



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

考虑无人艇运动学约束的IRRT^{*}-APF路径规划算法

刘意, 齐洁

引用本文

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 Yi, QI Jie. IRRT^{*}-APF Path Planning Algorithm Considering Kinematic Constraints of Unmanned Surface Vehicle [J]. Computer Science, 2024, 51(9): 290-298.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于相似一致性的模型自蒸馏方法](#)

Similarity and Consistency by Self-distillation Method

计算机科学, 2023, 50(11): 259-268. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221000009>

[基于RRT的无人机动态航路规划算法](#)

UAV Dynamic Route Planning Algorithm Based on RRT

计算机科学, 2023, 50(6A): 220700127-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220700127>

[基于改进势场法的机器人路径规划](#)

Robot Path Planning Based on Improved Potential Field Method

计算机科学, 2022, 49(7): 196-203. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210500020>

[基于邻域一致性的异常检测序列集成方法](#)

Locality and Consistency Based Sequential Ensemble Method for Outlier Detection

计算机科学, 2022, 49(1): 146-152. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.201000156>

[基于人工势场法的多机器人协同避障](#)

Multi-robot Collaborative Obstacle Avoidance Based on Artificial Potential Field Method

计算机科学, 2020, 47(11): 220-225. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190900026>

考虑无人艇运动学约束的 IRRT* -APF 路径规划算法

刘意¹ 齐洁^{1,2}

1 东华大学信息科学与技术学院 上海 201620

2 东华大学数字化纺织服装技术教育部工程研究中心 上海 201620

(oppoa100163@163.com)

摘要 针对未知环境下无人艇(USV)的路径规划问题,提出了一种考虑无人艇运动学约束的改进 RRT* -APF 路径规划算法(IRRT* - APF)。通过引入改进的人工势场法(APF)提高了快速搜索随机树(RRT*)的避障性能,在人工势场中考虑无人艇与障碍物和目标点间的角度大小,加速了无人艇远离障碍物并接近目标点;使用曼哈顿距离法提高了 RRT* 算法的效率。所提出的 IRRT* -APF 方法,与滚动 RRT* 算法和 PSOFS 算法进行了仿真对比实验。结果表明,提出的方法所规划的路径转折的次数和转角均显著减小,有利于实现无人艇的平稳控制,同时缩短了路径长度和规划路径的时间。在风浪环境下的进一步仿真实验结果表明,所提出的算法在有风浪干扰时依然能规划出符合无人艇运动学的轨迹,具有较强的抗风浪鲁棒性。

关键词: 无人艇;快速扩展随机树;人工势场法;局部路径规划;滚动窗口

中图分类号 TP391.9

IRRT* -APF Path Planning Algorithm Considering Kinematic Constraints of Unmanned Surface Vehicle

LIU Yi¹ and QI Jie^{1,2}

1 College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China

2 Engineering Research Center of Digitized Textile and Fashion Technology Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract Aiming at the path planning problem of unmanned surface vehicle(USV) in unknown environment, an improved rapidly-exploring random tree artificial potential field path planning algorithm(IRRT* - APF) considering the kinematics constraints of USV is proposed. The improved artificial potential field(APF) method is introduced to improve the obstacle avoidance performance of the rapidly-exploring random tree(RRT*). The use of the taxicab geometry method greatly improves the efficiency of the RRT* algorithm. The proposed IRRT* - APF method is compared with the rolling RRT* algorithm and PSOFS algorithm in simulation experiments, and the results show that the number of turns and corners planned by the proposed method are significantly reduced, which is conducive to the smooth control of the USV. At the same time, it reduces the time for planning the path. Further simulation experiments in the wind and waves interference environment are carried out, and the results show that the proposed algorithm can still plan the trajectory consistent with the kinematics constraints of USV even in the case of wind and waves interference, which shows strong robustness against wind and waves.

Keywords Unmanned surface vehicle, Rapid-exploration random tree, Artificial potential field, Local path planning, Rolling window

1 引言

无人艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)是一种不依靠人力,能够长时间滞留在目标海域并能够代替人执行危险任务或去往大型船舶难以到达的危险海的自动化舰艇。无人艇能够完成海洋生物和水文监测、海岸巡逻以及一些军事任务等,对海洋开发具有重大意义。随着科技及经济的发展,无人艇越来越受到各个国家的重视。

随着无人智能体和环境建模技术的发展,以及针对不同状况的地图研究的不断深入,同时基于对无人智能体在复杂环境下依然能够准确地到达目标位置的要求,路径规划算法也越来越被重视并成为无人智能体的主要研究方向之一。路径规划有多种方式,可总结为以下几种:基于图搜索算法、基于采样算法、基于势场算法以及智能优化算法等。

1)基于图搜索算法;主要有 A* 算法、Dijkstra 算法及其衍生算法。为了提高 A* 算法的效率, Du 等提出改进 Dijk-

到稿日期:2023-09-04 返修日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62173084)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62173084).

