

一种基于改进动态窗口法的无人艇路径规划方法

刘 钊^{1,2,3,4}, 罗辰汉^{1,2,3}, 陈 阳^{1,2,3}, 张明阳⁵

1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;
2. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 三亚科教创新园, 海南 三亚 572000;
5. 阿尔托大学 工程学院, 埃斯波 20110)

摘要:为提升无人艇路径规划在复杂海洋环境中的适用性,克服路径规划算法在动态环境中存在的运行效率低下问题,提出一种基于改进动态窗口法(DWA)的无人艇路径规划方法。首先,根据无人艇的初始位置和目标位置确定目标水域范围,将水域进行栅格化建模;其次,计算风、浪、流对无人艇产生的作用力,并结合无人艇质量将其转化为加速度,进而形成海洋环境影响下的无人艇运动学模型;接着,运用 Fossen 动力学模型,确定无人艇的线加速度和角加速度的最大值,从而得到无人艇的实际可达速度集合;最后,综合考虑航向、安全距离和速度要素,运用自适应权重调整算法改进 DWA,规划无人艇路径。以舟山群岛附近水域为试验环境,以无人艇“智鲲”号为试验船舶,进行仿真试验验证模型的可靠性。结果表明:相较于对比算法,所提出的算法在运行时间、仿真步长、船向的变化幅度、速度的变化幅度以及规划路径的长度等方面表现更优。改进 DWA 规划出的路径能更好地保障无人艇安全、快速地到达目的地,可为无人艇的自主航行性能提升和高效利用提供参考。

关键词:无人艇;动态窗口算法;路径规划;海洋环境

中图分类号:U675.96

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.011

A path planning method for unmanned surface vehicle based on improved dynamic window approach

LIU Zhao^{1,2,3,4}, LUO Chenhan^{1,2,3}, CHEN Yang^{1,2,3}, ZHANG Mingyang⁵

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China; 3. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; 4. Sanya Science and Education Innovation Park of Wuhan University of Technology, Sanya 572000, China;
5. School of Engineering, Aalto University, Espoo 20110, Finland)

Abstract: To improve the effectiveness of Unmanned Surface Vehicle (USV) path planning in complex marine environments, and to address the issue of low operational efficiency in dynamic environments, a new Dynamic Window Approach (DWA) for USV path planning has been developed. Firstly, the target water area range is determined based on the USV's initial and target positions, and the water area is modelled using a grid system. Secondly, the forces exerted on the USV by wind, waves and currents are calculated and combined with the USV's mass to produce an acceleration value, thereby forming a kinematic model of the USV under the influence of the marine environment. Thirdly, the maximum values

收稿日期:2024-05-30

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52171351)

作者简介:刘 钊(1986—),男,副教授,博士,研究方向为群船智慧挖掘与应用、无人艇风险计算与自主航行。E-mail: zhaoliu@whut.edu.cn

引用格式:刘钊,罗辰汉,陈阳,等.一种基于改进动态窗口法的无人艇路径规划方法[J].中国航海,2025,48(2):80-90.

LIU Z, LUO C H, CHEN Y, et al. A path planning method for unmanned surface vehicle based on improved dynamic window approach [J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 80-90. (in Chinese)

of linear and angular acceleration of the USV are determined using the Fossen ship dynamics model, thus obtaining the actual reachable speed set of the USV. Finally, an adaptive weight adjustment algorithm is used to improve DWA and plan the USV path, considering the heading, safe distance and speed factors. Simulation experiments were conducted in the waters near the Zhoushan Islands using the USV "Zhi Kun" to verify the reliability of the model. The results show that, compared with the comparative algorithm, the proposed algorithm performs better in terms of running time, simulation step size, change in bow direction amplitude, change in speed amplitude, and length of the planned path. The improved DWA-planned path ensures the USV can reach its destination safely and quickly, providing a reference for improving the autonomous navigation performance and efficient utilisation of USVs.

Key words: Unmanned Surface Vehicle; DWA algorithm; path planning; marine environment

无人艇(Unmanned Surface Vehicles, USV)是一种能够在水面自主执行任务的无人船艇,被广泛应用于海洋勘测、海上救援、港口保护等方面。然而,无人艇在海上航行过程中,往往会遇到各种复杂的自然环境和交通环境,如风、浪、流、礁石、船只等。因此,如何在复杂海洋环境中为无人艇规划出一条安全经济的路径,是保障无人艇高质量应用的重要基础^[1]。

无人艇路径规划是指根据无人艇的起点、目标点、性能参数和所处环境信息,寻找出一条满足某种优化准则的可行路径的过程。目前,常用的无人艇路径规划方法有基于图搜索的方法、基于势场的方法、基于采样的方法等^[2]。其中,基于图搜索的方法是将环境离散化为网格或拓扑图,利用 A* 算法、蚁群算法等在图中寻找最优路径^[3-4]。这些方法能够较好地适用于静态环境,但在动态环境中适用性较差。基于势场的方法是将环境中的碍航物和目标点分别赋予斥力和吸引力,根据力场方向导引无人艇运动^[5]。该方法适用于动态环境,但是有局部最优、目标不可达等问题^[6]。基于采样的方法是在无人艇可达空间中随机采样生成节点,运用快速扩展随机树(Rapidly-Exploring Random Trees, RRT)算法、概率路线图(Probabilistic Roadmap Method, PRM)算法等连接节点构建路径^[7]。该方法适用于高维空间和复杂环境,但需要大量的计算资源和存储空间,运行效率较低。

为提升无人艇路径规划在复杂海洋环境中的适用性,解决路径规划算法在动态环境中存在的运行效率低下的问题,提出一种改进动态窗口法(Dynamic Window Approach, DWA)的无人艇路径规划方法。该方法在环境栅格化的基础上考虑海洋环境影响,通过自适应权重调整算法改进 DWA,规划复杂环境中无人艇的航行路径,以期为无人艇的自主航行性能提升和高效利用提供参考。

1 研究方法

DWA 是一种基于预测控制理论的次优方法,适

用于局部路径规划。其核心思想是:首先,根据无人艇当前位置和速度状态,在速度空间中确定一个满足硬件约束的采样速度空间;然后,计算无人艇在这些速度时的轨迹,并通过评价函数对得到的轨迹进行评价;最终,选出最优轨迹所对应的速度作为无人艇的运动速度,循环执行直至无人艇到达目标点。DWA 能够在考虑无人艇动态特性的基础上,通过搜索无人艇在短时间内可能达到的速度和角速度,选择最佳的速度和角速度组合以达到规划路径的目的,具有能够有效避开碍航物、计算量小、反应迅速和可操作性强等优点,但也有容易陷入局部最优、在复杂或动态环境中可能失效的缺点^[8-9]。

