

文章编号: 1000-4653(2026)02-0104-08

基于改进蚁群算法和转向点优化的 无人艇全局路径规划

高孝日^{1*}, 徐鹏飞¹, 刘新伯², 闫书佳³, 王利东⁴

- (1. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026; 2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031;
3. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 4. 大连海事大学 理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:针对传统蚁群算法在信息素更新、易陷入局部最优以及路径规划安全性方面不足等问题,提出一种基于改进蚁群算法和转向点优化的全局路径规划算法。通过引入迭代次数、搜索质量和效率的平衡参数,利用当前路径节点到终点的欧氏距离倒数来改进启发函数,以强化全局与局部搜索能力并避免局部最优。利用余弦函数的特性来设计自适应信息素挥发系数,以动态调整所提出的改进蚁群算法前后期的收敛性。鉴于航海环境的复杂性和实际航行需求,依托栅格法构建的航行环境,设计一种障碍物相邻节点检测和固定点逼近转向点优化算法,以提升航海安全性,使优化路径更贴合航海实践要求。仿真试验表明:与传统蚁群算法和其他改进算法相比,所提出的算法在平均路径长度上缩短约39%,平均迭代次数减少79%,提升路径寻优质量和收敛效率,有效缓解了搜索方向性不足及易陷入局部最优的问题,验证了其在无人艇全局路径规划中的可靠性和冗余转向点处理的高效性,为实际应用提供决策支持。

关键词:智能航运;路径规划;蚁群算法;无人艇;转向点优化

中图分类号: U675.96

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.012

Global path planning for unmanned surface vehicles based on improved ant colony optimization and waypoint refinement

Gao Xiaori^{1*}, Xu Pengfei¹, Liu Xinbo², Yan Shujia³, Wang Lidong⁴

- (1. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China; 3. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 4. School of Sciences, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To overcome the deficiencies of traditional ant colony optimization (ACO) in pheromone updating, local optima convergence, and path planning safety, this study proposes a global path planning algorithm based on improved ACO and turning-point refinement. The heuristic function is improved using the reciprocal of the Euclidean distance between current path nodes and the destination, along with balancing parameters for iteration number, search quality, and efficiency, thereby enhancing global and local search capabilities while avoiding local optima. An adaptive pheromone evaporation coefficient is designed by utilizing characteristics of cosine function to dynamically adjust the convergence of the proposed ant colony optimization in its early and late stages. Considering the complexity of maritime environments and practical navigation requirements, a grid-based navigation environment is constructed. An obstacle-adjacent node detection method and fixed-point approximation algorithm is proposed for turning point refinement to improve navigation safety and ensure

收稿日期: 2025-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(62173053)资助

作者简介: 高孝日(1983—),男,副教授,博士,研究方向为船舶运动建模与控制、模糊认知图等。*通信作者: gaoxiaori@dlnu.edu.cn

引用格式: 高孝日,徐鹏飞,刘新伯,等.基于改进蚁群算法和转向点优化的无人艇全局路径规划[J].中国航海,2026,49(2):104-111.

Gao X R, Xu P F, Liu X B, et al. Global path planning for unmanned surface vehicles based on improved ant colony optimization and waypoint refinement[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 104-111. (in Chinese)

optimized paths better conform to maritime practice. Simulation experiments demonstrate that, compared with traditional ACO and other improved algorithms, the proposed algorithm shortens the average path length by approximately 39% and reduces the average iteration number by 79%, significantly improving solution quality and convergence efficiency. It effectively alleviates issues of insufficient search directionality and susceptibility to local optima. These results verify the reliability of the proposed approach for global path planning of unmanned surface vehicles and its high efficiency in redundant waypoint optimization, thereby providing effective decision support in practical applications.

Key words: intelligent shipping; path planning; ant colony algorithm; unmanned surface vessels; waypoints refinement

水面无人艇(Unmanned Surface Vessel, USV)作为水上作业常用工具,常面临浅滩、岛礁等障碍物的航行威胁。^[1]如何通过合理的航线规划在规避障碍物的同时降低能耗^[2],已成为业内的关键问题。因此,鉴于全局路径规划能够前瞻性地规划任务,设计一种高效的全局路径规划算法对无人艇执行任务具有重要意义。

