

基于改进混合 A* 算法的无人船路径规划

安焱恒¹, 孙晓界^{1,2,3}, 唐治齐¹, 徐林¹, 张皓翔¹, 慕东东³

(1. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 上海交通大学 自动化与感知学院, 上海 200240;
3. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对传统 A* 算法在无人船路径规划中存在转折点过多、路径平滑度不足以及规划效率低下等问题, 提出一种改进的混合 A* 算法。在搜索过程中交替运用四邻域和八邻域策略, 有效减少路径中的转折点数量, 增强路径探索的灵活性与全面性, 突破单一邻域搜索的局限性; 优化 A* 算法的估价函数, 将启发式搜索与路径优化策略相结合, 提升路径规划的效率和适应性。实验结果表明, 与传统 A* 算法相比, 改进后的混合 A* 算法充分考虑了无人船的运动约束, 在路径长度和探索节点数等方面均展现出优势, 生成的路径更加平滑, 对复杂环境的适应性更强。

关键词: 无人船; 路径规划; 混合 A* 算法; 四八邻域; 交替搜索

中图分类号: U664.82; TP18 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2026.01.005

Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Improved Hybrid A* Algorithm

AN Yanheng¹, SUN Xiaojie^{1,2,3}, TANG Zhiqi¹, XU Lin¹, ZHANG Haoxiang¹, MU Dongdong³

(1. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To address the issues of excessive turning points, insufficient path smoothness, and low planning efficiency in traditional A* algorithms for unmanned surface vehicle (USV) path planning, this paper proposes an improved hybrid A* algorithm. During the search process, the algorithm dynamically alternates between 4-neighborhood and 8-neighborhood strategies, effectively reducing the number of path turning points while enhancing the flexibility and comprehensiveness of path exploration, thereby overcoming the limitations of single-neighborhood search. The heuristic function of the A* algorithm is optimized through the integration of heuristic search and path optimization strategies, significantly improving the efficiency and environmental adaptability of path planning. Experimental results demonstrate that compared with the traditional A* algorithm, the improved hybrid A* algorithm fully considers USV motion constraints and exhibits advantages in path length, number of explored nodes, and other metrics. The generated paths are smoother and demonstrate stronger adaptability to complex environments.

Key words: unmanned surface vehicle; path planning; hybrid A* algorithm; four-eight neighborhood; alternating search

随着无人船技术的快速发展,路径规划成为自主航行系统的关键技术^[1]。该技术不仅需要保证航迹的精确性与规划效率,还需综合考虑海洋环境动态性、障碍物分布特征以及船舶运动学约束等多重复杂因素。 A^* 算法作为一种经典的启发式搜索算法,凭借其高效性和可靠性,在路径规划领域得到了广泛应用。然而,传统 A^* 算法在无人船路径规划中的应用面临诸多挑战,如路径转折点多、路径平滑度不足以及规划效率低下等,这些问题严重制约了无人船的航行性能和实用性。

近年来,无人船路径规划研究取得了突破性进展。文献[2]通过优化估价函数和迭代 A^* 算法,改善了路径调整方法和船舶旋回性能转折点处理方法,使得无人船在内陆湖水域的路径规划更为合理。文献[3]提出了一种基于改进RRT*的路径规划算法,通过目标点放大、区域问题转换及剪枝和三次B样条插值优化,提升了路径平滑度。文献[4]通过修改 A^* 算法的存储方式,扩展八邻域搜索为三十二方向搜索,并引入直线引导函数,同时考虑安全距离代价,增强了无人船在动态环境中的适应能力和安全性。文献[5]采用道格拉斯-普克(RDP)算法进行路径点筛选,基于自由边界的三次样条插值方法进行路径优化,并添加窗口约束优化曲度和避碰,规划的路径更平滑且符合无人水面艇航行轨迹特征。文献[6]在传统蚁群算法中引入角度机制、奖励系数和惩罚系数,提高了算法收敛速度,进而提升了无人船航行效率。文献[7]构建了新的势场函数模型,并实时调整参数以应对局部极小点问题,实现了无人船路径的实时规划。文献[8]提出了一种基于多阶段约束处理策略的协同路径规划算法,使无人艇集群能够更快、更安全、更顺畅地执行协作任务,而不会违反任何机动约束,同时为决策者提供了各种权衡解决方案。

尽管上述研究为无人船路径规划提供了宝贵经验,但在面对多障碍物和复杂环境时,仍存在路径转折点多、平滑度不足及搜索效率低下等问题。为此,本文提出一种改进的混合 A^* 算法。通过交替使用四邻域和八邻域搜索策略,减少路径转折点数量,提高路径平滑度,并在保证规划效率的同时提升算法的适应性和灵活性;通过对混合 A^* 算法的估价函数进行优化,进一步提升无人船路径规划的效率和适应性。