一种基于改进动态窗口法的无人艇路径规划方法的流程图如图 1 所示。首先,通过水域栅格化方法对试验环境进行建模;其次,以无人艇运动学模型为基础,计算风、浪和流对无人艇的作用力,确定风、浪和流作用下的船舶加速度,建立风、浪和流综合作用下的无人艇运动模型;接着,引入 Fossen 动力学模型,确定无人艇设计速度集合,计算出无障碍情况下无人艇的可达速度集合;再根据无人艇航行过程中是否遭遇碍航物,确定加入的制动速度集合,生成模拟轨迹;最后,通过自适应调整算法实现航向、安全距离和速度权重的动态优化,确定最佳航行轨迹,结合制动速度集合使无人艇在目标点停止,实现无人艇的路径规划。

1.1 水域栅格化

进行无人艇路径规划,需建立目标水域的二维环境地图。环境建模方法主要有栅格法、几何信息法和视图法等^[10]。栅格法相对于几何信息法和视图法更为简单直接,不仅可以减少路径搜索时间,而且有利于编程实现,故选用栅格法对无人艇航行环境进行建模^[11]。

1) 栅格设置原则。栅格大小体现了特征地图环境建模的精细程度,直接影响无人艇路径规划的质量^[12]。综合考虑无人艇的特点和水域环境特征,将栅格的长度确定为 2 倍的无人艇艇长:

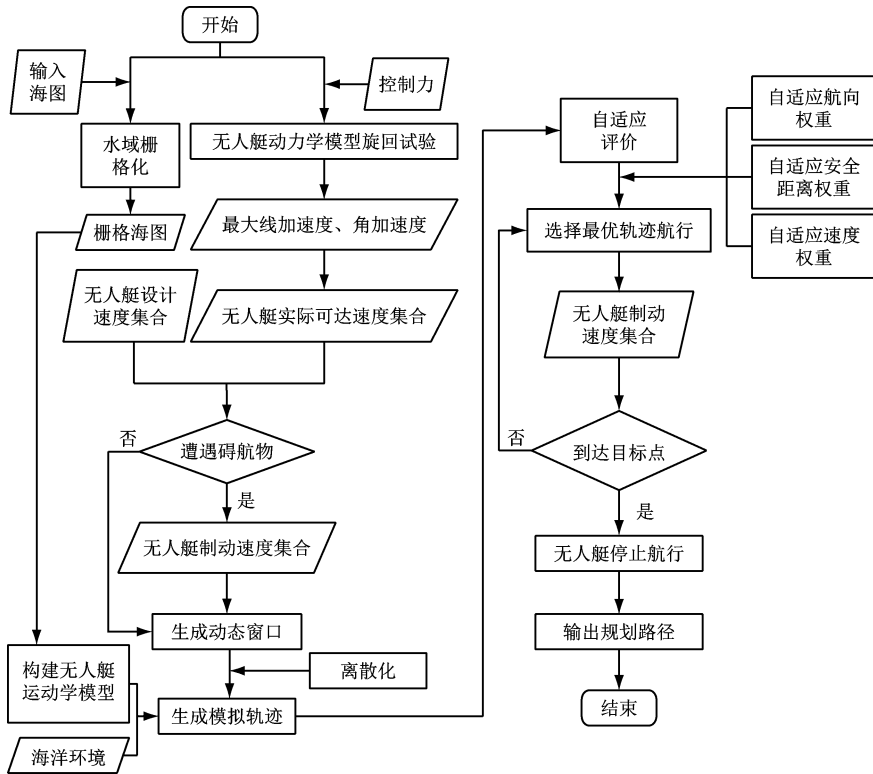


图1 算法流程

Fig. 1 Algorithm process

$$S = 2L \quad (1)$$

式中: S 为每个栅格的长度, m ; L 为无人艇艇长, m 。

2) 栅格编码。将海图划分为 $M \times N$ 个栅格构成的栅格地图, 从栅格地图左上角开始, 依次按从左到右、从上到下的顺序从 1 开始用数字为栅格编号, 便于分析地图信息^[13]。栅格坐标通过栅格编码标识, 栅格编码规则为

$$\begin{cases} X = \text{mod}(I, M) - 0.5 \\ Y = N + 0.5 - \text{ceil}\left(\frac{I}{N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为栅格地图的行数; N 为栅格地图的列数; I 为当前栅格序号; X 为每个栅格的横坐标; Y 为每个栅格的纵坐标。

3) 可航水域与不可航水域划分标准。根据无人艇航行的最小水深要求和海图水深情况, 可将栅格划分为可航栅格和不可航栅格, 分别用白色和黑色表示, 如图 2 所示。为保障规划路径的安全性和方便仿真实现, 若障碍物占据不到一个栅格, 则膨胀处理障碍物。障碍物膨胀处理后的可航水域和不可航水域如图 3 所示。

4) 无人艇在栅格环境中的运动规则。无人艇只能在白色栅格(可航水域)中移动, 不可以穿越或者出现在黑色栅格内。

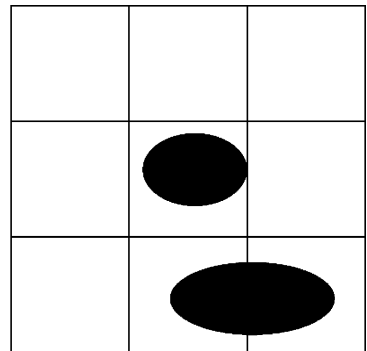


图2 实际障碍物

Fig. 2 Actual obstacles

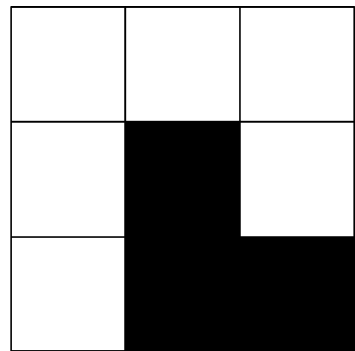


图3 假设膨胀后的障碍物

Fig. 3 Obstacles after assumed expansion

1.2 无人艇运动路径模拟轨迹生成

1.2.1 海洋环境对无人艇运动的影响

无人艇在航行过程中可以看作一个刚体运动,只进行前进和转向运动,其运动状态更新过程如图4所示。当相邻两个时刻之间的时间间隔足够短时,无人艇的运动过程可以通过线性运动近似描述为:

$$\mathbf{X}_b^{(t+1)} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} t_d \cdot \cos \varphi & 0 \\ t_d \cdot \sin \varphi & 0 \\ 0 & t_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}_t \quad (3)$$