目前,在无人艇路径规划领域,已有学者从不同角度对规避性能和搜索效率进行研究,并取得了系列成果。陈思^[3]提出将蝙蝠算法与 Dijkstra 算法融合的混合规划方法,通过分阶段优化策略提升无人艇路径搜索效率,但全局优化效果仍需验证。应泽光等^[4]基于安全距离约束重构栅格地图,虽增强了路径安全性,但在复杂水域的解空间却会被过度约束。张扬等^[5]改进人工势场法以克服陷入局部极值。刘意等^[6]结合快速搜索随机树与人工势场法提升路径平滑性以及规划效率。然而,这些融合人工势场法的改进模型普遍存在参数设置复杂的问题。王志洋等^[7]通过改进遗传算子与引入切线优化策略,经仿真验证,尽管提升了无人艇避障性能,其稳定性在复杂水域场景下仍需探讨。与前述研究方法相比,蚁群算法因其具有全局优化能力、自适应性强、参数设置简洁且鲁棒性高等优势,在无人艇全局路径规划领域已取得显著成果。^[8-13]然而,结合实际应用场景的需求,仍需关注算法陷入局部最优、收敛性差异及实际落地应用等关键问题。

针对传统蚁群算法,王敏等^[14]提出融合最大-最小蚂蚁系统与自适应机制的混合算法以提升路径规划精度,但在全局和局部的搜索平衡性方面有待探索。俞佳慧等^[15]借助贝叶斯网络重构转移概率模型,并引入最大关联长度参数以增强模型稳定性。张丹红等^[16]将 A* 算法和多目标优化模型结合,通过剪枝提升路径规划效率。然而,这些算法在仿真验证过程中出现路径紧贴障碍物现象,偏离实际航行需求。孙功武等^[17]通过双禁忌表分类存储机制有效降低无效搜索概率并加速算法收敛,但该机制在防止陷入局部最优方面仍有一定的局限性。李理等^[18]提出多维度启发因数改进策略虽提升了路径平滑性,但复杂海况下的路径长度优化仍是实际应

用中的关键挑战。

传统蚁群算法应用于实际航行时,在路径搜索效率、障碍物规避精度和冗余转向点处理等方面仍存在不足。为此,本文提出一种基于改进蚁群算法和转向点优化的无人艇全局路径规划算法。首先,通过改进启发函数以克服陷入局部最优的问题;随后,引入动态挥发系数来平衡算法前后期的收敛问题;最后,设计障碍物相邻节点检测和固定点逼近转向点优化算法,使寻优路径更符合航海实践。

1 基本原理

1.1 蚁群算法

传统蚁群算法通过信息素浓度和状态转移概率进行路径决策^[19]。转移概率为

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta}{\sum_{S \in A_k} \tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta}, & S \in A_k \\ 0, & S \notin A_k \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: p_{ij}^k 为第 k 只蚂蚁由节点 i 前往 j 的转移概率; i 为当前节点; j 为下一节点; $\tau_{ij}^\alpha(t)$ 为 t 时刻由节点 i 前往节点 j 的信息素浓度; α 为信息素重要因数; A_k 为第 k 只蚂蚁可访问节点集合; S 为当前可访问节点; η_{ij}^β 为由 i 节点前往 j 节点启发函数; β 为启发函数重要因数。

启发函数^[20]为

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (2)$$

式(2)中: η_{ij} 为启发函数,用节点 i 到节点 j 之间的欧氏距离的倒数表示; x_i, y_i, x_j, y_j 分别为节点 i 、节点 j 的横、纵坐标。

假定更新时间为 Δt , 则 $t + \Delta t$ 时刻的信息素^[21]为

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (3)$$

式(3)中: ρ 为挥发系数; $\Delta \tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻从节点 i 前往节点 j 的信息素增量; $\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t)$; $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ 为第 k 只蚂蚁在 t 时刻从节点 i 前往节点 j 时留下的信息素;当第 k 只蚂蚁经过路径时, $\Delta \tau_{ij}^k(t) = Q/L_k$, 否则, $\Delta \tau_{ij}^k(t) = 0$; L_k 为第 k 只蚂蚁本次所走路程总长度; Q 为搜索一次释放的信息素总量,取

常数。

1.2 栅格法环境建模

栅格法^[22]通过将环境分割成若干个矩形网格单元以实现空间信息的离散化。每个栅格单元既代表特定离散空间,又被赋予唯一编号,从而确保空间与位置索引的一一对应,展示了基于栅格法构建的6×6环境模型见图1。图1中:黑色区域为障碍物;白色区域为可航水域。

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
12	14	15	16	17	18
19	20	2	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