1 基础算法

1.1 A^* 算法

传统 A^* 算法作为一种经典的启发式搜索算法,在静态环境中寻找最优路径方面表现出色,在无人系统的全局路径规划中亦展现出强大的应用能力。 A^* 算法的核心是估价函数的设计,估价函数综合了当前节点到目标节点的实际代价和启发式估计代价,在搜索过程中根据估价函数可高效准确地找到最优路径^[9]。 A^* 算法的主要步骤是:从初始节点出发,依据估价函数对周围节点进行评估,并选择当前最优节点进行扩展;上一过程迭代进行,直至搜索到目标节点;通过回溯过程,从目标节点至起始节点形成一条全局最优路径。 A^* 算法不仅保证了路径的最优性,还通过启发式搜索策略显著提高了搜索效率。

A^* 算法的估价函数表达式为

$$f(p) = g(p) + h(p) \quad (1)$$

式中: $f(p)$ 为估价函数,表示从起点到目标点经过节点 p 的总路径代价; $g(p)$ 为实际代价函数,表示从起点到节点 p 的已验证路径成本; $h(p)$ 为启发函数,表示节点 p 到目标点的预估代价。

1.2 混合 A^* 算法

传统 A^* 算法在离散网格图上进行搜索,通过格点移动生成路径,尽管能够保证路径最优,但生成的路径通常由多个直角转弯组成,实际应用中存在较大局限性,尤其是用于无人船移动路径规划或其他需要平滑运动的情况。为解决该问题,Dolgov等^[10]提出了混合 A^* 算法,其考虑了车辆或机器人的运动学约束,既可保持 A^* 算法的全局搜索能力,也可同时生成更符合物理运动约束的平滑路径^[11]。

混合 A^* 算法的运动学模型表示如下。

$$x' = x + v \cdot \cos\theta \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$y' = y + v \cdot \sin\theta \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\theta' = \theta + \frac{v}{L} \cdot \tan\delta \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中: (x, y) 为 t 时刻车辆的质心坐标; θ 为航向角, $\theta \in (-\pi, \pi]$; v 为纵向速度; δ 为前轮转角; L 为车辆轴距; Δt 为离散时间步长。

混合 A^* 算法同时采用两种启发式函数:运动学启发函数和障碍物启发函数。运动学启发函数基于车辆转向约束特性(非完整系统),采用Reeds-Shepp或Dubins曲线^[12]计算当前位置到目标位置的理论最短可行路径长度,该启发函数的代价值严

格遵循车辆最小转弯半径限制,通过离线预计算生成全局运动学基准值,但忽略了环境障碍信息。障碍物启发函数是在二维栅格空间预生成 Dijkstra/A* 避障路径地图,计算每个栅格到目标点的最短无碰撞欧氏距离作为启发函数代价值,以实时感知障碍物分布特征,可有效识别狭窄通道、U 型弯等复杂地形,但舍弃了车辆运动学约束条件。混合 A* 算法取两种启发函数中的最大值作为最终代价值,以保证规划的路径同时满足运动学约束与避障需求。相比传统 A* 算法,混合 A* 算法可在复杂环境中生成更适合实际应用的路径,其循迹图如图 1 所示,图中实心圆点表示环境中的障碍物,带圈圆点表示算法搜索过程中生成的关键节点。

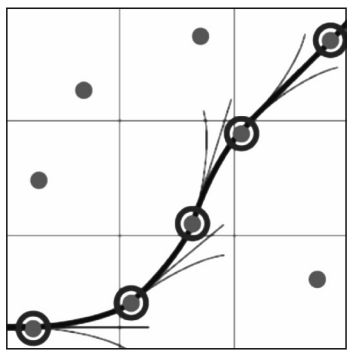


图 1 混合 A* 算法循迹图

Fig. 1 Hybrid A* algorithm tracking map

2 改进算法

2.1 改进搜索策略

四邻域指的是一个像素(或节点)的上下左右四个相邻的位置,该定义在图像处理、地图分析以及路径规划等诸多领域中具有基础性地位,为相关算法中对局部空间的初步探索提供基本的方向指引。八邻域则涵盖了上下左右以及四个对角方向,共计八个相邻位置^[13]。相较于四邻域搜索,八邻域搜索在空间覆盖范围上更为广泛,能够捕捉到更多的周边信息,可在图像边缘检测、复杂环境下的路径搜索等任务中为后续的决策提供更丰富的基础信息。

