

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514264

基于局部地图复杂度动态势场引导的 无人船路径规划算法*

孙明晓, 张允曦, 栾添添, 王璐璐, 张秋雨
(哈尔滨理工大学自动化学院 哈尔滨 150080)

摘 要:针对河道、沿海等真实水域地图复杂度多变场景下, 固定参数易引发路径规划效率低、路径震荡、碰撞风险升高, 地图过度探索等问题, 提出了一种基于局部地图复杂度动态势场引导的无人船路径规划算法。该算法通过实时感知环境动态调整参数, 显著提升了复杂水域中的规划性能与安全性。首先, 根据每个扩展节点实时进行障碍物碰撞检测并计算该节点的局部地图复杂度, 根据此复杂度动态调节势场引力强度、斥力强度、自适应调节节点生成策略中的随机探索与势场引导的混合权重以及三级安全步长的切换, 解决传统固定参数在实际环境中复杂度交叠水域的适配问题。同时, 构建融合目标引力、障碍物斥力与边界斥力的复合导航势场, 解决狭窄水道避障与贴边安全平衡问题, 提高路径规划的安全性。然后, 通过剪枝剔除冗余节点、拉伸优化关键转折点、三次 B 样条平滑路径保证曲率连续, 提升路径可行性, 满足无人船任务执行需求。通过电子海图仿真和无人船实验表明, 本文算法在规划时间、路径长度、采样点数、路径可行性上均保持优势, 对比改进算法 DVSA-RRT, 在复杂环境中, 规划时间缩短 87.27%, 路径长度缩短 21.6%, 采样点数减少 78.53%, 提高了路径规划效率, 缩小了路径规划空间, 满足无人船任务需求。

关键词: 无人船; 人工势场法; 快速扩展随机树法; 路径规划; 地图复杂度

中图分类号: TP242.6 TH165 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Path planning algorithm for unmanned surface vehicle based on local map complexity and dynamic potential field guidance

Sun Mingxiao, Zhang Yunxi, Luan Tiantian, Wang Lulu, Zhang Qiuyu

(School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In view of the problems such as low efficiency of path planning, high risk of collision, and excessive map exploration caused by fixed parameters in the scene of varying complexity of real water area maps, such as rivers and coasts, a path planning algorithm for unmanned ships based on dynamic potential field guidance of local map complexity is proposed. The algorithm can significantly improve the planning performance and safety in complex waters by dynamically adjusting parameters through real-time perception of the environment. Firstly, according to each extended node, the obstacle collision detection is implemented in real time, and the local map complexity of the node is calculated. Based on this complexity, the gravitational strength and repulsive strength of the potential field are dynamically adjusted, the hybrid weights of random exploration and potential field guidance in the node generation strategy are adjusted adaptively, and the switching of the three-level safety step size is used to solve the adaptation problem of the traditional fixed parameters in the complex overlapping waters in the actual environment. Meanwhile, a compound navigation potential field integrating target gravity, obstacle repulsion, and boundary repulsion is constructed to solve the problem of obstacle avoidance and well safety balance in narrow waterways and improve the safety of path planning. Then, the redundant nodes are removed by pruning, and the key turning points are optimized by stretching. The cubic B-spline smooth path is used to ensure the curvature continuity, improve the path feasibility, and meet the requirements of unmanned ship mission execution. Through electronic chart simulation and unmanned ship experiment, it shows that the proposed algorithm maintains advantages in planning time, path length, sampling points, and path feasibility. Compared with

收稿日期: 2025-07-14 Received Date: 2025-07-14

* 基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2024E047)、黑龙江省优秀青年教师基础研究支持计划项目(YQJH2024067)资助

the improved algorithm DVSA-RRT, in a complex environment, the planning time is shortened by 87.27%, the path length is shortened by 21.6%, and the sampling points are reduced by 78.53%, which improves the efficiency of path planning, reduces the path planning space, and meets the requirements of the unmanned ship mission.

Keywords: unmanned surface vehicle; artificial potential field method; fast extended random tree method; path planning; map complexity

0 引 言

随着智能控制技术的快速发展,无人船(unmanned surface vehicle, USV)^[1]作为水上机器人的一种形式,能够在民用和军用领域独立执行任务,不需要人力的参与和控制,节省人力资源。在无人船的相关研究中,其自主导航和路径规划能力一直是无人船的核心研究领域之一。不同于无人机等具有高机动性的移动机器人,无人船在水面运动时受到显著的水动力学约束,特别是航向角的动态变化会直接影响其运动轨迹的平滑性与可行性^[2]。这使得传统路径规划算法难以直接应用于无人船导航系统,需开发考虑船舶运动学约束的专用规划方法^[3]。

在路径规划领域,根据环境信息获取方式可分为全局与局部路径规划^[4]。全局规划基于完整环境地图生成全局最优路径,但动态避障能力有限^[5];局部规划依赖实时感知数据,具备强避障能力,但存在局部极小值陷阱与实时性挑战^[6];典型的全局方法有快速扩展随机树算法(rapidly-exploring random trees, RRT)^[7]、蚁群算法^[8]、A*算法^[9-10]等。人工势场法(artificial potential field, APF)^[11]作为主流局部规划算法,其优势在于搜索效率高、实时性好、原理简单且路径相对平滑。两者的有效结合支撑着 USV 自主导航任务^[12]。