图1 6×6栅格图

Fig.1 6×6 grid map

图1中障碍物区域编码为1,可航区域编码为0。每个网格单元的状态信息包括障碍物分布、可通行区域和目标点,其表达式^[22]为

$$\begin{cases} x_i = \text{mod}(i-1, w) + 0.5 \\ y_i = \text{fix}((i-1)/w) + 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中:mod为求余函数;fix为取整函数; w 为栅格矩阵行数。

2 改进蚁群算法

本文通过改进启发函数、调整信息素挥发系数和设计障碍物邻点检测算法,实现寻优过程的合理性、搜索收敛的平衡性和优化路径的实用性。

2.1 改进启发函数

传统蚁群算法启发函数采用当前节点与下一节点的欧氏距离的倒数来度量,缺乏方向性。为此,本节提出一种改进启发函数,采用当前路径节点到终点的欧氏距离倒数替代,并引入迭代次数、搜索质量和效率等平衡参数,以增强全局与局部搜索能力,避免局部最优,见式(5)。

$$\delta_{js} = \left\{ \frac{-\ln\left[\left(\frac{n}{N}\right)^2 + e^{-1} + C\right]}{d_{js}^2} \right\}^2 \quad (5)$$

式(5)中: δ_{js} 为改进启发函数; n 为当前迭代次数; N 为总迭代次数; C 为用来平衡搜索质量和效率的参数,取0.25; d_{js} 为节点 j 到终点 s 的欧氏距离; s 为路径终点; e 为欧拉数。

改进后的启发函数在前期利用信息素浓度引导蚁群,后期则削弱其引导作用来规避局部极值,增强

全局寻优能力。

2.2 调整挥发系数

蚁群算法中信息素浓度与挥发系数相关。挥发系数较大时利于全局搜索,较小时便于快速收敛。然而,传统算法的挥发系数是固定值,不利于平衡全局搜索和快速收敛。基于此,利用余弦函数的特性来动态调整挥发系数为

$$\lambda = \cos\left(\frac{\pi \times n}{2 \times N}\right) \quad (6)$$

式(6)中: λ 为改进挥发系数,范围设为 $[0.3, 0.8]$ 。当 $\lambda \leq 0.3$ 时, λ 取0.3;当 $0.3 < \lambda < 0.8$ 时,由式(6)计算,在此区间内,前期系数取值大,后期逐步减小;当 $0.8 \leq \lambda$ 时, λ 取0.8。

改进后的挥发系数基于余弦函数动态调整:前期取值较大以增强全局搜索能力,后期逐步减小以加速收敛,从而平衡全局与局部搜索性能。

2.3 设计障碍物相邻节点检测算法

针对航海环境的复杂性,无人艇航行需预留安全水域以保障航行安全。然而,现有方法未充分考虑规划路径接近障碍物边缘的情况,这将危及航行安全。此外,一些方法通过扩大障碍物周边区域来确保航海安全,但会缩小路径搜索空间,在通航密集水域可能导致无解。为此,提出一种障碍物相邻节点检测算法优化路径规划并提升航海安全性。

算法根据当前栅格的水平和垂直相邻栅格障碍物状态更新可航节点集合:若无障碍物,标记为可航;否则,将相邻节点距离置零,标记为禁航。各节点栅格图见图2。

$i-m-1$	$i-m$	$i-m+1$
$i-1$	i	$i+1$
$i+m-1$	$i+m$	$i+m+1$

图2 各节点栅格图

Fig.2 The grid map of each node

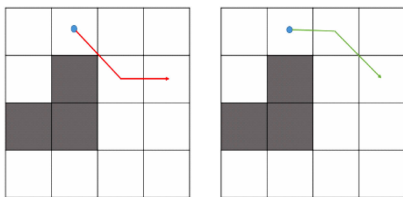
图2中: i 为当前栅格节点,节点 $i-m$ 、节点 $i+m$ 、节点 $i-1$ 、节点 $i+1$ 为当前栅格节点上、下、左、右方向的栅格;节点 $i-m-1$ 、节点 $i-m+1$ 、节点 $i+m-1$ 、节点 $i+m+1$ 为当前栅格节点左上、右下、左下、右下方的栅格。