式中: t 为当前时刻; $t+1$ 为下一时刻; $\mathbf{X}_b^{(t+1)}$ 为无人艇下一时刻的状态集合; x 为无人艇横坐标; y 为无人艇纵坐标; φ 为无人艇艏向角, $(^\circ)$; t_d 为时间间隔; s ; u 为无人艇的前进线速度, m/s ; r 为无人艇的艏摇角速度, rad/s 。

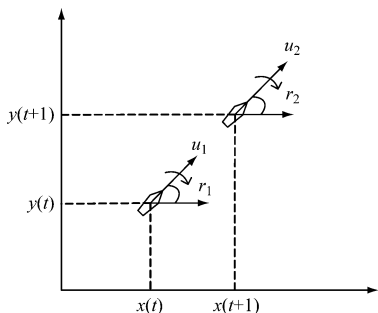


图4 无人艇运动状态更新

Fig. 4 USV movement status update

无人艇在航行过程中不可避免地会受到风、浪和流等海洋环境的影响。

1) 风的影响

在无人艇航行过程中,计算风对无人艇的影响会涉及无人艇水面以上的受风面积。主要包括无人艇受风的侧投影面积和正投影面积。风荷载在三自由度上的作用力为

$$\mathbf{F}_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho_1 V_{wi}^2 C_x A_f \\ \frac{1}{2} \rho_1 V_{wi}^2 C_y A_l \\ \frac{1}{2} \rho_1 V_{wi}^2 C_n A_l L \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{F}_w 为三自由度风力矩阵; ρ_1 为空气密度, kg/m^3 ; V_{wi} 为风速, m/s ; C_x, C_y, C_n 为风荷载系数; A_f 为无人艇正投影面积, m^2 ; A_l 为无人艇侧投影面积, m^2 。

风荷载系数的计算公式为

$$\begin{cases} C_x = -C_l \frac{A_l \cos \delta}{1 - \frac{\varepsilon}{2} \left(1 - \frac{C_l}{C_t}\right) A_f \sin^2 2\delta} \\ C_y = C_t \frac{\cos \delta}{1 - \frac{\varepsilon}{2} \left(1 - \frac{C_l}{C_t}\right) \sin^2 2\delta} \\ C_n = \left[\frac{S_1}{L} - 0.18 \left(\delta - \frac{\pi}{2}\right) \right] C_y \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_l 为横向阻力系数; C_t 为纵向阻力系数; ε 为横风作用力系数;三种系数的取值参见文献[14]; δ 为风与 x 轴的夹角, $(^\circ)$; S_1 为无人艇侧投影的形心与无人艇中心的距离, m 。

在计算风对无人艇的作用力后,结合无人艇自身的质量矩阵 \mathbf{M}_s ,加速度矩阵 \mathbf{A}_{wi} 的计算公式为

$$\mathbf{A}_{wi} = \frac{\mathbf{F}_w}{\mathbf{M}_s} \quad (6)$$

在时间间隔(dt)内,风对无人艇影响的运动学模型为:

$$\mathbf{X}_{wi}^{(t+1)} = \begin{bmatrix} t_d \cdot \cos \varphi & 0 \\ t_d \cdot \sin \varphi & 0 \\ 0 & t_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} \mathbf{A}_{wi} dt^2 \quad (7)$$

2) 浪的影响

在无人艇航行过程中,波浪的干扰力也是一个重要的考虑因素。计算波浪对无人艇影响时,需要考虑包括艏向与波浪的夹角、波高、波长及波频等多个参数。这些参数共同决定了波浪对无人艇航行的具体影响。采用Daidola的结论建立波浪荷载模型,具体表达式为

$$\boldsymbol{\tau}_{E,wa} = \frac{1}{2} \rho_s g L \zeta_D^2 \begin{bmatrix} \cos \chi C_{XD} \\ \sin \chi C_{YD} \\ L \sin \chi C_{ND} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ρ_s 为海水密度, kg/m^3 ; χ 为艏向与波浪的夹角, $(^\circ)$; g 为重力加速度, m/s^2 ; ζ_D 为波幅, m ; C_{XD}, C_{YD}, C_{ND} 为三向波浪荷载系数。

$$C_{XD} = 0.05 - 0.2 \frac{\lambda}{L} + 0.75 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 - 0.51 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \quad (9)$$

$$C_{YD} = 0.46 + 6.83 \frac{\lambda}{L} - 15.65 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 + 8.44 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \quad (10)$$

$$C_{ND} = -0.11 + 0.68 \frac{\lambda}{L} - 0.79 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^2 + 0.21 \left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (12)$$

式中: λ 为波长, m ; k 为波数, m^{-1} 。

$$\zeta_D = \frac{h}{2} \quad (13)$$

式中: h 为波高, m 。

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (14)$$

式中: k 为波数, m^{-1} ; ω 为波浪圆频率, rad/s 。

根据波浪对无人艇的作用力,结合无人艇自身的质量矩阵 M_s ,加速度矩阵 A_{wa} 的计算公式为

$$A_{wa} = \frac{\tau_{E,wa}}{M_s} \quad (15)$$

假设在时间间隔 dt 内,波浪对无人艇影响的运动学模型为

$$X_{wa}^{(t+1)} = \begin{bmatrix} t_d \cdot \cos \varphi & 0 \\ t_d \cdot \sin \varphi & 0 \\ 0 & t_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} A_{wa} t_d^2 \quad (16)$$

3) 流的影响

考虑水流对无人艇航行的影响,需要结合无人艇水面以下部分的投影面积进行计算。主要包括无人艇吃水线以下的横向投影面积及其表面积等因素。流荷载在三自由度上的作用力为

$$F_c = \begin{bmatrix} C_{xsc} \frac{\rho_s}{2} V_c^2 B' \\ C_{xmc} \frac{\rho_s}{2} V_c^2 B' \\ C_{ycc} \frac{\rho_s}{2} V_c^2 S_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: F_c 为三自由度水流矩阵; C_{xsc} 为水流力船艏横向分力系数,取 0.14; C_{xmc} 为水流力船艉横向分力系数,取 0.08; V_c 为水流速度, m/s ; B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积, m^2 ; C_{ycc} 为水流力纵向分力系数, $C_{ycc} = 0.046Re^{-0.134} + 0.009$; S_2 为无人艇吃水线以下的表面积, m^2 ;

