

通信受限条件下多无人机协同环境覆盖路径规划

侯 宇

贵州省邮电规划设计院有限公司 贵州 贵阳 550002

摘要: 通过探讨通信受限条件下多无人机协同环境覆盖路径规划的问题。针对无人机在复杂环境中的协同作业需求,提出一种基于分布式协同机制和有限通信能力的路径规划算法。该算法通过优化无人机之间的信息交换和路径选择,实现了在通信受限条件下的高效环境覆盖。实验结果表明,该算法能够显著提高多无人机协同作业的效率 and 准确性,为无人机在复杂环境中的协同应用提供了新的思路和方法。

关键词: 通信受限; 多无人机协同; 环境覆盖; 路径规划

1 多无人机协同环境覆盖路径规划基础

1.1 多无人机系统概述

多无人机系统是指由多架无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)组成的协同作业系统,通过先进的通信技术、控制算法和数据处理技术,实现无人机之间的信息共享、协同决策和联合执行任务。这些系统能够高效地完成复杂、大规模的任务,如环境监测、灾害救援、目标追踪和货物运输等。多无人机系统具有灵活性高、适应性强、作业范围广等显著优点,已成为当前无人机技术领域的研究热点。通过合理的任务分配和路径规划,多无人机系统可以显著提高作业效率,降低运营成本,为各个领域带来革命性的变革。

1.2 环境覆盖路径规划的基本概念

环境覆盖路径规划是指在多无人机系统中,为每架无人机设计一条最优路径,以实现对特定区域或目标的有效覆盖和监测。这一过程中,需要考虑无人机的飞行能力、能耗限制、任务需求以及环境中的障碍物和动态变化等因素。环境覆盖路径规划的核心目标是在保证无人机安全飞行的基础上,最大化覆盖区域或目标,同时优化飞行路径以节省时间和资源^[1]。为了实现这一目标,需要采用先进的算法和技术,如启发式搜索、优化算法和机器学习等,来求解复杂的路径规划问题。环境覆盖路径规划是多无人机系统协同作业的关键技术之一,对于提高系统整体性能和任务执行效率具有重要意义。

2 通信受限条件下多无人机协同路径规划方法

2.1 基于强化学习的路径规划方法

在通信受限条件下,多无人机协同路径规划面临诸多挑战,其中最为显著的是信息交换受限和决策同步问题。基于强化学习的路径规划方法为解决这些问题提供了一种有效的途径。强化学习是一种机器学习方法,其核心思想是通过试错法学习最优策略,使智能体在与环

境的交互过程中最大化累积奖励。在多无人机协同体系中,各无人机作为智能体,通过不断摸索与学习,逐步完善其飞行路径规划,旨在协同达成覆盖与监测目标。在强化学习的指导下,无人机首先需感知环境(包括位置、速度、障碍分布等)并接收其他无人机的有限通信数据。根据当前策略,无人机决定行动(前进、后退或转向)。无人机依据这些反馈,持续调整策略,追求更高累积奖励。面对通信限制,强化学习路径规划常采用分布式框架,让无人机在局部自主决策,同时利用有限信息进行协同。通过引入价值函数近似等先进技术,可以进一步提高学习效率和策略性能。然而这种方法也面临一些挑战,如样本效率低下、策略探索过程中的安全风险等,需要在实际应用中加以考虑和解决。

2.2 基于深度Q网络(DQN)的路径规划方法

深度Q网络(Deep Q-Network, DQN)是强化学习领域的一种重要方法,它结合了深度神经网络和Q学习算法的优点,能够处理高维状态空间和复杂决策问题。在通信受限条件下,基于DQN的路径规划方法为多无人机系统提供了一种高效且可扩展的解决方案。在DQN框架下,无人机利用深度神经网络来近似Q值函数,即根据当前状态-动作对预测未来累积奖励的期望值。通过训练神经网络,无人机可以学习到在不同状态下选择最优动作的策略。与传统的Q学习相比,DQN具有更强的泛化能力和更高的学习效率,能够处理更加复杂和多变的环境。为了应对通信受限的挑战,基于DQN的路径规划方法通常采用经验回放和固定Q目标等策略来稳定训练过程,并减少过拟合的风险。通过引入注意力机制、卷积神经网络等先进技术,可以进一步提高DQN在处理图像和传感器数据方面的能力,从而增强无人机的环境感知和决策能力。