$$D_R = \begin{cases} \text{dis}(i, i-m-1) = 0, \text{dis}(i, i-1) = 0 \\ \text{dis}(i, i+m-1) = 0, \text{dis}(i, i+1) = 0 \\ \text{dis}(i, i-m+1) = 0, \text{dis}(i, i+1) = 0 \\ \text{dis}(i, i+m+1) = 0, \text{dis}(i, i+1) = 0 \\ \text{dis}(i, i-m+1) = 0, \text{dis}(i, i-m) = 0 \\ \text{dis}(i, i-m-1) = 0, \text{dis}(i, i-m) = 0 \\ \text{dis}(i, i+m-1) = 0, \text{dis}(i, i+m) = 0 \\ \text{dis}(i, i+m+1) = 0, \text{dis}(i, i+m) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: D_R 为距离矩阵中一组点的欧氏距离, $dis(\cdot)$ 为计算两个栅格节点中心位置之间的欧氏距离函数;式(7)可判断当前栅格的左右上下4个位置是否为障碍物,用 $dis(\cdot)$ 函数表示当前节点与判断节点的关系,0 代表当前节点与该节点不互通,该栅格为障碍物其值为 0;否则,当前节点与该节点互通,该栅格为可航水域。

若当前栅格左侧相邻栅格为障碍物,即满足 $dis(i, i-1) = 0$ 条件,则将当前节点左上方栅格 $i-m-1$ 和左下方栅格 $i+m-1$ 处的栅格节点与当前栅格节点的距离矩阵中的值设置为 0,即设置为不互通节点。同理,再对其他 3 个位置上的栅格节点进行判断和操作。

传统和改进蚁群算法的路径规划结果见图 3。传统蚁群算法规划路径如图 3a 所示;引入障碍物相邻节点检测的改进算法规划路径如图 3b 所示。由图 3 所知:传统算法的规划路径过于接近障碍物,不利于安全;而改进算法的规划路径远离障碍物,更符合无人艇航行的实际需求。



(a) 传统算法 (b) 改进算法

图 3 传统和改进蚁群算法路径规划示意

Fig. 3 Path planning schematics for conventional and improved ant colony algorithm path planning

3 转向点优化

尽管改进蚁群算法考虑无人艇航行安全,但寻优路径转向点数量却增加。为满足航海实践需求,设计一种基于固定点逼近优化算法来剔除路径中的冗余转向点。

3.1 固定点逼近优化

该算法流程如下:

1) 以起点为固定点,从终点反向遍历并连接固定点,通过线性插值生成交点,计算线段穿过的栅格并检测障碍物。

2) 计算该线段与最近的障碍物之间的距离并设置阈值,以避免优化后的路径与障碍物过于接近。若线段没有经过障碍物栅格且与最近障碍物之间的距离大于阈值,将该点设置为固定点并存入优化转向点数组;否则,继续遍历。

3) 当固定点为终点时,结束循环,输出优化转

向点数组。固定点逼近优化遍历操作示意图 4。

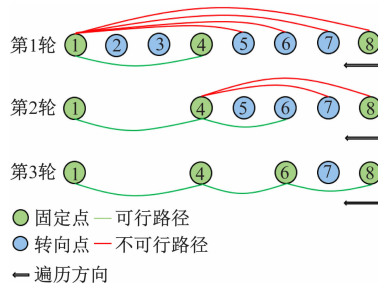


图 4 固定点逼近优化遍历操作示意

Fig. 4 Schematic of traversal process for fixed-point approximation optimization

3.2 编号差值法提取转向点

转向点的提取采用编号差值法。

1) 将路径上的所有节点进行处理得到转向点。

2) 对转向点进行固定点逼近优化。为准确提取转向点,先将起点存入转向点数组,后从起点的下一个节点开始遍历到终点前一个节点,分别提取相邻 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ 个节点的栅格编号,将 $n-1$ 、 n 和 $n+1$ 节点编号的差值绝对值进行比较。若绝对值相同,则 n 节点不是转向点;否则,将 n 节点存入转向点数组,编号差值法提取转向点见图 5。图 5 中:当路径经过节点编号 1、4、7 时,中间节点与相邻节点的编号差的绝对值相等,则节点编号 4 不是转向点;当路径经过节点编号 1、2、6 时,节点编号 4 与相邻节点的编号的差值绝对值不相等,则节点编号 2 为转向点;以此类推。