根据海流对无人艇作用的力和力矩,结合船只自身的质量矩阵 M_s ,加速度矩阵 A_c 的计算公式为

$$A_c = \frac{F_c}{M_s} \quad (18)$$

假设在时间间隔 dt 内,海流对无人艇影响的运动学模型为

$$X_c^{(t+1)} = \begin{bmatrix} t_d \cdot \cos \varphi & 0 \\ t_d \cdot \sin \varphi & 0 \\ 0 & t_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ r \end{bmatrix}_t + \frac{1}{2} A_c t_d^2 \quad (19)$$

因此,风、浪、流对船体综合作用的运动学模型为

$$X^{(t+1)} = X_b^{(t+1)} + X_{wi}^{(t+1)} + X_{wa}^{(t+1)} + X_c^{(t+1)} \quad (20)$$

1.2.2 无人艇最大线加速度和最大角加速度的确定

为约束无人艇的操纵性,引入 Fossen 动力学模型^[15]:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\varphi)\mu \\ M\dot{\mu} = \tau - C(\mu)\mu - D(\mu)\mu \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\eta = [x, y, \varphi]^T$,为地球坐标系中船舶的位置和艏向角; $\mu = [u \sin \varphi, u \cos \varphi, r]^T$,为船体坐标系中船舶的纵荡速度、横荡速度和艏摇角速度; $R(\varphi)$ 为旋转变换矩阵; M 为系统惯性矩阵; C 为科里奥利向心力矩阵; D 为阻尼系数矩阵; τ 为伺服系统提供的控制力和力矩。

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}u \sin \varphi \\ 0 & 0 & m_{11}u \cos \varphi \\ m_{22}u \sin \varphi & m_{11}u \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\tau = [\tau_u \quad 0 \quad \tau_r]^T \quad (26)$$

式中: τ_u 为无人艇的纵向推进力, N ; τ_r 为转向力矩, $N \cdot m$; $m_{11} = M_s - X_u$, $m_{22} = M_s - Y_v$, $m_{33} = I_z - N_r$, $d_{11} = -X_u$, $d_{22} = -Y_v$, $d_{33} = -N_r$; M_s 为船舶质量, kg ; I_z 为转动惯量, $kg \cdot m^2$; X_u , Y_v , N_r 为水动力导数; X_u , Y_v , N_r 为水动力参数^[16]。

通过向 Fossen 动力学模型施加作用力,进行仿真旋回试验,确定无人艇操纵过程中的最大线加速度和最大角加速度,为可达速度集合的构建提供支持。

1.2.3 无人艇可达速度集合

无人艇在经过动力学模型的约束后,前进速度 u 和艏摇角速度 r 存在上限值,分别为 u_{max} 和 r_{max} ,则无人艇设计速度集合 V_s 为

$$V_s = \{ (u, r) \mid 0 \leq u \leq u_{max}, -r_{max} \leq r \leq r_{max} \} \quad (27)$$

结合无人艇最大线加速度 \dot{u}_{max} 、最大角加速度 \dot{r}_{max} 与当前采样时刻前进速度 u_{curr} 、艏摇角速度 r_{curr} ,

下一采样时刻无人艇的实际可达速度集合 V_d 为

$$V_d = \begin{cases} u_{\text{curr}} - \dot{u}_{\text{max}} \cdot t_d \leq u \leq u_{\text{curr}} + \dot{u}_{\text{max}} \cdot t_d \\ r_{\text{curr}} - \dot{r}_{\text{max}} \cdot t_d \leq r \leq r_{\text{curr}} + \dot{r}_{\text{max}} \cdot t_d \end{cases} \quad (28)$$

1.2.4 无人艇安全避障与制动约束

为避免无人艇在航行时因速度过快而与碍航物发生碰撞或驶过目标点,设置一个制动速度集约束无人艇,使其在遭遇碍航物或即将到达目标点时进行制动操作。

假定经过 p 个采样时段可令无人艇的前进速度降至 0。令无人艇与碍航物的距离小于制动距离,则制动距离 D_s 和制动速度集合 V_{SD} 的计算为:

$$\begin{cases} u_{t+1} = u_t - \dot{u}_{\text{max}} \cdot t_d \\ D_s = \sum_{i=1}^p (u_i \cdot t_d) \end{cases} \quad (29)$$

$$V_{SD} = \{(u, r) \mid D_t \leq D_s\} \quad (30)$$

式中: D_t 为 t 时刻无人艇与最近碍航物的距离, m。

则动态速度窗口 V_r 为 V_s, V_d 和 V_{SD} 的交集:

$$V_r = V_s \cap V_d \cap V_{SD} \quad (31)$$

式中: V_s 为无人艇设计速度集合; V_d 为下一采样时刻无人艇的实际可达速度集合; V_{SD} 为制动过程中的速度集合; V_r 为动态窗口内无人艇的速度。

1.2.5 生成模拟轨迹

根据上述三种集合关系生成动态窗口,如图 5a 所示。为减小 DWA 算法的时间和空间开销,将动态窗口中的速度离散化。将动态窗口中的速度集合根据前进速度间隔 d_u 和艏摇角速度间隔 d_r 离散为 m 个前进速度和 n 个艏摇角速度;离散后的每一组前进速度和艏摇角速度组成一个速度矢量 (u_i, r_i) ,则总共有 $m \times n$ 个速度矢量;结合时间间隔 dt ,总共生成 $m \times n$ 条模拟轨迹,如图 5b 所示。

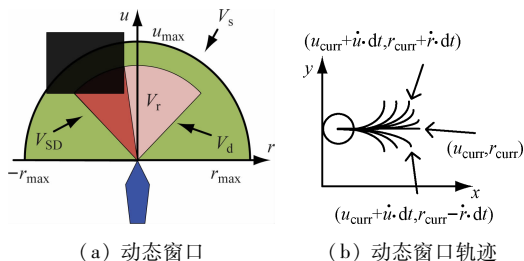


图 5 离散速度生成的轨迹图

Fig. 5 Trajectory map generated by discrete velocity

1.3 权重自适应的评价函数

参考有人驾驶船舶“早、大、宽、清”的避让原则和避让过程中以改变航向为主(舵让为主)、改变速度为辅(车让为辅)的习惯做法,结合无人艇的实际运动特性,设计权重自适应调整的评价函数,以确保规划路径的可行性。