2.3 其他路径规划方法探讨

除了基于强化学习和DQN的方法外，还有许多其他路径规划方法可以用于解决通信受限条件下多无人机协同路径规划问题。这些方法各具特色，适用于不同的应用场景和约束条件。一种常见的方法是基于图论的路径规划方法，它通过将环境建模为图结构，利用图搜索算法（如Dijkstra算法、A*算法等）来寻找最优路径。这种方法具有计算效率高、易于实现等优点，但在处理复杂环境和动态变化方面存在一定的局限性^[2]。另一种方法是基于启发式搜索的路径规划方法，它利用启发式信息来引导搜索过程，从而加速找到最优解或近似最优解。这类方法包括遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等，它们具有全局搜索能力强、易于并行化等优点，但在处理大规模问题时可能面临计算量大、收敛速度慢等挑战。还有一些基于模型预测控制（MPC）的路径规划方法，它们通过预测未来状态并优化当前决策来实现路径规划。

3 通信受限条件下多无人机协同路径规划算法设计

3.1 算法设计思路与流程

在通信受限条件下，设计多无人机协同路径规划算法需要综合考虑无人机的运动学特性、环境复杂性、任务需求以及通信能力的限制。算法设计的核心在于如何在有限的信息交换下，实现无人机之间的有效协同，同时保证路径的最优性或次优性。算法设计的思路首先是从全局视角出发，明确任务目标和约束条件，包括覆盖区域、飞行时间、能耗限制以及通信距离等。将全局任务分解为多个局部子任务，每个子任务对应一个或多个无人机的局部路径规划。在局部路径规划中，无人机基于自身感知的环境信息和来自其他无人机的有限通信信息，利用启发式搜索、优化算法或机器学习等技术，生成局部最优或次优路径。算法通过一定的协同机制，将局部路径规划结果整合为全局协同路径。这一过程中，需要考虑无人机之间的相对位置、速度以及潜在的碰撞风险，通过调整路径或速度来避免冲突。算法还需要具备一定的鲁棒性和适应性，以应对环境变化和突发情况。具体的算法流程包括：初始化环境模型、无人机状态和通信网络；基于任务需求和约束条件，生成全局任务分解方案；为每个无人机设计局部路径规划算法，并基于有限通信信息进行协同调整；通过迭代优化，逐步收敛到全局协同路径；最后，输出路径规划结果，并评估其性能和可行性。

3.2 通信受限条件下的路径质量评价

在通信受限条件下，路径规划算法的性能不仅取决于路径的最优性或次优性，还受到通信能力的限制。路径长度是衡量路径规划算法性能的重要指标之一，它

直接决定了无人机的飞行时间和能耗。在通信受限条件下，更短的路径意味着更少的通信需求和更高的任务执行效率。覆盖区域是指无人机在飞行过程中能够覆盖或监测到的目标区域。在协同路径规划中，需要确保所有目标区域都被有效覆盖，同时避免重复覆盖和遗漏。能耗是无人机执行任务时需要考虑的关键因素之一，在通信受限条件下，无人机需要更加高效地利用能源，以延长飞行时间和提高任务执行效率。路径规划算法需要尽可能减少不必要的飞行和通信开销。通信效率是指无人机之间信息交换的效率和准确性，在通信受限条件下，有效的信息交换对于实现无人机之间的协同至关重要。路径规划算法需要优化通信策略，减少通信延迟和误码率，提高通信效率。安全性是路径规划算法需要考虑的重要方面之一，在协同路径规划中，需要避免无人机之间的碰撞和与障碍物的接触，确保飞行过程的安全性和稳定性。

3.3 路径规划算法的仿真实验与验证

为了验证路径规划算法的有效性和性能，需要进行仿真实验和验证。仿真实验是通过计算机模拟无人机在特定环境下的飞行过程，评估算法在不同场景下的表现。验证则是通过实际飞行测试，验证算法在实际应用中的可行性和可靠性。在仿真实验中，首先需要构建准确的环境模型，包括地形、障碍物、通信网络等。根据任务需求和约束条件，设置仿真参数和初始条件。运行路径规划算法，生成无人机协同路径，并记录关键指标如路径长度、覆盖区域、能耗、通信效率以及安全性等。最后，对仿真结果进行分析和评估，比较不同算法之间的性能差异和优缺点。在实际飞行测试中，需要选择具有代表性的测试场景和无人机型号，确保测试结果的可靠性和普遍性。测试过程中，需要记录无人机的飞行轨迹、速度、高度以及通信状态等关键参数，并与仿真实验结果进行对比和分析。还需要考虑实际飞行中的不确定性和干扰因素，如风速、雨雾等天气条件，以及突发情况如无人机故障或通信中断等^[3]。