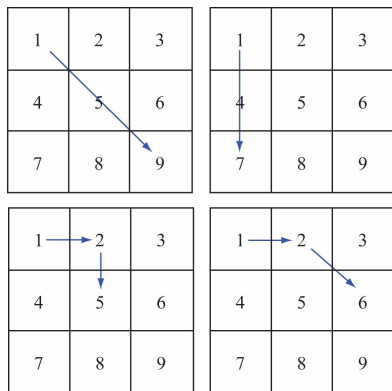


图 5 编号差值法提取转向点

Fig. 5 Turning point extraction using the index difference method

3) 将终点存入转向点数组。

3.3 固定点逼近优化伪代码

固定点逼近优化伪代码见图 6。

4 基于改进蚁群算法和转向点优化的路径规划流程图

基于改进蚁群算法和转向点优化的流程见

图7。

```

输入:转向点数组,障碍物数组,安全阈值  $\varepsilon$ 
输出:优化转向点数组
优化转向点数组 = [转向点数组[0]]
固定点索引值 = 1
While length(转向点数组) > 1 do
  If 固定点索引值  $\neq$  length(转向点数组) Break;
  For  $i = \text{length}(\text{转向点数组}) - 1:2$  do
    If 固定点索引值  $\neq$  length(转向点数组) - 1 Break;
    记录线段栅格
    If 栅格不在障碍物范围 Then
      障碍物距离 = [存储障碍物和线段距离 for 障碍物 in 障碍物数组 if 横坐标在固定点和终点之间]
      If all(障碍物距离) > 阈值  $\varepsilon$  Then
        固定点索引值 =  $i$ 
        优化转向点数组.append(转向点数组[ $i$ ])
      Break
    End
  End
End

```

图6 固定点逼近优化伪代码

Fig. 6 Pseudocode of fixed-point iterative optimization

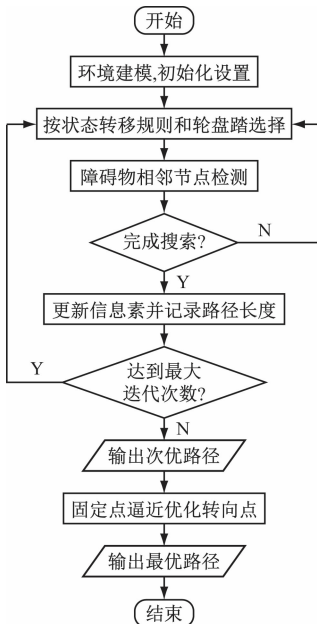


图7 所提出算法的流程

Fig. 7 The proposed algorithm flowchart

1) 对环境进行栅格建模,初始化参数。

2) 依据状态转移规则和轮盘赌选择机制搜索路径,并设计障碍物相邻节点检测算法以确保路径符合安全需求。

3) 利用改进启发函数引导路径搜索。若蚂蚁到达终点,则更新信息素浓度并记录路径长度;否则,继续按上述策略搜索;当迭代次数达到预设值

时,输出次优路径。

4) 利用固定点逼近优化算法对转向点进行二次优化,输出最优路径。

所提出算法的主要步骤如下:

① 构建栅格环境,并初始化参数。

② 启动迭代,在寻优过程中引入障碍物相邻节点检测算法,避免危险路径。

③ 更新信息素,采用改进的信息素挥发系数。

④ 迭代结束,输出次优路径。

⑤ 对该次优路径进行固定点逼近优化,剔除冗余转向点,缩短路径长度。

⑥ 输出最优路径。

5 试验仿真与分析

为验证所提算法的可行性,依托栅格环境,对所提出的方案进行仿真试验,并分别与文献[23]的传统蚁群算法和文献[18]的多启发因素改进蚁群算法进行对比分析。

5.1 参数设置

试验采用 40×40 栅格模拟航海环境。蚁群算法初始参数见表1。模拟环境包括随机分布障碍物的栅格图和U形复杂环境的栅格图两种情况。

表1 蚁群算法初始参数

Tab. 1 Initial parameters of the ant colony algorithm

参数	数值
总迭代次数/ N	200
蚂蚁个数/ m	50
信息素重要因数/ α	1
启发函数重要因数/ β	7
信息素挥发系数/ λ	0.8
信息素总量/ Q	1

5.2 仿真试验

为确保试验的可靠性,本研究对文献[23]的传统算法、本文所提出的算法和文献[18]的算法分别进行了20次仿真,并采用固定点逼近算法对所提出算法的寻优路径进行二次优化。

5.2.1 对比仿真试验

文献[23]传统蚁群算法、本文所提出的算法和文献[18]的改进蚁群算法的试验对比见图8。起点为左上角,终点为右下角。图8中:传统蚁群算法的规划路径在节点(7,30)和(32,12)处邻近障碍物,存在安全隐患;而本文所提出的算法所生成的路径能够确保与障碍物保持安全间距。虽然文献[18]