现有研究通过多种方法提升 RRT 算法效率,结合路径优化方法改善平滑度,但在狭窄复杂环境中仍存在节点冗余、路径不连续等问题。文献[13]提出一种动态变采样区域 RRT 路径规划算法(dynamic variable sampling area RRT, DVSA-RRT)算法,采用碰撞检测和目标偏置策略降低随机性,但在复杂环境中效果有限。文献[14]提出改进的 RRT* 算法:通过目标区域化和动态采样调整提升效率,结合剪枝与三次 B 样条插值优化路径。文献[15]提出双向搜索树算法,从起点和终点同时探索,加快规划速度。针对狭窄路径效率低的问题,文献[16]采用目标偏置策略,以一定概率选择目标点作为随机点,从而提高规划效率。文献[17]提出一种改进的 IRRT* 算法,利用人工势场法避障,结合三阶 B 样条优化路径。文献[18]通过双树采样、动态步长调整和人工势场优化路径质量,采用 B 样条平滑和主从避障策略实现高效轨迹规划。文献[19]提出改进渐进随机树算法,通过环境

膨胀和动态步长自适应避障,结合启发式势场剪枝减少冗余节点。

考虑到现有算法的不足,本研究提出了一种基于局部地图复杂度动态势场引导的 RRT 路径规划算法(complexity dynamic aware potential field guided RRT, CDAPFG-RRT)算法。首先,提出一种基于局部地图复杂度计算函数,并引入人工势场法的虚拟势场,考虑到不同复杂度的地形影响,采用了动态势场力计算,以及自适应步长机制,有效缩短了路径规划时间和路径长度,提高了规划效率。同时,采用逆向寻优路径优化算法提取关键点,使路径减少转弯次数,缩短总路径长度。然后,采用自适应 B 样条曲线平滑路径,使路径更符合 USV 运动特性,同时进一步缩短路径长度。最后通过仿真和真实实验验证了本算法的有效性。

本研究的主要贡献为:在 RRT 算法框架中深度融合人工势场法,显著提升复杂水域路径规划性能。针对固定参数在复杂度交叠水域的适配难题,提出局部地图复杂度实时感知机制。该机制有效解决了低复杂度区规划效率低与高复杂度区转弯能力不足的矛盾,解决了路径震荡问题。同时,构建融合目标引力、障碍斥力与边界斥力的复合导航势场,通过障碍物膨胀安全距离和边界斥力约束精确划定 USV 安全航域,有效提升无人艇在实际水域规划效率与安全性。

1 环境建模

1.1 地图建模

在 USV 的路径规划研究中,环境建模采用二维栅格地图,包含障碍物,地图边界,并以黑白二值化的形式区分可行驶区域以及障碍物区域。为了使地图环境更加贴近现实,海域实验仿真地图选取电子地图进行截取,并将其通过二值化转换黑白地图,黑色区域为障碍物的不可行驶区域,白色区域为海域可行驶区域^[3]。地图尺寸选取为 500×500 的大小,在局部路径规划中,假设海域环境中障碍物位置为已知。

1.2 障碍物碰撞检测

障碍物碰撞检测是指在某一时刻 USV 在某一点或区域内是否与障碍物发生碰撞或翻越边界。为了考虑障碍物不规则的特性以及船只的物理尺寸,设置了略大于船身的安全距离。将地图栅格化为一个二维矩阵

$map(col, row)$, row 和 col 分别为地图的行数和列数, 矩阵中障碍物位置为黑色 $map(y, x) = 0$, 可行驶区域为白色 $map(y, x) = 1$ 。

障碍物碰撞检测先以 USV 当前位置节点 $NearestNode(x, y)$ 为圆心, 以安全距离为半径做圆周, 在圆周上均匀采样 $n1$ 个检测点 $Node(xx, yy)$, 判断检测点坐标是否满足式 (1), 若不满足则判定当前节点越界。若检测点未越界则判断检测点是否满足式 (2), 若满足则判定碰撞障碍物。

$$\begin{cases} xx(i) > 0 \\ xx(i) \leq col \\ yy(i) > 0 \\ yy(i) \leq row \end{cases}, \quad i < n1 \quad (1)$$

$$map(yy(i), xx(i)) = 0, \quad i < n1 \quad (2)$$

式中: $xx(i)$ 和 $yy(i)$ 为以 (x, y) 为圆心, 安全距离为半径作圆周, 圆周上点的 x 轴和 y 轴坐标。

2 路径规划算法

CDAPFG-RRT 算法包括动态参数调节, 混合节点生成机制, 自适应多级步长, 路径优化模块, 算法流程如图 1 所示。扩展节点流程如图 2 所示。

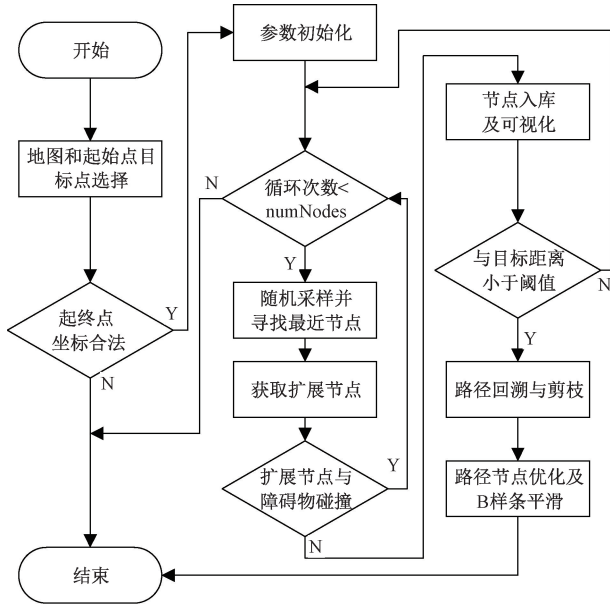


图 1 算法流程

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

2.1 环境感知自适应参数调节

针对水域环境中地图复杂度差异导致的路径规划问题, 本算法通过实时评估局部环境复杂度, 动态调整势场参数和节点生成权重, 实现参数自适应优化, 从而提升路径规划效率、减少震荡并降低碰撞风险。