1.3.1 评价函数构建

动态速度窗口中的最优速度为评价函数值最大时对应的速度值。兼顾无人艇航速、安全性以及艏向,设计总的评价函数,表达式为

$$G(u, r) = \alpha \cdot H(u, r) + \beta \cdot S(u, r) + \gamma \cdot V(u, r) \quad (32)$$

$$H(u, r) = 180^\circ - \varphi \quad (33)$$

$$S(u, r) = \begin{cases} d, & d < d_{\text{max}} \\ d_{\text{max}}, & d \geq d_{\text{max}} \end{cases} \quad (34)$$

$$V(u, r) = |v_r| \quad (35)$$

式中: $G(u, r)$ 为总的评价函数值; $H(u, r)$ 为无人艇艏向评价函数值,无人艇艏向完全指向目标区域位置时,该值达到最大; $S(u, r)$ 为无人艇安全距离评价函数值,模拟轨迹中无人艇与碍航物间的距离越大,该值就越大; $V(u, r)$ 为速度评价函数值,前进速度越大,该值就越大; α, β, γ 为权重值。

除此之外,评价函数中的值都应被归一化处理,这样可以避免其中某一项输出值过大而占有太大优势。归一化后的值分别用 $H_{\text{nomal}}(i), S_{\text{nomal}}(i), V_{\text{nomal}}(i)$ 表示。

$$H_{\text{nomal}}(i) = \frac{H(i)}{\sum_{i=1}^q H(i)} \quad (36)$$

$$S_{\text{nomal}}(i) = \frac{S(i)}{\sum_{i=1}^q S(i)} \quad (37)$$

$$V_{\text{nomal}}(i) = \frac{V(i)}{\sum_{i=1}^q V(i)} \quad (38)$$

式中: q 为模拟周期内采样的轨迹数(相当于 $m \times n$); $H(i), S(i), V(i)$ 分别为无人艇在运动至 i 时刻的艏向评价函数值、安全距离评价函数值、速度评价函数值。

1.3.2 自适应航向权重

根据船舶尺寸及水域环境特点,设定算法中船舶与碍航物的会遇距离阈值,表达式为

$$D_x = 2S \quad (39)$$

为提高无人艇航行的安全性,需对航向进行自适应权重设计。在航行过程中,可通过传感器来得知各个碍航物与本船的实际距离 D 。

当碍航物与本船的实际距离 D 小于等于 D_x 时,动态权重 α 随 D 的减小而逐渐增大,使无人艇在越靠近碍航物时航向的变化越大。航向的动态权重 α 可表示为

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{\text{min}} + \left| \frac{0.5\alpha_{\text{max}}\varphi}{360} \right| \left(\frac{D_x}{D} \right), & D \leq D_x \\ \alpha_{\text{max}}, & D > D_x \end{cases} \quad (40)$$

式中: α_{\min} 为设定的航向权重最小值, α_{\max} 为设定的航向权重最大值。

1.3.3 自适应安全距离权重

在远离碍航物时,无人艇需要有较强的搜索能力,靠近碍航物时需要较强的避障能力。在无人艇航行过程中可能会出现速度较快的动态碍航物,若不考虑安全距离权值的设定,则无人艇可能出现避让不及时从而与碍航物发生碰撞的现象。因此,自适应安全距离权重十分重要。距离 D_{all} 及自适应安全距离权重 β 可表示为

$$D_{\text{all}} = \sqrt{(x_s - x_e)^2 + (y_s - y_e)^2} \quad (41)$$

$$\beta = \begin{cases} \beta_{\max}, & D \leq D_x \\ u_i \frac{D_{\text{all}}}{D}, & D > D_x \end{cases} \quad (42)$$

式中: D_{all} 为起点到目标点的距离,m; (x_s, y_s) 为起点坐标; (x_e, y_e) 为终点坐标。 β 与线速度成正比,与碍航物和无人艇的实际距离 D 成反比;即当无人艇速度越快,越靠近碍航物时, β 越大,避障能力越强,越能避免发生碰撞。

1.3.4 自适应速度权重

为体现无人艇航行过程中对速度变化的重视程度,设定自适应速度权重。当碍航物与无人艇之间的距离 D 大于等于距离阈值 D_x 时,速度项的权重始终选取所定义的最大值 γ_{\max} ;当无人艇与碍航物之间的距离小于 D_x 时,速度权重会随 D 的减小而逐渐变小。所设定的速度动态权重可表示为

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_{\min} + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) \left(\frac{D}{D_x} \right), & D \leq D_x \\ \gamma_{\max}, & D > D_x \end{cases} \quad (43)$$

式中: γ_{\min} 为设定的速度权重的最小值; γ_{\max} 为设定的速度权重的最大值。

2 模型验证

2.1 试验水域及无人艇

选取舟山群岛附近水域作为试验水域,以“智鯤”号为试验无人艇。从点灯山(A点)出发,经过中部小蚂蚁岛,前往韭菜岙(E点)开展资源运输服务。试验水域如图6所示,边界点坐标见表1。

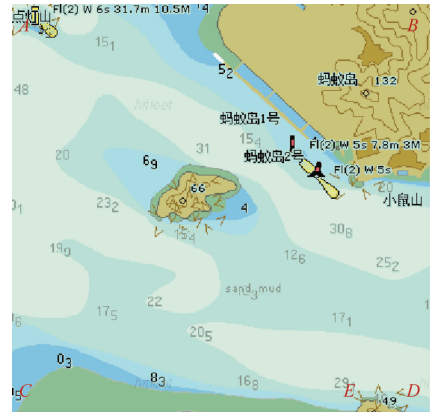


图6 试验水域

Fig.6 Experimental waters

表1 试验水域范围经纬度坐标

Tab.1 Latitude and longitude coordinates of experimental waters

坐标点	纬度/(°)	经度/(°)
A	29.875 8N	122.230E
B	29.875 8N	122.258E
C	29.848 8N	122.230E
D	29.848 8N	122.258E

无人艇和直航船的信息见表2。

表2 无人艇和直航船信息

Tab.2 USV and stand-on vessel information

名称	船长/m	船宽/m	吃水/m	最大航速/kn	质量/t
“智鯤”号	20	5.5	0.9	15	31.4
直航船	40	8.5	3.0	12	255.4

为验证所建立无人艇动力学模型的准确性,结合“智鯤”号相关信息做旋回圈仿真试验,试验所需水动力参数及导数如表3所示,旋回圈结果如图7所示。

为能直观展示海上风、浪、流环境对无人艇造成的影响,在栅格地图中增加环境合加速度方向的显示,如图8、图9所示。

表3 无人艇水动力参数及导数

Tab.3 Hydrodynamic parameters and derivatives of USV

X_u	\dot{X}_u	Y_v	\dot{Y}_v	N_r	\dot{N}_r
2 811.71	1 654.92	17 726.00	29 473.44	1 004 539.54	683 454.32