的规划路径也能与障碍物保持一定的安全距离,但是其路径长度相对较长,且转向点数量较多。相比之下,本文所提出的算法在路径长度和转向点数量上表现更优。

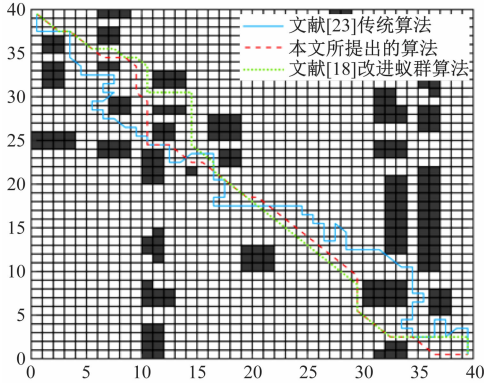


图8 传统算法、所提出算法和文献[18]算法对比图
Fig.8 The comparative experimental results of traditional algorithm, proposed algorithm, and the algorithm in reference [18]

文献[23]传统蚁群算法、本文所提出的算法和文献[18]中的改进蚁群算法的迭代收敛图见图9。由图9可知:传统蚁群算法的迭代次数为298次,最小节点路径长度为100.5;本文所提出的算法迭代次数为62次,最小节点路径长度为62.2;文献[18]算法的迭代次数为65次,最小节点路径长度为60.5。本文所提出的算法在迭代效率和路径长度方面均优于传统蚁群算法。虽然文献[18]算法最短路径略小于本文算法,但本文所提出的算法的迭代效率优于文献[18]。

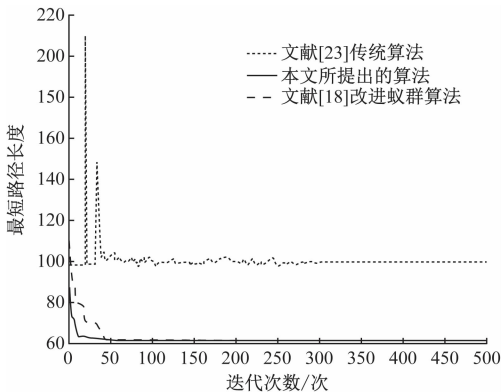


图9 传统算法、本文所提出算法和文献[18]算法迭代收敛图

Fig.9 Iteration convergence plots of the traditional algorithm, the proposed algorithm, and the algorithm in reference [18]

文献[23]传统蚁群算法、本文所提出的算法和文献[18]算法在U形复杂环境下的试验对比见图10。起点为(10.5,32.5),终点为(40,40)。图10中:传统蚁群算法在10次仿真中仅成功一次,寻优

效率低且路径长;而本文所提出的算法成功规划出路径,提升寻优效率且路径大幅缩短;文献[18]算法规划出的路径虽能够与障碍物维持一定间距,但对比本文算法,该路径长度较长,转向点数量也较多。结果表明,本文所提出的算法在复杂环境下的寻优效率和稳定性方面均优于文献[23]算法和文献[18]算法。

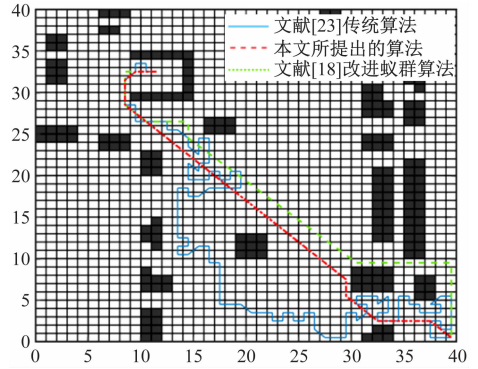


图10 复杂环境下3种算法试验对比图
Fig.10 Experimental comparison of three different algorithms in complex environments

5.2.2 含转向点优化的改进蚁群算法试验仿真

固定点逼近优化转向点仿真图见图11。图11中:虚线为次优路径,转向点数量为18个;实线为最优路径,转向点数量减少至6个。优化后的转向点明显减少,路径长度缩短,且始终与最近障碍物保持安全距离,满足安全要求。

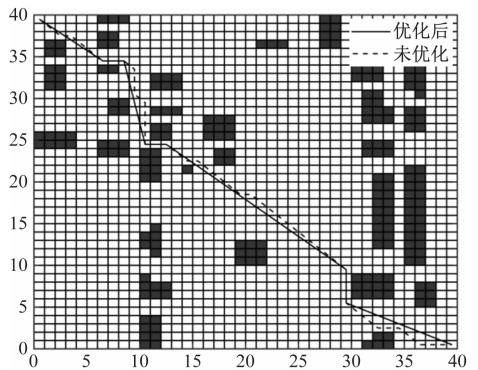


图11 固定点逼近优化转向点仿真图
Fig.11 Simulation results of turning point optimization based on fixed-point approximation

