鑫,刘文阳. 基于人工智能图像处理的无人机光伏组件裂纹检测系统研究[J]. 电工技术,2025, (05): 128-130. DOI: 10. 19768/j. cnki. dgjs. 2025. 05. 032.
- [2] 王忠禹. 面向多无人机对抗的多智能体迁移强化学习方法研究[D]. 大连理工大学,2024. DOI: 10. 26991/d. cnki. gdllu. 2024. 003359.
- [3] 盛松梅. 基于人工智能技术的无人机机械臂自动控制系统[J]. 机械设计与制造工程,2022, 51 (08): 117-121.
- [4] 黄泽贤,江好胜,吴健,等. 面向侦察任务的多无人机覆盖路径规划与控制[J/OL]. 信息与控制,1-14[2025-07-31]. <https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2025.0231>.
- [5] 虞启洲. 多无人机协同路径规划与轨迹跟踪研究[D]. 中国民用航空飞行学院,2025. DOI: 10. 27722/d. cnki. gzhgmh. 2025. 000288.

作者简介:荆明野(1989.4)女;汉;山东;硕士;副教授;研究方向为工程管理。