

无人船航迹规划综述

李文博 李凯* 陈根勇 邱勇凯

广东海洋大学, 中国·广东 湛江 524000

摘要: 无人船在海洋环境监测、海上搜救、海洋资源勘探等领域发挥着重要的作用。航迹规划作为无人船技术的关键组成部分,对于提高无人船巡航任务执行效率和安全性具有重要意义。论文主要阐述了无人船航迹规划的重要性,介绍了国内外研究现状,分析了多种航迹规划算法及其优缺点,并对无人船的发展趋势进行了展望。

关键词: 无人船; 航迹规划; 航迹规划算法

Overview of Unmanned Ship Trajectory Planning

Wenbo Li Kai Li* Genyong Chen Yongkai Qiu

Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract: Unmanned ships play an important role in marine environmental monitoring, maritime search and rescue, and marine resource exploration. As a key component of unmanned ship technology, trajectory planning is of great significance for improving the efficiency and safety of unmanned ship cruise missions. The paper mainly elaborates on the importance of unmanned ship trajectory planning, introduces the research status at home and abroad, analyzes various trajectory planning algorithms and their advantages and disadvantages, and looks forward to the development trend of unmanned ships.

Keywords: unmanned ships; track planning; trajectory planning algorithm

0 前言

作为高科技的产物,无人船伴随着人工智能、自动控制、导航定位等技术的持续飞跃而日益兴盛。无人船技术巧妙融合了船舶设计、人工智能(涵盖自动导航、自动避碰、故障检测、智能监控等功能)、信息处理等多领域技术,构成了一种全新的无人操作船舶。无人船研究范畴广泛,包括环境建模、路径规划、自主航行控制、自主避碰策略,以及自主决策机制等多个维度。

航迹规划技术,作为无人船技术的核心组成部分,对于无人船在复杂多变的海洋环境中实现自主航行、自主决策及风险规避具有至关重要的作用。这一技术不仅能够显著提升无人船的任务执行效率,通过精心设计的航行路线和行动方案,有效缩短航行时间并减少资源消耗;同时,它还能极大增强无人船的安全性,在面对海洋中的各类复杂障碍物和潜在风险时,航迹规划技术能够精准规避,确保无人船的安全运行。作为人工智能领域的重要实践,无人船在海洋环境监测、海上搜救行动、海洋资源勘探等多个方面正展现出日益显著的影响力。随着其自主性和智能化水平的不断提升,无人船能够更加灵活地应对各种复杂的海洋任务。近年来,海洋资源的开发与利用已成为世界各国关注的焦点,无人船以其高效、低成本的优势,成为海洋探测的重要工具。此外,无人船航迹规划技术的研究与发展,还进一步推动了智能导航、路径规划,以及海洋环境预测等相关领域的技术革新与进步。

论文探讨无人船航迹规划的研究现状系统分析了不同

航迹规划算法在不同条件下的优势与局限,为无人船舶的推广应用提供了参考。

1 国内外研究概述

无人船航迹规划技术在国内外均展现出蓬勃的发展态势,尽管两者在技术水平、应用场景及研究侧重点上各具特色,但均致力于推动该领域的持续进步与创新。

国外在无人船技术领域的探索起步较早,积累了深厚的技术底蕴。特别是在航迹规划算法与自主控制系统方面,国外处于全球领先地位。以粒子群算法为例,该算法自1995年由美国学者 Kennedy 与 Eberhart^[1]提出以来,便因其模拟鸟群协作觅食行为的独特机制而备受瞩目。Liu Yujie 等人在此基础上进行了改进,并将其成功应用于船舶航迹规划。通过构建多种群机制,实现了全局搜索与局部搜索能力的平衡,验证了该算法在路径规划领域的卓越性能^[2]。在无人船的应用场景方面,国外同样展现出广泛的拓展性。除了传统的海洋资源勘查、海上交通运输等领域外,无人船还逐渐涉足海上安全监测、反恐巡逻等新兴领域。这些新兴领域对无人船航迹规划技术提出了更为严苛的要求,推动了相关技术的持续创新与发展。