5.2.3 结果分析

将文献[23]的传统算法、本文所提出的算法、文献[18]的算法分别进行20次仿真。最优节点路径长度、平均节点路径长度、最优迭代次数和平均迭代次数等指标见表2。

由表2可知:传统算法最优路径长度为100.5,平均为108.2,需298次迭代寻优;本文所提出算法

将最优和平均路径长度大幅缩短至 62.2 和 65.8, 降幅达 39%, 同时最优迭代次数降至 62 次, 效率提升 79%; 尽管文献[18]算法路径长度进一步缩短, 但其最优和平均迭代次数分别为 65 次和 70 次, 高于本文所提出的算法。试验表明, 本文所提出算法在维持路径质量接近文献[18]算法的前提下, 迭代效率提升 4.6%, 综合性能优于文献[23]传统算法和文献[18]算法。

表 2 文献[23]传统算法、本文所提出的算法和文献[18]算法的指标比较表

Tab.2 Performance metrics comparison of the conventional algorithm in reference [23], the proposed algorithm, and algorithm in reference [18]

指标	文献[23] 传统算法	本文所提 出的算法	文献[18] 算法
最优路径长度	100.5	62.2	60.5
平均路径长度	108.2	65.8	64.6
最优迭代次数/次	298	62	65
平均迭代次数/次	305	66	70

文献[23]传统路径、本文最优路径和文献[18]路径指标比较表见表 3。由表 3 可知: 传统蚁群算法转向点为 60 个, 路径长度为 108.2; 本文所提出的算法最优路径转向点为 6 个, 长度为 60.1; 文献[18]算法转向点为 17 个, 长度为 64.6。本文次优路径算法虽优于传统算法, 而与文献[18]算法相比并没有明显优势, 但通过固定点逼近优化算法生成的最优路径转向点个数比文献[18]算法减少约 64.7%, 路径长度缩短约 18.3%, 转向点数量和路径长度明显减少, 与文献[18]相比具有明显优势。

表 3 文献[23]传统路径、本文最优路径和文献[18]路径指标比较表

Tab.3 Performance metrics comparison of the conventional path in reference [23], the optimal path proposed in this study, and the path in reference [18]

指标	文献[23] 传统算法	本文算法	文献[18] 算法
转向个数/个	60	6	17
路径长度	108.2	60.1	64.6

6 结 语

针对传统蚁群算法在信息素更新、易陷入局部最优和路径规划安全性方面的不足, 本文提出一种

基于改进蚁群算法和转向点优化的全局路径规划算法, 以提升无人艇路径规划性能。仿真表明, 相较传统蚁群算法, 本文算法平均路径长度缩短约 39%, 平均迭代次数减少 79%, 收敛效率显著提升。优化后的最优路径更符合安全要求。试验结果表明, 本文算法在收敛速度和路径安全性方面均优于传统算法。

本文所提出的算法主要针对静态障碍物的全局路径规划, 未来将拓展至动态障碍物情况下的局部路径规划。

参 考 文 献

- [1] 赵亮, 王芳, 白勇. 水面无人艇路径规划的现状与挑战[J]. 船舶工程, 2022, 44(4): 1-7.
Zhao L, Wang F, Bai Y. Current status and challenges of unmanned surface vehicle path planning[J]. Ship Engineering, 2022, 44(4): 1-7. (in Chinese)
- [2] Fan J, Zhang X, Cao T, et al. Ship longitudinal stabilization control based on CGSA and nonlinear switch modification[J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 1-11.
- [3] 陈思. 基于蝙蝠算法的无人艇全局路径规划[J]. 军事交通学报, 2022, 1(12): 42-46.
Chen S. Global path planning for USV based on bat algorithm[J]. Journal of Military Transportation, 2022, 1(12): 42-46. (in Chinese)
- [4] 应泽光, 何琪. 基于改进 A* 算法的无人艇复杂水域路径规划[J]. 机电技术, 2022(5): 33-35.
Ying Z G, He Q. Path planning for unmanned surface vehicles in complex water areas based on an improved A* algorithm[J]. Mechatronics Technology, 2022(5): 33-35. (in Chinese)
- [5] 张扬, 彭鹏菲, 曹杰. 基于改进 APF 算法的水面无人艇局部路径规划[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(9): 42-48.
Zhang Y, Peng P F, Cao J. Local path planning for USV based on improved APF algorithm[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(9): 42-48. (in Chinese)
- [6] 刘意, 齐洁. 考虑无人艇运动学约束的 IRRT*-APF 路径规划算法[J]. 计算机科学, 2024, 51(9): 290-298.
Liu Y, Qi J. IRRT*-APF path planning algorithm considering kinematic constraints of unmanned surface vehicle[J]. Computer Science, 2024, 51(9): 290-298. (in Chinese)
- [7] 王志洋, 王龙金. 基于改进遗传算法的无人艇集群多任务分配路径规划[J]. 船舶工程, 2024, 46(4): 105-111.
Wang Z Y, Wang L J. Global path planning for multi-