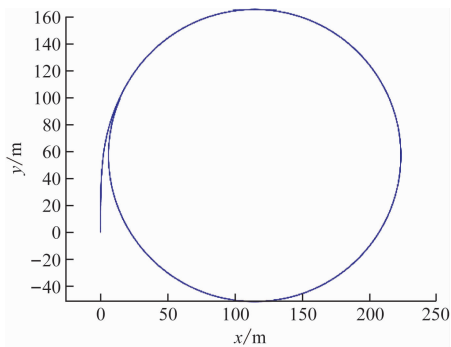


图7 “智鲲”号巡回试验图

Fig. 7 Experimental diagram of the Zhikun cycle

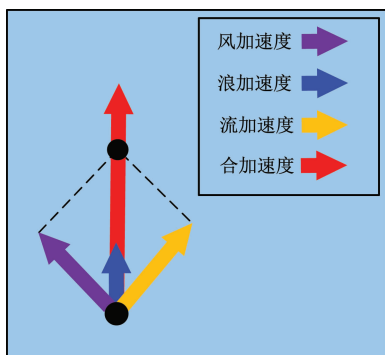


图8 风、浪、流合加速度构成

Fig. 8 Composition of wind, wave, and current combined forces

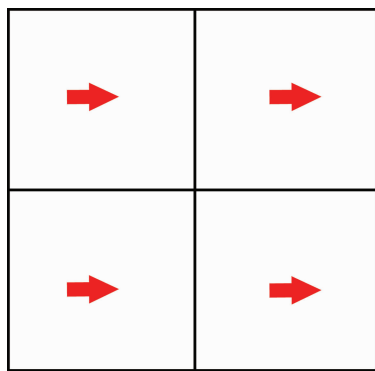


图9 合加速度在栅格中的显示

Fig. 9 Display of resultant force in grid

设置当前水域的环境信息如表4所示。

表4 环境信息

Tab. 4 Environmental information

物理量	数值
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	4
流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1
风向/($^{\circ}$)	90
浪向/($^{\circ}$)	270
流向/($^{\circ}$)	180
波高/m	1
特征周期/s	3
海况所属等级/级	3

根据环境信息中的数据,参照《海况等级划分表》将当前试验环境划分为3级海况,具体表现为:波浪不大,但很触目,波峰破裂;其中有些地方形成白色浪花。

2.2 试验水域栅格化

首先,根据试验水域环境和无人艇吃水,二值化处理试验水域,将不可航水域用黑色表示,可航水域用白色表示,如图10所示。接着,设定栅格大小为两倍艇长40 m,则试验水域被划分为 20×20 的栅格地图;然后,膨胀处理栅格地图中的碍航物,得到最终的水域栅格化建模结果,如图11所示;最后,编码水域环境栅格,从上到下、从左到右依次编号为 $1, 2, \dots, 400$ 。

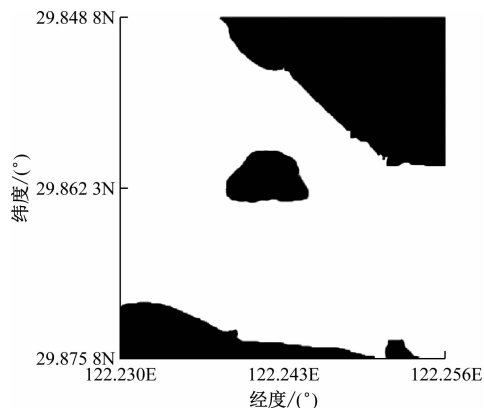


图10 经二值化处理后的试验水域

Fig. 10 Experimental waters after binarization treatment

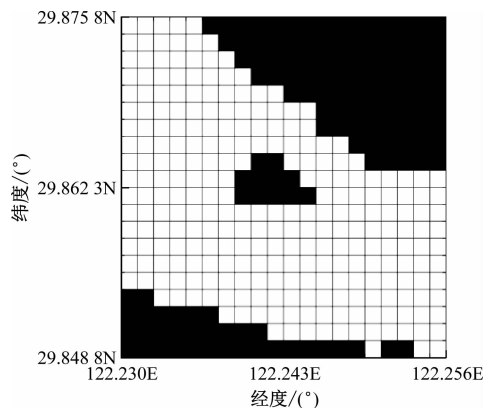


图11 栅格地图

Fig. 11 Grid map

2.3 仿真对比试验

选取无人艇从左上角栅格代表的点灯山出发,途中绕过蚂蚁岛并主动避让一艘直航船,最终到达靠近右下角栅格代表的韭菜岙(见图12)。

为验证提出算法的可靠性,选取传统DWA算法和文献[17]算法进行对比试验。其中,文献[17]算法考虑了自适应航向和速度评价权重,在运行时间上的效果优于传统DWA算法,具有较好的代表

性。在相同的海况下,将传统 DWA 算法、文献[17]算法以及本文设计算法分别称为算法 I、算法 II 和算法 III,采用这 3 种仿真试验所得到的无人艇避障路径及速度变化如图 12 所示。应用算法 I、算法 II

和算法 III 所得无人艇仿真航行轨迹分别如图 12a、图 12b 和图 12c 中 A 曲线所示,速度变化分别如图 12d、图 12e 和图 12f 所示。图中可航水域的白色栅格中的箭头代表环境影响合力方向。