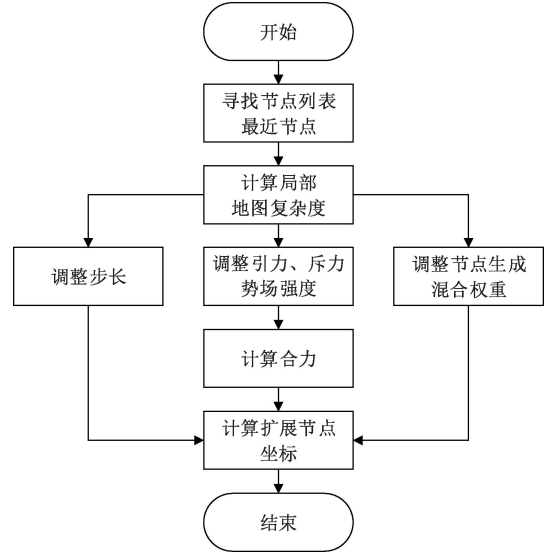


图 2 扩展节点流程

Fig. 2 Flow chart of the extended node

局部地图复杂度 $density$ 的计算采用圆形区域障碍物占比法, 以当前节点位置为圆心, 3 倍 USV 自身长度为半径, 计算当前区域内的障碍物与总面积的比值, 如式 (3) 所示。

$$density(p) = \frac{\sum_{q \in R(p, r)} obs(q)}{A_r} \quad (3)$$

式中: $density(p)$ 表示当前位置 $p = (x_c, y_c)$ 的局部地图复杂度; $R(p, r)$ 表示以当前位置 p 为圆心, 3 倍船长为半径的圆形区域 ($r = 3 \times USV_r$); A_r 表示此圆形区域内的总栅格数量; $obs(q)$ 为障碍物检测函数表示以 q 的坐标位置处障碍物取 1, 可行驶区域取 0。

根据局部地图复杂度的取值, 将势场系数 phi 和随机步长 $step$ 以及引力常数 F_{alt}^* 和斥力常数 F_{rep}^* 进行自适应改变, 如式 (4)、(5) 所示。根据当前局部地图复杂度动态调整新节点扩展的权重分配, 使开阔区域提高势场合力引导, 路径趋向直线化; 复杂环境增强随机探索能力, 增强突破局部极小能力, 动态权重 w 分配如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} phi = 20 - 10 \times \min\left(1, \max\left(0, \frac{density - 0.3}{0.4}\right)\right) \\ F_{alt}^* = F_{alt}^* \times (2 - density) \\ F_{rep}^* = F_{rep}^* \times (1 + density) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} step = 25, & 0 < density < 0.3 \\ step = 20, & 0.3 < density < 0.7 \\ step = 15, & 0.7 < density < 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$w = \max(0.1, \min(0.9, 0.6 \times (1 - density))) \quad (6)$$

2.2 地图边界和障碍物设置

本研究针对 USV 在港口巡检等任务中存在的越界和碰撞风险,提出了一种创新的复合斥力势场模型。该模型通过在地图边界设置高强度斥力场,结合基于局部环境复杂度动态调节的障碍物斥力机制,实现了边界防护与避障的协同优化。设计边界斥力形成梯度排斥场,使势场呈现边界、障碍核心区、过渡带和开阔水域的三级结构。如图 3 所示,该模型能在可行驶区域保持引力主导,在靠近危险区域时实现斥力的平滑过渡,有效提升了 USV 作业的安全性和可靠性。

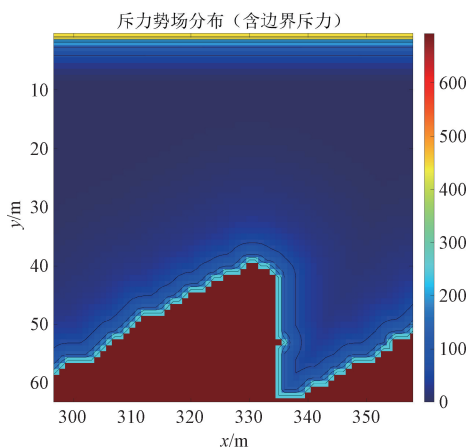


图 3 斥力势场分布

Fig. 3 Distribution of repulsive potential field

2.3 新节点生成策略

本研究提出的节点生成策略是一种动态混合机制,将随机方向探索与势场引导结合,通过局部地图复杂度动态调整二者混合权重以及新节点生成步长,实现环境自适应路径规划。

1) 随机采样方向

首先,以当前节点位置进行随机采样,若采样点不是障碍物则计算采样点与节点之间的随机方向角度 α ,若是障碍物则重新采样。随机方向角度 α 获取如式(7)所示。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_{rand} - y_{near}}{x_{rand} - x_{near}} \right) \quad (7)$$

式中: (x_{rand}, y_{rand}) 是随机分量的坐标; (x_{near}, y_{near}) 是最新节点的坐标。

2) 势场引导建模

势场的引导由引力势场和斥力势场组成,通过动态调节势场权重实现智能导航:近障碍物时斥力主导,减小步长确保避障;远离障碍物时引力主导,增大步长快速趋近目标,实现安全性与效率的平衡。引力函数和斥力函数分别如式(8)、(9)所示。

$$\vec{F}_{alt} = F_{alt}^* \times \frac{\vec{q}_{goal} - \vec{q}_{near}}{\|\vec{q}_{goal} - \vec{q}_{near}\|} \quad (8)$$

$$\vec{F}_{rep} = \begin{cases} F_{rep}^* \times \frac{\vec{d}_{min}}{\|\vec{d}\|} \times \frac{1}{1 + \exp\left(k \times \left(2 \times \frac{\|\vec{d}\|}{d_{rep}^*} - 1\right)\right)}, & \|\vec{d}\| \leq d_{rep}^* \\ 0, & \|\vec{d}\| > d_{rep}^* \end{cases} \quad (9)$$