在传统 A* 算法框架下,其搜索机制限于对节点周围四邻域的扩展,未考虑无人船的实际动力学特性,生成的全局路径存在转折节点多、轨迹欠平滑等问题。在该搜索机制下,受船体惯性、推进响应延迟等因素限制,无人船难以完成大角度转向,其运动灵活性受限。

本文采用四邻域、八邻域交替搜索的方法,具

体操作方式为:首先以某个特定点为中心,运用四邻域的方式探寻下一个可能的点;在完成一次基于四邻域的搜索后,下一次搜索则以新找到的点为中心,转而采用八邻域的方式去寻找后续的点;如上述循环交替进行搜索操作。这种交替搜索方式巧妙地综合了四邻域搜索相对简单直接和八邻域搜索范围更广的特点。通过四邻域搜索,能够在初始阶段快速地在主要方向上进行初步探索,为后续的搜索提供基础方向引导;八邻域搜索则在后续过程中充分发挥其广泛覆盖周边区域的优势,进一步拓展搜索范围,确保不会遗漏一些潜在的路径或者目标信息。这种结合方式使得算法在搜索过程中能够更灵活、更全面地探索周围区域,有效克服单一邻域搜索方式的局限性,为获取更优的路径规划结果提供有力支持。

2.2 改进估价函数

本文在传统 A* 算法估价函数的基础上增加一个动态权重系数 $w(p)$ ^[14],此时估价函数的表达式为

$$f(p) = g(p) + w(p) \cdot h(p) \quad (5)$$

如权重系数较大,算法会尽快向终点扩展搜索,搜索速度快,但会错过最优路径;如权重系数较小,算法会倾向于搜索最优路径而减慢搜索速度。本文权重系数 $w(p)$ 设置为 2,以使算法能更快地向终点搜索,提升搜索效率。

3 仿真实验

3.1 算法设计

本文改进算法流程如图 2 所示,可分为三个模块。第一部分是地图导入模块,用于导入生成的二维栅格地图。在测试阶段随机生成大小为 20 m × 20 m 的二维栅格地图,图中黑色块表示障碍物。

第二部分是路径规划模块,将传统 A* 算法及本文改进后的混合 A* 算法分别应用于随机生成的地图中,找到最优路径。本文改进算法通过改进搜索方式和优化估价函数以提升路径规划的效率和适应性。

优先队列的操作流程从初始化开始:首先将路径起点加入队列并标记为待探索节点,随后进入迭代扩展阶段。在每次循环中,若队列非空,则弹出当前综合代价值最小的节点;若队列为空或已到达目标节点,则终止搜索。对当前节点执行邻域扩展时,采用动态交替策略,即首次扩展基于四邻域,后续根据迭代次数或路径曲率切换至八

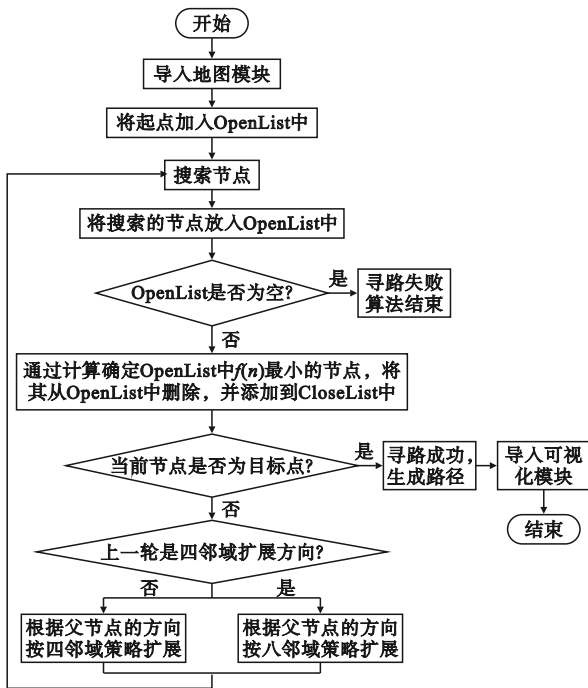


图2 本文改进算法流程图

Fig. 2 Flowchart of improved algorithm

邻域,以平衡搜索效率与路径平滑性。生成的候选子节点需经过障碍物碰撞检测,仅保留无障碍物占据的可行节点。对于这些可行节点,计算其实际代价与启发式代价,更新综合代价值后重新加入优先队列等待后续扩展。同时,将当前节点移入已访问集合,以避免重复探索,直至满足终止条件。