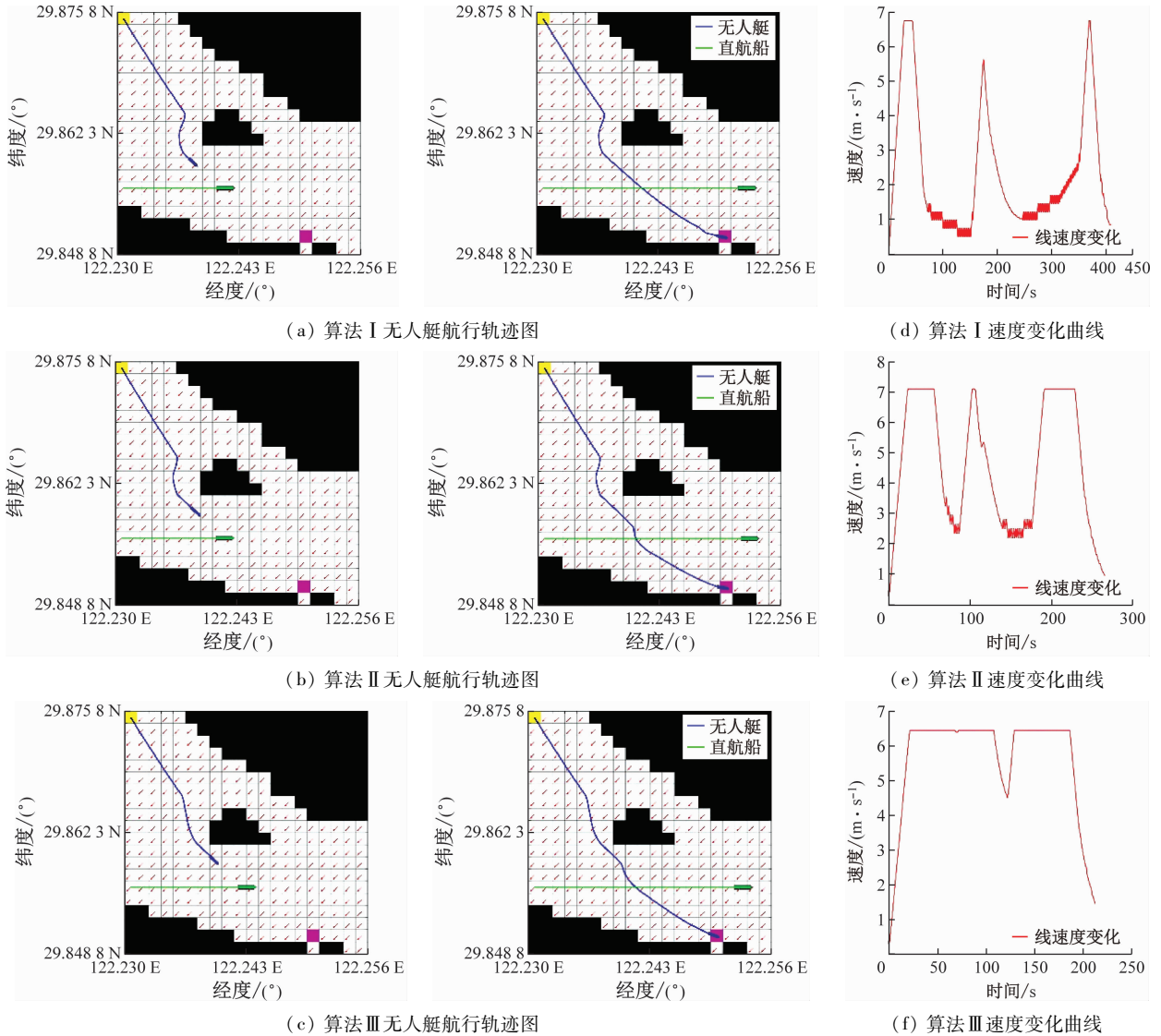


图 12 三种算法所得仿真结果

Fig. 12 Simulation results of three algorithms

由图 12b 可知,无人艇在应用算法 II 中航行,虽然可以避开碍航物,但会出现路径平滑性不足、避障轨迹安全性不足等问题;结合图 12a、图 12d、图 12b、图 12e 可以看出,当应用算法 I 和 II 的无人艇与蚂蚁岛和另一艘直航船遭遇时,航行速度会产生跳跃,使得无人艇在短时间内无限逼近停船,这将导致无人艇周围的水动力发生变化,极大地损害船舶内部机械,降低船舶使用寿命。而应用算法 III 的无人艇虽然在转向时航行速度会发生变化,但是其幅度较小,主要原因在于算法中的三种评价权重的自适应,使无人艇能尽早搜索到碍航物并提前采取小幅度转向措施从而避免危险的发生,这也是应用算

法 III 在航行速度方面的表现优于另外两种算法的主要原因。

应用 3 种算法的无人艇在航行过程中所花费的步长及时间如表 5 所示。

表 5 三种算法在仿真运行时的步长及耗时对比

Tab. 5 Comparison of step size and time consumption of three algorithms during simulation run

算法	运行时间/s	仿真步长/步	路径长度/m
算法 I	32.283	414	985.28
算法 II	18.420	283	988.48
算法 III	14.194	212	955.60

由表 5 中数据可知:相比算法 I,应用算法 III 的仿真航行在运行时间、仿真步长、路径长度上分别降低了约 56.03%、48.79%、3.01%;相比算法 II,应用算法 III 的仿真航行在运行时间、仿真步长、路径长度上分别降低了约 22.94%、25.09%、3.33%。根据试验参数,应用算法 III 可以使船舶使用更少的操作指令和更快的运行时间到达目的地,完成航行目标。

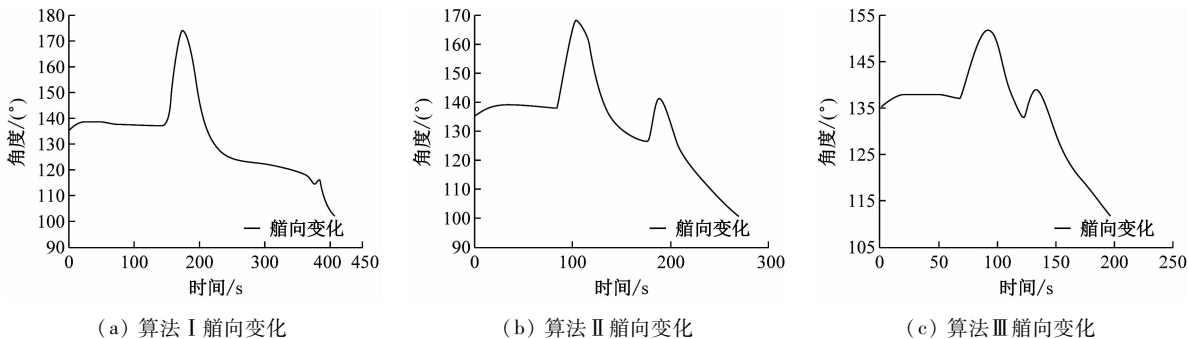


图 13 三种算法的无人艇艏向变化

Fig. 13 Three algorithms for heading changes of USV

表 6 应用三种算法的仿真航行艏向两次避让的变化幅度对比

Tab. 6 Comparison of the changes in the heading direction of a simulated navigation ship after two avoidance using three algorithms

算法	变化幅度 $\theta_1 \left(\frac{\Delta\varphi_1}{\Delta t_1} \right)$	变化幅度 $\theta_2 \left(\frac{\Delta\varphi_2}{\Delta t_2} \right)$
算法 I	0.569 2	0.166 7
算法 II	0.614 3	0.496 7
算法 III	0.323 9	0.260 9

由表 6 可知,无人艇在算法 III 中的艏向相比算法 I、II 在平均变化幅度上分别改善了 20.53% 和 47.37%。在三种算法中,应用算法 III 中的路径平滑度最高。