式中: \vec{F}_{alt} 和 \vec{F}_{rep} 为引力和斥力; F_{alt}^* 和 F_{rep}^* 分别引力和斥力自适应系数; \vec{q}_{goal} 为目标点坐标 ($goal.x, goal.y$); \vec{q}_{near} 为当前节点坐标 ($near.x, near.y$); \vec{d}_{min} 为与当前节点最近的障碍物向量; $\|\vec{d}\|$ 为当前节点到障碍物的距离; k 为 sigmod 函数的陡度系数; d_{rep}^* 为斥力的影响半径,只有节点距离最近障碍物的距离小于斥力影响半径,才会受到斥力,否则斥力为 0。

3) 边界斥力势场建模

为使 USV 在临近边界区域的安全航行,本研究提出了基于距离感知的自适应边界斥力模型。该模型针对地图 4 条边界独立计算斥力,当 USV 与边界距离 d_i 小于边界斥力作用范围 d_b 时,产生由地图边界指向地图内部的斥力,并且此斥力将大于障碍物斥力,降低 USV 超出地图边界风险。边界斥力函数如式(10)所示。

$$\vec{F}_b = k_{F,b} \times \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_b} \right) \quad (10)$$

式中: $k_{F,b}$ 为边界斥力系数; \vec{F}_b 为边界斥力; d_i 为当前节点到边界的距离,斥力方向垂直于边界。

4) 混合节点生成策略

本研究提出一种基于动态混合的新节点生成策略,实现了随机探索与势场引导的协同优化。该策略通过环境感知自适应调节参数,提升路径规划在复杂水域的效率和安全性。节点生成由随机分量和合力势场共同控制,合力 \vec{F}_{total} 由障碍物斥力,目标点引力和边界斥力共同构成,合力构成如式(11)所示。

$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{alt} + \vec{F}_{rep} + \vec{F}_d \quad (11)$$

合力方向角 β 由合力 \vec{F}_{total} 在 x 轴的分量 $\vec{F}_{total,x}$ 与 y 轴分量 $\vec{F}_{total,y}$ 进行计算,如式(12)所示。

$$\beta = \text{atan2}(\vec{F}_{total,y}, \vec{F}_{total,x}) \quad (12)$$

新节点的拓展通过自适应的随机步长 $step$ 和势场系数 ϕ ,以随机采样方向 α 和势场合力方向 β 进行拓展,如式(13)所示。

$$\begin{cases} p_{new,x} = p_{near,x} + (1 - w) \times step \times \cos(\alpha) + \\ w \times \phi \times \cos(\beta) \\ p_{new,y} = p_{near,y} + (1 - w) \times step \times \sin(\alpha) + \\ w \times \phi \times \sin(\beta) \end{cases} \quad (13)$$

式中: p_{new_x} 和 p_{new_y} 为新节点的 x 和 y 轴坐标, p_{near_x} 和 p_{near_y} 为最近节点的坐标。

生成的新节点需要进行碰撞检测,以及坐标是否出界的判断,若两重判断均通过,则将此新节点加入节点队列并实现可视化,同时进行路径规划终止条件判断,检查此节点 p_{new} 与目标点 p_{goal} 之间的距离是否小于连接距离,若小于则判定路径规划完毕,进行路径回溯、剪枝和平滑处理得到最终路径。

3 仿真与实验结果分析

为了验证本研究算法的有效性与其可行性,通过 Matlab 进行仿真,对比双向快速扩展随机树 (rapidly-exploring random tree connect, RRT-Connect)^[20] 算法,目标偏置与多级步长的 DVSA-RRT^[13] 算法,以及 APF-RRT^[3] 算法,在不同复杂度地图上进行对比实验。仿真实验环境为:系统 windows11,处理器 Intel(R) Core(TM) i5-12400F,内存 32.00 GB,仿真软件为 Matlab R2024a。

3.1 实验设置

实验地图选择简单和复杂海域电子地图,均进行二值化处理,白色为可行驶区域,黑色为障碍物区域,对地图同一尺寸大小为 500 pixels×500 pixels。对 4 种算法分别进行累计 50 次测试。算法参数规定如表 1 所示。

| 表 1 参数设置 | | |
|----------------------------|----------|----------------|
| Table 1 Parameters setting | | |
| 参数 | 名称 | 值 |
| $\theta_{max}/(^{\circ})$ | 最大转角 | 120 |
| $step$ | 步长 | { 15, 20, 25 } |
| D_{safe}/m | 安全距离 | 30 |
| $radius/m$ | 目标接受距离 | 25 |
| k_{rep_bd} | 边界斥力系数 | 500 |
| $D_{boundary}$ | 边界斥力作用范围 | 10 |

3.2 不同算法海域电子地图仿真

如图 4 和表 2 所示,4 种算法在 map1 简单海图中进行仿真可知:本研究算法在较低地图复杂度的海域不仅能够以较短的路径到达目标点,且规划的路线为 USV 预留了足够的安全距离。对比其他 3 种方法在平均规划时间上分别提升了 40.6%、74.8% 和 29%。在相对路径长度和采样点数上,对 DVSA-RRT 和 APF-RRT 算法有着较为明显的提升,如图 5(a)、(b) 所示,CDAPFG-RRT 在采样点数上对比 APF-RRT 算法大幅减少,减少对未知区域探索,在采样点数上减少 56%,提高路径规划效率。在路径平滑度上,节点冗余量大幅减少,有效降低路径震荡。