近年来,国内在无人船技术领域同样取得了显著成就。特别是在自主导航与控制、避障算法、路径规划等方面,国内研究团队不断突破,取得了令人瞩目的成果。李晓磊提出的人工鱼群算法,通过模仿鱼群觅食、聚群、追尾等自然行为,实现了全局最优解的求解^[3]。黄宜庆等人^[4]在此基础

上进行了优化,通过多策略混合机制扩大了人工鱼的视野范围,有效提升了算法的收敛速度与性能。此外,中国学者在蚁群算法方面也进行了深入研究。针对蚁群算法在全局路径规划中易陷入局部极值、计算效率低下等问题,中国研究团队提出了多种改进策略。王宏健等人^[5]通过修改信息素更新规则并加入避碰规则函数,显著提升了蚁群算法在复杂海洋环境下的搜索能力与实时性。孙功武等人^[6]针对蚁群算法在全局路径规划中易陷入死锁的问题,给出了不同死锁类型的判定方法与处理策略,有效降低了无效蚂蚁的产生概率,并优化了启发式函数与最优路径保留策略,进一步提升了算法的收敛速度与计算精度。

随着人工智能、大数据、云计算等技术的快速发展,中国无人船的自主性与智能化水平也在不断提高。无人船航迹规划技术逐渐成熟,能够综合考虑航行安全性、路径长度、能耗等多种因素,为无人船规划出既安全又高效的行驶路径。

2 航迹规划算法研究现状

无人船航迹规划是指在考虑实际静态或动态障碍物以及速度和动态约束的情况下,为无人船(USV)规划出一条安全、高效、可执行的航行轨迹的过程。在船舶航行的复杂过程中,航迹规划扮演着确保航行安全、高效与经济的核心角色,选择并应用恰当的航迹规划算法则显得尤为重要。当前,无人船领域广泛采纳了多种航迹规划算法,它们主要分为图形方法(如迪杰斯特拉算法)、数值方法(涵盖A*算法、动态规划法及蚁群算法)以及势力场方法(如人工势场法)三大类。这些算法各具特色与适用情境,但也伴随着一定的局限性。

迪杰斯特拉算法,这一由荷兰计算机科学家Dijkstra于1956年提出的经典图论算法,采用类似广度优先搜索的策略,解决了带权图的单源最短路径问题。其核心在于不断探索当前节点至所有未访问节点的最短路径,并逐步拓展这一最短路径集合,直至覆盖所有节点。在无人船航迹规划中,该算法尤其适用于静态环境下的最短路径求解。例如,在已知障碍物分布的水域中规划出最优航线。其优势在于能确保路径的全局最短性,但在面对大规模图或动态环境时,计算复杂度显著增加。

A*算法,作为一种启发式搜索算法,在状态空间中高效搜索最优解。它利用估价函数 $f(n)$ 评估每个搜索位置的优劣,该函数由从起点到当前节点的实际代价 $g(n)$ 和从当前节点到目标节点的预估代价 $h(n)$ 共同构成。在搜索进程中,A*算法借助开放列表存储待检测的节点,这些节点可能构成最优路径的一部分,而关闭列表则存储已评估的节点。通过不断选择 f 值最小的节点并检查其相邻节点,A*算法能够高效地找到从起点至目标的最优路径。一旦目标节点被找到,算法便通过回溯父节点指针构建出最终的最优路径。

动态规划算法,作为一种求解多阶段决策过程最优化

问题的方法,通过将原问题分解为相对简单的子问题,先求解子问题,再由子问题的解构建出原问题的解。在无人船航迹规划中,动态规划算法适用于处理包含多个决策点或状态转移的复杂场景,例如,考虑风浪、水流等环境因素影响的航线规划。通过构建状态转移方程和成本函数,动态规划算法能够找到满足特定约束条件下的最优航迹。