第三部分是可视化模块^[15],在随机生成的地图上运行两种算法,将规划的路径在栅格地图中表现出来,进行可视化处理,并将图片保存到指定路径。统计两种算法对地图处理的成功率、路径长度和转角数量,并显示在终端。

3.2 算法调试

为对比本文改进算法与传统A*算法的性能,利用代码生成400张随机二维栅格地图,将改进算法和传统A*算法均用于同一生成的随机地图^[16]中,两种算法的循迹结果以图片的形式存放在指定目标文件夹中,计算各算法运行的成功率、平均路径长度和平均转角数量,结果如表1所示。

表1 两种算法的实验结果

Table 1 Experimental results of two algorithms

性能指标	本文改进算法	传统A*算法
成功率/%	97.40	88.60
平均路径长度/m	28.01	38.27
平均转角数量/个	27.01	37.27

由表1可见,本文改进算法在路径规划成功率、路径长度及转角数量等核心性能指标上均展现出明显优势。与传统A*算法相比,本文改进路径规划算法的成功率提升了8.8个百分点,路径长度平均缩短了10.26 m,转角数量平均减少了10.26个。

为深入验证算法的有效性,进一步选取典型场景下的规划轨迹进行对比分析,结果如图3所示。地图随机生成时规定左上角为起点、右下角为终点,起点用圆圈表示,终点用星形表示,图中黑色像素块表示障碍物,起点和终点间连接的线段为对应算法循迹的最短路径。

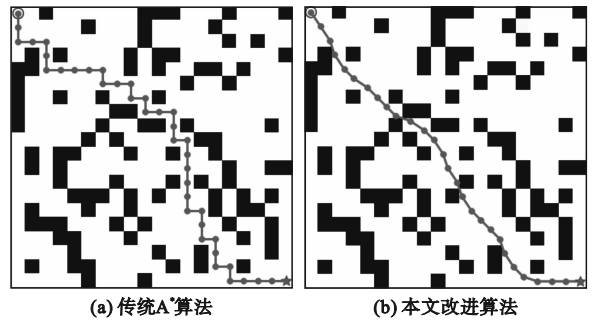


图3 随机生成地图上的路径规划结果对比

Fig. 3 Comparison of path planning results on randomly generated maps

由图3中的对比结果可见,本文改进算法探索的路径更加平滑,且简短清晰。

传统A*算法在遇到障碍时会向旁边继续扩展,探索最优路径,但由于其采用四邻域搜索策略,仅判断某节点上下左右点位情况,如果生成的随机障碍物刚好将点位挡住,会使算法无法走出“死区”^[17],导致探索失败,如图4(a)所示。本文改进算法因采用四邻域、八邻域交替搜索,找到了正确路径,如图4(b)所示。

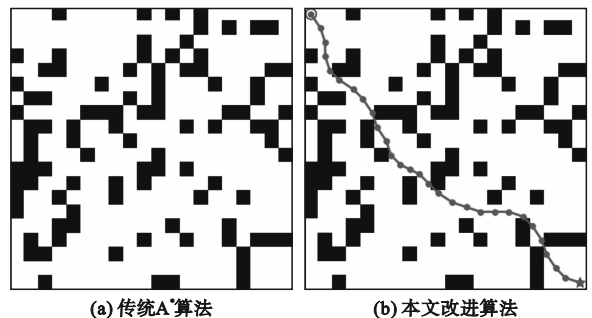


图4 存在“死区”时的路径规划结果对比

Fig. 4 Comparison of path planning results when there is a 'dead zone'

3.3 实际地图上的无人船路径规划

为验证本文无人船路径规划算法的可行性,选取贵阳百花湖的部分卫星地图作为实验对象,将其转换为栅格地图,并将传统 A* 算法与本文改进算法应用于该栅格地图上,利用两种算法分别寻求最优路径并可视化输出,结果如图 5 所示,两种算法在实际地图中的具体表现如表 2 所示。