本文规划路线对比 DVSA-RRT 算法,在规划时间和路径长度上均有提升,APF-RRT 算法虽有较好的效果,但其路径震荡较为严重。RRT-Connect 在时间上保持着较高水平,但其规划的路径在部分区域过于接近障碍物,对 USV 的任务执行造成严重危险问题,且未对新节点生成进行角度判断,降低路径规划效率。

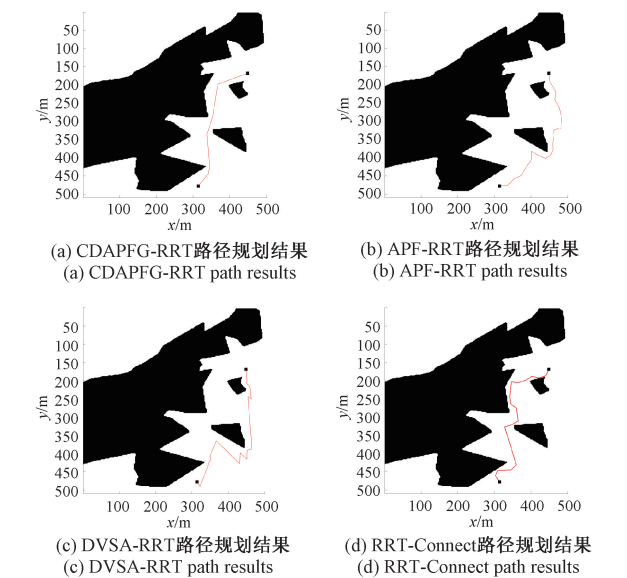


图 4 map1 仿真结果
Fig. 4 Simulation results of map1

| 表 2 低地图复杂度海域仿真结果 | | | |
|---|--------|--------|--------|
| Table 2 Simulation results of low map complexity sea area | | | |
| 算法名称 | 规划时间/s | 路径长度/m | 采样点数/个 |
| 本算法 | 0.477 | 379 | 78 |
| APF-RRT | 0.803 | 452 | 178 |
| DVSA-RRT | 1.894 | 568 | 328 |
| RRT-Connect | 0.572 | 473 | 42 |

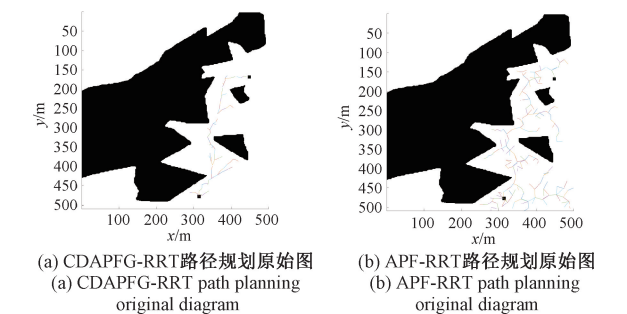


图 5 map1 仿真原始结果
Fig. 5 Simulation raw results of map1

在复杂度较高的海域中仿真结果如图 6 所示。从表 3 中可知,本研究算法在路径长度方面对 APF-RRT 和

DVSA-RRT 算法有着 10% 和 21.6% 的提升,但面对 RRT-Connect 时,路径长度数据上提升并不明显。但在实际中,本研究算法通过引入自适应势场函数和边界斥力以及动态权重的节点混合策略,在尽可能减少曲折的同时保留了足够的安全距离,降低了碰撞风险。APF-RRT 的势场合力驱使路径原理障碍物保证了安全空间,但仍面对路径曲折导致规划路径长度增加的问题;DVSA-RRT 算法随考虑安全距离问题,但其面对较为宽阔的区域时产生了较为剧烈的波动,难以执行任务;RRT-Connect 算法在规划时间上表现出色,但其未考虑安全问题,且部分转角过于夸张难以执行。在规划时间上,DVSA-RRT 算法仅在将目标点作为以一定概率作为采样点,在面对复杂环境时浪费了大量时间生成了过多的冗余节点;RRT-Connect 算法在时间上确实较本研究算法有着较大提升,但经过多次仿真实验,RRT-Connect 算法在较高复杂度地图上成功规划路径的成功率较其他 3 种算法略有降低,且规划的路径并没考虑 USV 动力学约束以及障碍物安全距离等问题。

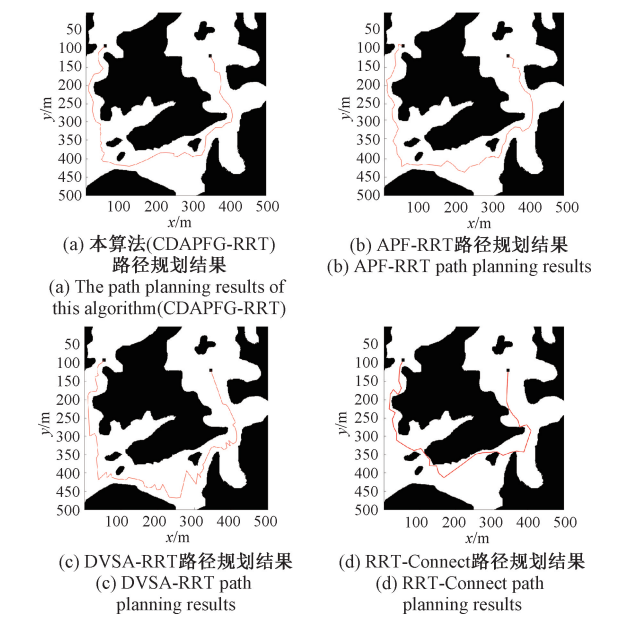


图 6 map2 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of map2

表 3 高地图复杂度海域仿真结果

| 算法名称 | 规划时间/s | 路径长度/m | 采样点数/个 |
|-------------|--------|--------|--------|
| 本算法 | 6.86 | 1 009 | 521 |
| APF-RRT | 11.11 | 1 121 | 904 |
| DVSA-RRT | 53.88 | 1 287 | 2 427 |
| RRT-Connect | 4.48 | 1 045 | 1 249 |