3 结束语

针对无人艇在复杂海洋环境应用中的安全航行问题,根据水域环境特点和无人艇特征,考虑风、浪、流环境因素的影响,提出一种基于改进动态窗口法的无人艇路径规划方法。在构建水域栅格环境时,考虑了水深条件,根据无人艇的尺寸设定了合理大小的栅格;准确地反映水域环境的真实情况;提高路径规划的可行性。在改进 DWA 算法中,不但加入了风、浪、流环境模型干扰,还引入了速度评价权重、航向评价权重和安全距离权重三个自适应参数,并

为进一步对比无人艇在应用算法中的轨迹平滑性,选取艏向的变化幅度作为评判指标。由于同一路径上艏向变化幅度不同,无人艇形成的轨迹就不同,形成的无人艇路径平滑度也不同,因此艏向的变化幅度越小,无人艇的路径平滑度越高。应用三种算法的仿真航行艏向变化幅度如图 13 所示,具体数值如表 6 所示。

且考虑了无人艇的操纵性约束,使无人艇既能在避碰过程中快速调整自身的速度和航向,又能保证安全航行。试验结果表明:本文算法在运行时间、仿真步长、艏向的变化幅度、速度的变化幅度以及规划路径的长度等方面均具有较好的性能,可为海上无人艇避碰应用效能的提升提供支持。由于无人艇长时间航行时海洋环境是动态变化的,后续研究可进一步考虑海洋环境影响的时空特性、航行时动态海洋环境对船体产生的阻力变化以及三维航行环境的构建,以此提升算法的实用效果。

参 考 文 献

- [1] 陈海申. 虚拟现实技术下船舶航行环境视景三维仿真[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(13): 146-149.
CHEN H S. Three-dimensional visual simulation of ship navigation environment based on virtual reality technology[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(13): 146-149. (in Chinese)
- [2] 张树凯, 刘正江, 蔡垚, 等. 无人船艇航线自动生成研究现状及展望[J]. 中国航海, 2019, 42(3): 6-11.
ZHANG S K, LIU Z J, CAI Y, et al. Review on automatic routing technologies for unmanned vehicles [J]. Navigation of China, 2019, 42(3): 6-11. (in Chinese)
- [3] WANG X Y, GAO Y Q, ZHOU J J, et al. Mini-review of unmanned vehicle route planning based on ant colony algorithm [J]. Automation and Machine Learning, 2023, 4(2): 42-46.

- [4] 周兵,黄治坤,柴天,等. 基于图搜索与数值优化方法的分层轨迹规划方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(12):1-10.
ZHOU B, HUANG Z K, CHAI T, et al. Hierarchical trajectory planning method based on graph search and optimization method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022,49(12): 1-10. (in Chinese)
- [5] WANG S B, LIN F, WANG T C, et al. Autonomous vehicle path planning based on driver characteristics identification and improved artificial potential field [J] Actuators,2022,11:52.
- [6] 张铮,薛波,柯子鹏,等. 改进人工势场算法的路径规划[J]. 西安理工大学学报,2024,40(1):27-35.
ZHANG Z, XUE B, KE Z P, et al. Path planning based on improved artificial potential field method [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2024,40(1):27-35. (in Chinese)
- [7] 樊玉琦,王铮,杨洋,等. 快速构建 BIT * 搜索树的机器人路径规划[J]. 网络安全技术与应用,2023(10):38-41.
FAN Y Q, WANG Z, YANG Y, et al. Robot path planning for quickly constructing BIT * search trees [J]. Network Security Technology & Application, 2023(10): 38-41. (in Chinese)
- [8] 张金泽,赵红,王宁,等. 密集碍航物下无人艇模糊双窗口 DWA 避障算法 [J]. 中国舰船研究,2021,16(6):10-18.
ZHANG J Z, ZHAO H, WANG N, et al. Fuzzy dual window DWA algorithm for USV in dense obstacle conditions [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021,16(6): 10-18. (in Chinese)
- [9] 王征,杨洋,周帅,等. 基于 A* -动态窗口法的无人船动态路径规划算法 [J]. 海军工程大学学报,2024,36(2):13-18.
WANG Z, YANG Y, ZHOU S, et al. Dynamic path planning algorithm of unmanned ship based on A* -dynamic window approach [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2024,36(2): 13-18. (in Chinese)
- [10] 王鸿东,易宏,向金林,等. 基于海事规则的中型无人艇避碰路径规划算法研究及应用 [J]. 中国舰船研究,2022,17(5):184-195.
WANG H D, YI H, XIANG J L, et al. Collision avoidance path planning algorithm research and application of medium-sized USV based on COLREGS [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022,17(5): 184-195. (in Chinese)
- [11] 舒伟楠,赵建森,谢宗轩,等. 基于改进 A* 算法的水面无人艇路径规划 [J]. 上海海事大学学报,2022,43(2):1-6.
SHU W N, ZHAO J S, XIE Z X, et al. Path planning for unmanned surface vessels based on improved A* algorithm [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2022,43(2): 1-6. (in Chinese)
- [12] 范云生,赵永生,石林龙,等. 基于电子海图栅格化的无人水面艇全局路径规划 [J]. 中国航海,2017,40(1):47-52.
FAN Y S, ZHAO Y S, SHI L L, et al. Global path planning for unmanned surface vehicle based on grid model of electronic chart [J]. Navigation of China, 2017,40(1): 47-52. (in Chinese)
- [13] 刘钊,罗辰汉,张明阳. 多碍航物水域救援船路径规划方法 [J]. 中国安全科学学报,2023,33(7):90-97.
LIU Z, LUO C H, ZHANG M Y. Path planning method of rescue ships in waters with multiple obstacles [J]. China Safety Science Journal, 2023,33(7): 90-97. (in Chinese)
- [14] 江伟,张露露,潘滢. 作用于船舶上风荷载及参数的理论计算 [J]. 水运工程,2019(9):20-26.
JIANG W, ZHANG L L, PAN Y. Theoretical calculation of wind load and parameter acting on ship [J]. Port & Waterway Engineering, 2019(9): 20-26. (in Chinese)
- [15] SKJETNE R, SMOGELI Ø, FOSSEN T I. Modeling, identification, and adaptive maneuvering of cybership II: a complete design with experiments [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2004, 37(10): 203-208.
- [16] 班勃. 水面船舶动力定位模型的若干关键问题研究 [D]. 广州:广东工业大学,2017.
BAN B. Research on several key problems of dynamic positioning model of surface ship [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 李光泽,俞万能,廖卫强,等. 基于动态窗口法的近海水域船舶避障算法研究 [J]. 中国舰船研究,2024,19(1):230-237.
LI G Z, YU W N, LIAO W Q, et al. Research on obstacle avoidance algorithm for ships in complex waters based on dynamic window approach [J]. Chinese Journal of Ship Research,2024,19(1):230-237.