4 通信受限条件下多无人机协同路径规划的应用场景

4.1 安全监控与战场侦察

在安全监控与战场侦察领域，通信受限条件下多无人机协同路径规划的应用显得尤为重要。传统的单一无人机监控或侦察方式往往受限于视野范围、续航时间和数据处理能力，难以满足大范围、长时间、高密度的监控需求。而多无人机协同作业，通过优化路径规划，可以实现更广泛的区域覆盖，提高监控和侦察效率。在安全监控方面，多无人机可以按照预设的协同路径，对

关键区域进行不间断的巡逻和监控。通过搭载高清摄像头、红外传感器等设备,无人机能够实时捕捉和传输现场画面,为安全人员提供及时、准确的信息支持。在通信受限的条件下,无人机之间通过高效的协同机制,如分布式决策和有限信息交换,确保监控任务的无缝衔接和高效执行。在战场侦察方面,多无人机协同路径规划的应用同样具有显著优势,战场环境复杂多变,对侦察任务的实时性、准确性和隐蔽性提出了极高要求。通过优化路径规划,无人机可以避免敌方雷达和防空系统的探测,以最小的通信开销实现侦察信息的快速传递和共享。无人机之间还可以通过协同作业,对敌方阵地、物资储备和人员动态等进行全面侦察和评估,为指挥决策提供关键情报支持。

4.2 灾害救援与环境监测

在灾害救援与环境监测领域,通信受限条件下多无人机协同路径规划的应用同样具有广泛前景。在灾害救援方面,无人机可以通过搭载搜救设备、通信设备和生活物资等,按照协同路径规划,对灾区进行快速搜索和救援。通过实时传输灾区画面和人员位置信息,无人机能够为救援人员提供精确的指引和支持,提高救援效率和成功率。无人机还可以通过搭载抛投装置,将生活物资和救援装备快速投送到灾区现场,为受灾群众提供及时的援助。在环境监测方面,多无人机协同路径规划的应用同样具有重要意义,环境监测需要对大气、水质、土壤等多个方面进行长期、连续的观测和分析^[4]。通过优化路径规划,无人机可以按照预设的监测点位和时间表,对监测区域进行高效、准确的采样和数据采集。在通信受限的条件下,无人机之间通过协同作业和有限信息交换,确保监测数据的完整性和准确性。无人机还可以通过搭载高精度传感器和数据处理设备,对监测数据进行实时分析和处理,为环境保护和可持续发展提供科学依据。

4.3 其他应用场景探讨

除了安全监控、战场侦察、灾害救援和环境监测等领域外,通信受限条件下多无人机协同路径规划的应用场景还十分广泛。例如,在物流配送领域,无人机可以通过协同路径规划,实现货物的快速、准确送达,降低物流成本和提高配送效率。在农业植保领域,无人机可以按照协同路径对农田进行喷洒作业,提高农药利用率和作业效率。在城市交通管理领域,无人机可以通过协同路径规划,对城市交通进行实时监控和调度,提高交通流畅度和安全性。在科研探索、影视拍摄等领域,多无人机协同路径规划的应用也具有巨大的潜力和价值。

结束语

本文研究了通信受限条件下多无人机协同环境覆盖路径规划的关键问题,提出了一种有效的解决方案。通过理论分析和实验验证,证明了该算法在复杂环境中的可行性和优越性。未来,将继续深化相关研究,优化算法性能,拓展应用场景,为无人机技术的发展和應用做出更大的贡献。

参考文献

- [1]陈洋,周锐.通信受限条件下多无人机协同环境覆盖路径规划[J].中国惯性技术学报,2024,32(3):273-281. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2024.03.009.
- [2]庞强伟,石章松,朱拥勇,等.具有通信时滞的多无人机时变编队控制方法[J].中国惯性技术学报,2023,31(3). DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2023.03.013.
- [3]何文彪,胡永江,李文广.基于改进哈里斯鹰算法的异构无人机协同侦察航迹规划[J].中国惯性技术学报,2023,31(7).DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2023.07.011.
- [4]李清华,高影,王振桓,等.一种动态分组的多节点协同定位编队构型优化方法[J].中国惯性技术学报,2022,30(6).DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2022.06.007.