如图 7 为 4 种算法的性能对比图,此图为 4 种算法针对 map2 高地图复杂度海域 30 次成功路径规划所记录的数据。对比 4 种算法,DVSA-RRT 耗时,采样点数,路径长度上均表现不足,其在单纯依靠随机搜索与将目标点作为采样点的策略在复杂地图上规划较慢;RRT-Connect 在时间上表现最优,但其成功率与路径规划效果均表现不佳,难以满足无人船任务需求;APF-RRT 在时间,路径长度,采样点数上均表现优异,但仍面对路径曲折导致规划路径长度增加的问题;CDAPFG-RRT 在路径长度、采样点数、最大曲率上领先其他 3 种算法,满足无人船任务需求。综上所述,本研究算法有效提高了规划和采样效率的同时提高了船只任务执行时的安全性。

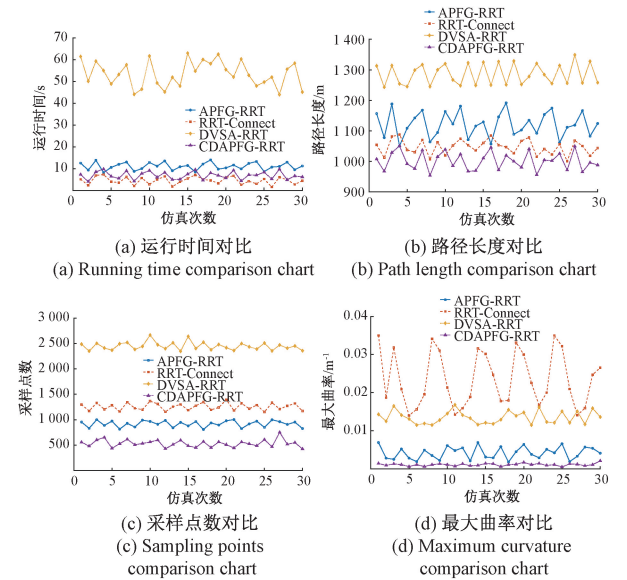


图 7 map2 算法性能比较

Fig. 7 Performance comparison of the map2 algorithm

3.3 路径优化分析

为验证路径优化的有效性及其稳定性,选取地图复杂度最高的 map2 进行 30 次仿真实验,仿真结果如图 8(a)、(b)所示。由仿真数据可知,原始路径规划剪枝图平均路径长度为:1 009.54 m,通过路径优化进行冗余节点去除以及拉伸后平均路径长度为:907.53 m,经过路径优化后路径曲率变化较小且曲率连续,最大曲率为 $1.354 \times 10^{-3}/\text{m}$,适合 USV 水上作业。经过 B 样条曲线优化后平均长度为:887.45 m,平均路径长度减少了 12.1%。

3.4 无人船路径规划平台验证分析

1) 无人船路径规划实验平台搭建

无人船采用 Pixhawk2.4.8 开源飞控作为主控,配备有 GPS 定位导航系统,搭配机载电脑树莓派 4B,可实现远距离图数回传等二次开发功能。船体转向控制方式为差速转向,由尾部左右 2 个大功率推进器进行驱动。最

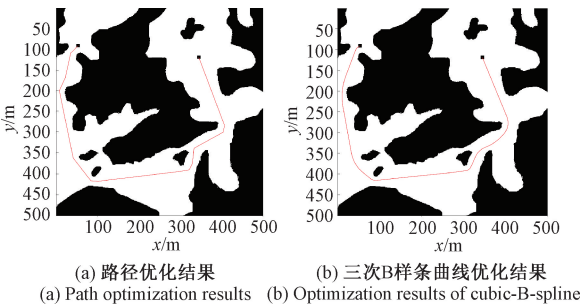


图 8 CDAPFG-RRT 路径优化结果
Fig. 8 CDAPFG-RRT path optimization results

大船速为 2.5 m/s。配备有单目摄像头,用于实时采集图像数据,配备图数传一体模块,将摄像头和飞控数据回传到地面电脑端。船体尺寸为 1 000 mm×450 mm×280 mm,船体重量为 8 kg,如图 9 所示。