蚁群算法是一种模拟自然界中蚂蚁觅食行为的优化算法,其思想来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为。蚂蚁在其经过的路径上释放一种称为“信息素”的物质,而蚁群内的蚂蚁对信息素具有感知能力。信息素浓度与路径长度成反比,蚂蚁会沿着信息素浓度较高的路径行走,每只路过的蚂蚁都会在路上留下信息素,形成正反馈机制。经过一段时间后,整个蚁群会沿着最短路径到达食物源。在无人船航迹规划中,蚁群算法能够找到一条从起点至目标的最优路径。

人工势场方法,则是一种基于力场模型的路径规划技术。它通过设定目标产生吸引力吸引无人船,同时设定障碍物产生斥力避免无人船碰撞障碍物。该方法通过构建目标点吸引力和障碍物排斥力形成的势能场,引导无人船沿势能梯度下降的方向航行。该方法直观且易于实现,能较好地处理动态障碍物问题,但也可能遭遇局部最优解和“死锁”现象等潜在问题。

3 应用场景及分析

迪杰斯特拉算法^[7](Dijkstra's Algorithm)是一种高效的算法,旨在从起始节点出发,寻找至所有其他节点的最短路径。其显著优点包括完整性高、逻辑清晰易懂,以及广泛的应用适用性,特别是在处理边权非负的图时,无论是稠密图还是稀疏图,都能展现出良好的性能。然而,该算法对于极大规模的图而言,仍可能显得力不从心。此外,它无法应用于含有负权边的图,因为这种情况下无法保证找到最短路径。迪杰斯特拉算法在城市间距离计算、网络路由以及游戏开发中的单位移动路径规划等领域有着广泛的应用。

人工势力场法^[8]是一种直观且高效的路径规划和避障算法。它将移动机器人在环境中的运动模拟为在虚拟人工势场中的运动,机器人受到指向目标点的吸引力和远离障碍物的排斥力,这两种力的合力引导机器人向目标点前进。该方法的优点在于模型直观、计算简便、实时性好、反应迅速,且规划出的路径平滑。同时,它对控制和传感误差具有一定的鲁棒性,易于布置。然而,人工势场法也存在目标不可达、局部最优、路径规划失败风险以及对复杂环境适应性有限等问题,且参数设置较为困难。在实际应用中,人工势场法被广泛应用于移动机器人、服务机器人、无人驾驶汽车、无人机以及工业自动化等领域的路径规划和避障。

A*算法^[9]作为一种启发式搜索算法,在路径规划、网络优化以及图搜索等多个领域展现出了卓越的性能。其高效

性得益于启发式函数的引导,使得算法能够在大型或复杂的搜索空间中迅速找到解。 A^* 算法的灵活性也尤为突出,启发式函数 $h(n)$ 的设计可以根据具体问题进行灵活调整,从而优化搜索效率。当启发式函数 $h(n)$ 满足一定条件时, A^* 算法能够保证找到最优解,这为算法在需要精确求解的场景中的应用提供了有力保障。然而, A^* 算法也面临一些挑战,如启发式函数的设计对算法性能具有极大影响,设计不当可能导致算法效率低下或无法找到最优解。此外,算法的空间复杂度较高,需要存储大量节点的信息,对于大规模问题可能占用较多内存。尽管如此, A^* 算法在多个领域具有广泛的应用前景。

动态规划法^[10]作为一种强大的算法设计技术,在解决具有重叠子问题和最优子结构性质的复杂问题时具有显著优势。它通过保存已解决子问题的解来避免重复计算,显著减少了计算量,并能够将复杂问题分解为更小、更易于管理的子问题,从而构造出原问题的最优解。动态规划具有灵活性和通用性,可以应用于多种类型的问题,如背包问题、最长公共子序列、最短路径问题等。然而,动态规划也存在一些挑战和局限性,如需要大量的空间来存储子问题的解,可能导致内存使用量显著增加;算法的正确性和效率高度依赖于状态的定义和状态转移方程的设计;通常针对特定类型的问题进行设计,当问题发生变化时可能需要重新设计算法;对输入数据的敏感性也可能影响算法的性能。尽管如此,动态规划在多个领域仍然具有广泛的应用前景。