- task assignment based on improved genetic algorithm for multi-USV[J]. *Ship Engineering*, 2024,46(4):105-111. (in Chinese)
- [8] Gao S, Wang Y, Cheng J, et al. Ant colony optimization with clustering for solving the dynamic location routing problem[J]. *Applied Mathematics and Computation*,2016, 285: 149-173.
- [9] Luo Q, Wang H, Zheng Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm [J]. *Neural Computing & Applications*, 2020, 32(6): 1555-1566.
- [10] Wu L, Huang X, Cui J, et al. Modified adaptive ant colony optimization algorithm and its application for solving path planning of mobile robot [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 215:1-22.
- [11] Cui J, Wu L, Huang X, et al. Multi-strategy adaptable ant colony optimization algorithm and its application in robot path planning [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2024, 288:1-20.
- [12] Miao C, Chen G, Yan C, et al. Path planning optimization of indoor mobile robot based on adaptive ant colony algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156:1-10.
- [13] Chen J, Ling F, Zhang Y, et al. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2022,69:1-11.
- [14] 王敏,石明航,韩晔昕,等.基于改进蚁群算法的无人艇全局航路规划模型[J].*河南科技大学学报(自然科学版)*,2024,45(5):50-56.
Wang M, Shi M H, Han Y X, et al. Global route planning for unmanned vehicles based on improved ant colony algorithm [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024,45(5):50-56. (in Chinese)
- [15] 俞佳慧,栾萌.改进蚁群算法在无人艇路径规划中的应用[J].*控制工程*,2022,29(3):413-418.
Yu J H, Luan M. Application of improved ant colony optimization algorithm in path planning of unmanned surface vessels [J]. *Control Engineering of China*, 2022,29(3):413-418. (in Chinese)
- [16] 张丹红,陈文文,张华军,等.A*算法与蚁群算法相结合的无人艇巡逻路径规划[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2020,48(6):13-18.
Zhang D H, Chen W W, Zhang H J, et al. Patrol path planning of unmanned surface vehicle based on A* algorithm and ant colony algorithm [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020,48(6):13-18. (in Chinese)
- [17] 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.
Sun W G, Su Y X, Gu Y C, et al. Path planning for unmanned surface vehicle based on improved ant colony algorithm[J]. *Control and Decision*, 2021,36(4):847-856. (in Chinese)
- [18] 李理,李鸿,单宁波.多启发因素改进蚁群算法的路径规划[J].*计算机工程与应用*,2019,55(5):219-225.
Li L, Li H, Shan N B. Path planning based on improved ant colony algorithm with multiple inspired factor[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019,55(5):219-225. (in Chinese)
- [19] 陈Z G, 詹Z H, 林Y, et al. Multi-objective cloud workflow scheduling: a multiple populations ant colony system approach [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019,49(8):2912-2926.
- [20] 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展[J].*控制与决策*,2004,19(12):1321-1326.
Duan H B, Wang D B, Zhu J Q, et al. Development on ant colony algorithm theory and its application [J]. *Control and Decision*, 2004,19(12):1321-1326. (in Chinese)
- [21] 张纪会,徐心和.一种新的进化算法——蚁群算法[J].*系统工程理论与实践*,1999(3):85-88.
Zhang J H, Xu X H. A new evolutionary algorithm——ant colony algorithm[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1999(3):85-88. (in Chinese)
- [22] 陈C, LIU H, Zheng X, et al. A two-grid MMOC finite element method for nonlinear variable-order time-fractional mobile immobile advection-diffusion equations [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2020, 79(9): 2771-2783.
- [23] 李祚泳,钟俊,彭荔红.基于蚁群算法的两地之间的最佳路径选择[J].*系统工程*,2004,22(7):88-92.
Li Z Y, Zhong J, Peng L H. An application of ant colony algorithm to selection of optimization route between two sites[J]. *Systems Engineering*, 2004,22(7):88-92. (in Chinese)