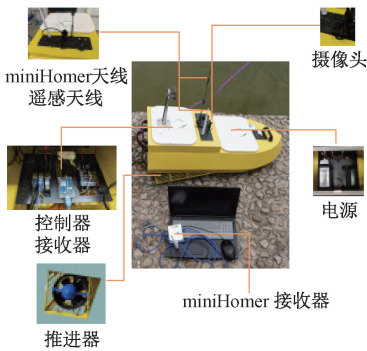


图 9 无人船系统
Fig. 9 Unmanned surface vehicle system

2) 无人船真实环境实验结果及分析

实验环境选择当地公园中小池塘作为实验场地,该池塘中有 3 块荷花作为障碍物,池塘轮廓具有蜿蜒岸线特征,根据卫星电子地图小池塘轮廓如图 10(a)所示。从电子地图中提取轮廓,同时根据池塘实际场景中的障碍物,如图 10(b)所示,手工绘制地图,制作二值化地图,在给定起始点和目标点后,进行实验,验证算法的全局路径规划能力以及路径的平滑度,CDAPFG-RRT 算法根据环境地图确定最优全局最优路径,结果如图 11 所示,CDAPFG-RRT 对比 DVSA-RRT 算法在路径长度上减少 12%,采样点数目减少 33%,路径相对平滑,大大减少冗余节点,提高规划效率,降低了路径震荡,与障碍物时刻保持安全距离,大大降低碰撞风险。图 12 为 USV 在此环境中从起始点到达目标点的全过程。无人船从池塘左侧起始点如图 12(a)所示,开始按照规定路线行驶,延途中需转弯避开岸边,避障过程如图 12(b)、(c)所示,图 12(d)、(e)可看出无人船延规划路径行驶与岸边保持安全距离,在靠近荷花区域时采用小步长避障,最后,无人船行驶到池塘右侧凹槽目标处,如图 12(f)所示。无人船完整行驶路径如图中虚线所示,无人船从起始位置

开始行驶,途中延岸边进行避障,并与岸边保持一定安全距离,如图 12(c)所示,之后因路径上无障碍物,按路径规划的直线行驶至目标点处。

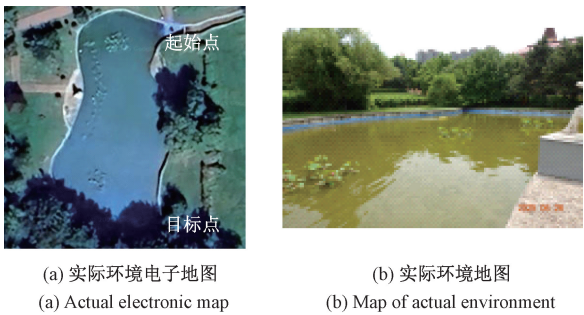


图 10 真实环境地图
Fig. 10 Real environment map

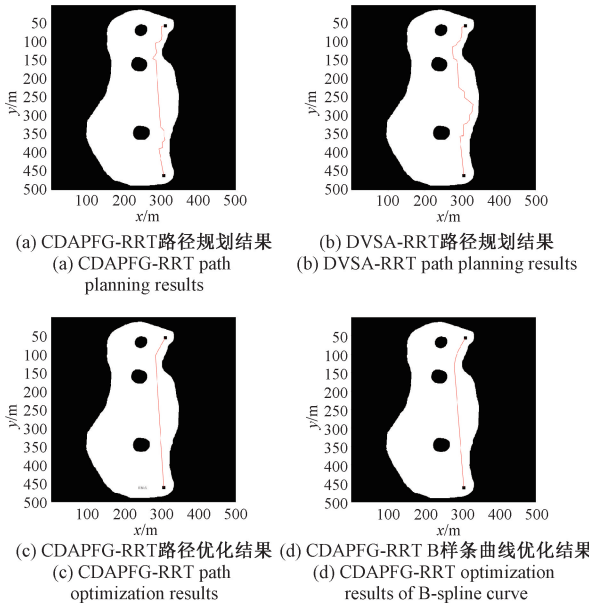


图 11 真实环境地图仿真结果
Fig. 11 Real environment map simulation results

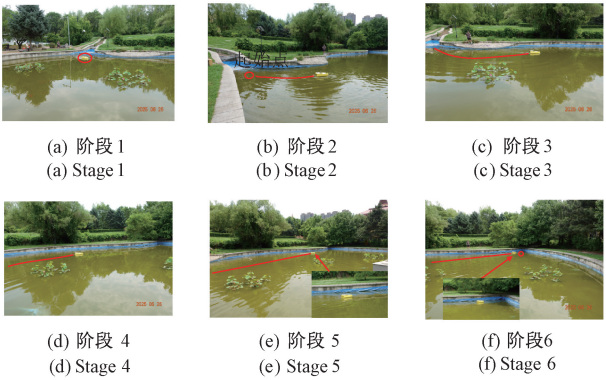


图 12 真实环境实验结果
Fig. 12 Real environment experimental results

4 结 论

针对传统路径规划效率低,路径震荡,碰撞风险高且未考虑地图复杂度等问题,本研究提出了一种基于局部地图复杂度动态势场引导的无人船路径规划算法,得出的结论为:

1) 通过引入路径节点局部地图复杂度动态调整障碍物斥力目标引力、自适应规划步长和新节点生成权重配比,有效提高了算法规划效率,抑制了路径震荡的发生,显著提高了路径规划的性能。

2) 引入地图边界斥力,保证船只在安全水域航行。同时运用基于安全距离的碰撞检测,使规划的路径始终与障碍物保持一定距离,降低碰撞风险。

3) 通过仿真和无人船实验可看出,CDAPFG-RRT 在平均规划时间,规划路径长度,采样点数上均优于其他 3 种算法。通过在实际环境中实验,充分验证了 CDAPFG-RRT 在实际水域中的有效性和优越性。

综上所述,CDAPFG-RRT 在复杂水域中效果提升更为明显,在简单水域中也有着较好的路径规划效果提升。CDAPFG-RRT 更适用于单无人船静态障碍物的场景,在日后研究中将结合动态障碍物与多船系统进行分析验证,进一步提高算法的适用性,在 USV 水面任务上开展更深入研究。