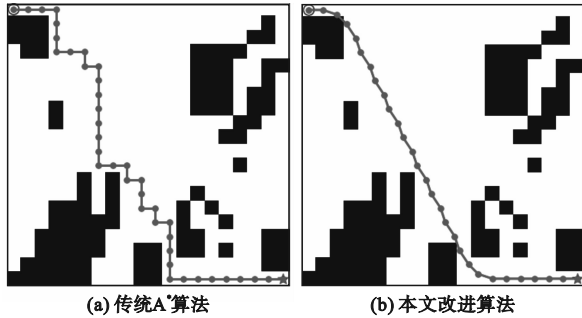


图 5 两种算法在实际地图上的路径规划结果

Fig. 5 Path planning results of two algorithms on actual maps

表 2 两种算法在实际地图上的规划结果对比

Table 2 Comparison of planning results of two algorithms on actual maps

性能指标	本文改进算法	传统 A* 算法
路径长度/m	28	38
转角数量/个	27	36

由表 2 中数据可以看出,改进后的混合 A* 算法在实际地图上的路径规划展现出了一定的优越性。与传统 A* 算法相比,本文改进算法的路径长度减少了 10 m,转角数量减少了 9 个。此外,将实际地图转换为栅格地图存在一定局限性^[18],转换结果与实际地图之间会存在较为明显的偏差,在一定程度上会影响路径规划的精确性和可靠性,但本文改进算法规划的路径更平滑且符合水面无人艇航行轨迹特征,进一步证明了本文算法的有效性。

4 结论

提出了一种改进的混合 A* 算法用于无人船的路径规划。通过四邻域与八邻域的对交替搜索策略,有效避免了单一邻域搜索的局限性,使搜索过程更加全面且灵活;对 A* 算法的估价函数进行改进,将启发式搜索与路径优化策略相结合,显著提升了路径规划的效率。实验结果表明,改进后的混合 A* 算法在路径长度及路径平滑程度方面均

优于传统 A* 算法,特别是应用于实际地图时优势更加明显,展现了其对复杂环境较强的适应能力。

参考文献 (References):

- [1] 张皓,赵翔.无人船发展现状与趋势[J].军民两用技术与产品,2024(10):13-18.
ZHANG H, ZHAO X. Development and trend of unmanned ships[J]. Dual Use Technologies & Products, 2024(10): 13-18. (in Chinese)
- [2] 林潭奇,李存荣,刘帅文.基于改进 A* 算法的内陆湖无人船路径规划[J].大连海事大学学报,2024,50(3):87-96.
LIN T Q, LI C R, LIU S W. Inland lake unmanned boat path planning based on improved A* algorithm[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2024, 50(3): 87-96. (in Chinese)
- [3] 张喜超,尹勇.基于改进 RRT* 算法的无人船路径规划[J].中国航海,2023,46(1):143-147,154.
ZHANG X C, YIN Y. Path planning for unmanned surface vehicle based on improved RRT* algorithm[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 143-147, 154. (in Chinese)
- [4] 焉晓贞,周新悦,罗清华.改进 A-star 算法的无人船动态路径规划[J/OL].系统工程与电子技术,2025:1-20[2025-03-15].
https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.tn.20250102.1344.020.html.
YAN X Z, ZHOU X Y, LUO Q H. Dynamic path planning of unmanned ship based on improved A-star algorithm[J/OL]. Systems Engineering and Electronics, 2025: 1-20 [2025-03-15].
https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.tn.20250102.1344.020.html. (in Chinese)
- [5] 包涵,杨林初,郁家丞,等.基于改进灰狼算法的无人船路径规划[J].船舶工程,2024,46(10):1-11.
BAO H, YANG L C, YU J C, et al. Path planning for unmanned surface vehicle based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Ship Engineering, 2024, 46(10): 1-11. (in Chinese)
- [6] 乔珍,尹传忠,仇鑫.基于改进蚁群算法的长航程无人船路径规划[J].计算机工程与科学,2024,46(10):1835-1842.
QIAO Z, YIN C Z, QIU X. Path planning of long-range unmanned ship based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2024, 46(10): 1835-1842. (in Chinese)
- [7] 叶军林,何建林,陈孟祥.基于改进人工势场算法的无人船路径规划[J].电脑知识与技术,2023,19(35):10-15.
- [8] YIN S H, XU N J, SHI Z S, et al. Collaborative path planning of multi-unmanned surface vehicles via multi-stage constrained multi-objective optimization[J]. Advanced Engineering Informatics, 2025, 65: 103115.
- [9] 张宸威,黄平,张国恒,等.基于改进 A* 算法的自适应路径规划研究[J].通信与信息技术,2025(1):43-45,122.
ZHANG C W, HUANG P, ZHANG G H, et al. Research on adaptive path planning based on improved A* algorithm[J]. Communication & Information Technology, 2025(1): 43-45, 122. (in Chinese)
- [10] DOLGOV D, THRUN S, MONTEMERLO M, et al. Practical search techniques in path planning for autonomous driving[J]. Ann Arbor, 2008, 1001(48105): 18-80.
- [11] KUO K C, CHAN K Y. Stable pushing in narrow passage environment using a modified hybrid A* algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024: 1-14.