蚁群算法^[11]作为一种模拟自然界蚂蚁觅食行为的启发式优化方法,在离散优化问题,尤其是图论和组合优化领域展现出了独特的优势。其全局搜索能力强,通过分布式搜索和信息素机制,能够有效处理旅行商问题(TSP)、车辆路径问题(VRP)等复杂问题,并展现出良好的适应性和鲁棒性。此外,蚁群算法天然适合并行化和分布式计算,易于理解和实现,且易于与其他启发式算法结合,进一步提升了其应用范围和性能。然而,蚁群算法也存在一些局限性,如收敛速度相对较慢、容易陷入局部最优解、参数选择困难以及对复杂问题的描述能力不足等。尽管如此,蚁群算法在数据挖掘、生产调度、网络路由、工程设计、电力系统优化、建筑和城市规划、交通流量分配、机器学习和深度学习、生物信息学以及优化控制等多个领域仍具有广泛的应用前景,为解决复杂优化问题提供了新的思路和方法。

4 结论与展望

无人船航迹规划技术,作为无人船技术体系中的核心构成部分,对于提升无人船的任务执行效能与航行安全水平发挥着举足轻重的作用。论文全面回顾了当前无人船航迹规划领域的研究进展,并对多种主流的航迹规划算法进行了详尽的剖析。通过对这些算法的细致介绍及其优缺点的综合归纳,我们得以清晰地洞察到每种算法在无人船航迹规划中所扮演的独特角色及其存在的局限性。这些算法各具特色,有

的擅长于处理复杂的海洋环境信息,有的则在计算效率上表现出众,还有的则在路径优化方面独树一帜。

展望未来,随着无人船技术的持续进步与创新,航迹规划亦将朝着更加智能化、高效化的方向发展。通过引入先进的人工智能技术、优化算法以及深度学习等前沿手段,我们有望为无人船在复杂多变的海洋环境中实现自主航行提供更加坚实可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[J]. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks,1995(4):1942-1948.
- [2] Chen X, Liu Y, Hong X, et al. Unmanned ship path planning based on RRT[J]. In Intelligent Computing Theories and Application: 14th International Conference,2018(14):102-110.
- [3] 李晓磊.一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D].杭州:浙江大学,2003.
- [4] 黄宜庆,彭凯,袁梦茹.基于多策略混合人工鱼群算法的移动机器人路径规划[J].信息与控制,2017,46(3):283-288.
- [5] 王宏健,伍祥红,施小成.基于蚁群算法的AUV全局路径规划方法[J].中国造船,2008,49(2):6.
- [6] 孙功武,苏义鑫,顾轶超,等.基于改进蚁群算法的水面无人艇路径规划[J].控制与决策,2021,36(4):847-856.
- [7] Wang H, Yu Y, Yuan Q. Application of Dijkstra algorithm in robot path-planning[C]//International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering,2011.
- [8] Duhé J F, Victor S, Melchior P. Contributions on artificial potential field method for effective obstacle avoidance[J]. Fractional Calculus and Applied Analysis,2021(24):421-446.
- [9] 叶楠,高峰,韩宝睿.基于改进A-star算法的轮椅无障碍出行路径规划策略研究[J].物流科技,2024.
- [10] Rostami S M H, Sangaiah A K, Wang J, et al. Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking,2019(1):1-19.
- [11] 卢海鹏,刘振宇,王思萌,等.基于改进蚁群算法的路径规划研究[C]//第二十一届沈阳科学学术年会论文集——自然科学类三等奖,2024.

作者简介:李文博(2003-),男,中国广东东莞人,在读本科生,从事智能船舶研究。

通讯作者:李凯(1989-),男,中国江西赣州人,博士,讲师,从事智能船舶研究。

基金项目:①广东省大学生创新创业训练计划项目资助(项目编号:S202410566064);②广东海洋大学科研启动经费资助项目(项目编号:060302132401);③粤港澳大湾区高校在线开放课程联盟2024年教育教学研究和改革项目(项目编号:WGKM2024053)。