参考文献

- [1] 顾潮宏,冯友兵,仲伟波,等. 基于优化人工势场法的无人水面艇路径规划[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(5): 126-131.
GU CH H, FENG Y B, ZHONG W B, et al. Path planning of unmanned surface vehicles based on optimized artificial potential field method[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(5): 126-131.
- [2] ZHAO B G, ZHANG X K, LIANG C L, et al. An improved model predictive control for path-following of USV based on global course constraint and event-triggered mechanism[J]. IEEE Access, 2021, 9: 79725-79734.
- [3] DU B, YANG K D, ZHANG W D, et al. Terminal line-of-sight angle-constrained target tracking guidance for unmanned surface vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(9): 12515-12529.
- [4] 曲胜,许志远,张晓鹏,等. 基于改进 RRT 算法的无人船路径规划研究[J]. 中国航海, 2024, 47(4): 175-180.
QU SH, XU ZH Y, ZHANG X P, et al. Research on unmanned ship path planning based on improved RRT algorithm[J]. Navigation of China, 2024, 47(4): 175-180.

- [5] ZHOU W X, XU J Q. Research on unmanned ship path planning algorithm based on RRT* and artificial potential field method[C]. 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology, 2024: 194-199.
- [6] 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.
- [7] ZHAO S, LENG Y, ZHAO M J, et al. A novel dynamic lane-changing trajectory planning for autonomous vehicles based on improved APF and RRT algorithm[J]. International Journal of Automotive Technology, 2025, 26(2): 451-461.
- [8] 肖金壮,余雪乐,周刚,等. 一种面向室内 AGV 路径规划的改进蚁群算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 277-285.
XIAO J ZH, YU X L, ZHOU G, et al. An improved ant colony algorithm for indoor AGV path planning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 277-285.
- [9] ZHENG SH X, LUO L, XIAO Y Q. Global path planning for USV using A-Star algorithm with modified heuristic function[C]. 2024 IEEE 4th International Conference on Power, Electronics and Computer Applications, 2024: 147-151.
- [10] 孙岩霆,王荣杰,蒋德松. 融合 A* 与 DWA 算法的水面船艇动态路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 301-310.
SUN Y T, WANG R J, JIANG D S. Dynamic path planning of surface ship by combining A* and dynamic window algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 301-310.
- [11] 邓冬冬,许建民,孟寒,等. 基于蚁群算法与人工势场法融合的移动机器人路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 1-16.
DEND D D, XU J M, MENG H, et al. Mobile robot path planning based on the fusion of ant colony algorithm and artificial potential field method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 1-16.
- [12] SUN M X, XIAO X T, LUAN T T, et al. The path planning algorithm for UUV based on the fusion of grid obstacles of artificial potential field[J]. Ocean Engineering, 2024, 306: 118043.
- [13] 栾添添,王皓,孙明晓,等. 基于动态变采样区域 RRT 的无人车路径规划[J]. 控制与决策, 2023,

- 38(6): 1721-1729.
- LUAN T T, WANG H, SUN M X, et al. Path planning of unmanned vehicle based on dynamic variable sampling area RRT[J]. Control and Decision, 2023, 38(6): 1721-1729.
- [14] 张钰琪, 田存伟, 房世鹏. 基于 RRT* 算法的无人船路径规划研究[J]. 现代计算机, 2024, 30(22): 36-41, 48.
- ZHANG Y Q, TIAN C W, FANG SH P. Research on path planning of unmanned ships based on RRT* algorithm[J]. Modern Computer, 2024, 30(22): 36-41, 48.
- [15] WANG J K, MENG M Q H, KHATIB O. EB-RRT: Optimal motion planning for mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(4): 2063-2073.
- [16] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
- ZHU D Q, YAN M ZH. Survey on technology of mobile robot path planning[J]. Control and Decision, 2010, 25(7): 961-967.
- [17] 于豪, 崔奕山. 改进 IRRT* 算法的水面船艇多目标动态路径规划[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 17-27.
- YU H, CUI Y SH. Multi-objective dynamic path planning for surface vessels with improved IRRT* algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 17-27.
- [18] 郭俊锋, 袁俊平, 朱红霞. 基于改进 RRT 算法的双臂服务机器人运动规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 210-220.
- GUO J F, YUAN J P, ZHU H X. Research on motion planning of dual-arm service robot based on improved RRT algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 210-220.
- [19] 骆海涛, 孙嘉泽, 高鹏宇, 等. 基于改进 RRT* 算法的智能轮椅全局路径规划研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 303-313.

LUO H T, SUN J Z, GAO P Y, et al. Intelligent wheelchair global path planning research based on the improved RRT* algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 303-313.

- [20] KUFFNER J J, LAVALLE S M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning[C]. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000, 2: 995-1001.

作者简介



孙明晓, 2010 年、2018 年于哈尔滨工程大学分别获得工学学士学位、博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为机器视觉。

E-mail: sunmingxiao@hrbust.edu.cn

Sun Mingxiao received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Harbin Engineering University in 2010 and 2018, respectively. He is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. His main research direction is machine vision.



张允曦, 2023 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 现于哈尔滨理工大学攻读硕士研究生, 主要研究方向为无人船回收。

E-mail: 921991055@qq.com

Zhang Yunxi received his B.Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2023. He is currently pursuing his master's degree at Harbin University of Science and Technology. His main research interest is unmanned surface vehicle (USV) recovery.



栾添添(通信作者), 2011 年、2018 年于哈尔滨工程大学分别获得工学学士学位、博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为机器视觉。

E-mail: luantiantian@hrbust.edu.cn

Luan Tiantian (Corresponding author) received her B.Sc. and Ph.D. degrees both from Harbin Engineering University in 2011 and 2018, respectively. She is currently an associate professor at Harbin University of Science and Technology. Her main research interest includes machine vision.