通信作者:齐洁(jieqi@dhu.edu.cn)

stra 算法^[1], Li 等提出双向 A* 算法(Bidirectional A*)^[2], Zhang 等改进 A* 算法^[3], Tong 等提出多方向 A* 算法^[4], Koenig 等提出了 D* lite 算法^[5], Yu 等提出了改进 D* lite^[6]。这些算法能够规划出最优路径,但是具有计算量大、实时性差和难以在高维空间中使用的缺点。

2) 基于采样算法:主要有基于概率路线图算法(Probabilistic Roadmap, PRM)和基于快速搜索随机树算法(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)两大分支。基于 RRT 算法的特点是不考虑地图信息,从起点到终点规划一条无碰撞路径。代表性算法有:Karaman 等提出的 RRT* 算法^[7], Li 等提出的 TBIT* (Target-Biased Informed Trees) 算法^[8], Wang 等提出的 IABFMT* (Informed Anytime Bi-directional Fast Marching Tree) 算法^[9], Kun 等提出的改进 RRT 算法^[10]。基于 PRM 算法的变种有 Lai 等提出的 RRdT* (Rapidly-exploring Random disjointed-Trees*)^[11]。这些算法能够快速规划出路径,但它们主要是全局路径规划或只能改进已经经过的区域。

3) 基于势场算法主要就是人工势场法。

4) 智能优化算法主要有遗传算法^[12]、蚁群算法^[13-14]和粒子群算法等其他优化算法。如 Hao 等提出一种基于碰撞检测的自适应遗传算法^[15], Liu 等提出随机游走蚁群算法^[16], Yu 等提出融合退火算法的粒子群算法^[17], Fernandes 等提出一种多峰值粒子群算法^[18];以及最近兴起的强化学习方法,如 Sahu 等提出一种与粒子群算法结合的改进 Q-learning 算法^[19], Guo 等提出一种改进 Q-learning 算法^[20], Asghari 等提出与遗传算法结合的 Sarsa 算法等^[21]。但这些智能优化算法的缺点是迭代次数过多,计算及收敛速度慢,而且强化学习还有计算量极大及对地图十分依赖等特点,因此算法的实时性较差。

目前,针对未知环境下的路径规划算法的研究是当前研究路径规划方向的重点之一。Hou 等提出的针对未知环境的 DJPS 算法^[22],在缩短计算时间的同时也缩短了路径的长度。Zhao 等提出的基于模糊算法的未知环境路径规划算法^[23],能够规划出一条合理的路线。Zhang 等提出的人工势场与滚动窗口相结合的方法^[24],在未知环境中能够准确绕开障碍物并跳出局部极小点。Gao 等将 B-RRT 引入到未知环境中作为路径规划的方法^[25],该算法能在更短的时间内规划出一条路径,极大地节省了资源。Liao 等将模拟退火算法与 Sara 算法相结合用于未知环境路径规划^[26],能快速到达目标点。但是,以上算法没有考虑无人艇的运动学约束,规划的路径比较曲折,转角过大,难以直接应用于无人艇在未知环境下的路径规划。

针对目前算法存在的规划路径曲折,规划路径所需时间较长,以及目前的智能优化算法不适合在未知环境中应用和没有充分考虑无人艇运动学特性等缺点,提出了考虑无人艇运动学的改进快速搜索随机树——人工势场算法(Improved RRT* - APF, IRRT* - APF)。本文通过引入滚动窗口,对 RRT* 算法和 APF 算法进行改进,以保证能够在未知环境中规划满足无人艇运动学规律的路径。

本文的改进点包括:1)增加改进的人工势场法,以使路径

能够快速向目标点靠拢;2)采用曼哈顿距离降低计算量,加快计算效率;3)考虑 USV 的运动学特性,以使规划的路径符合 USV 的运动学约束,由于算法中考虑了转向速度,因此风浪对船舶的影响会由转向速度体现,控制转向速度的大小能够减小风浪对船的干扰。经仿真验证,所提算法具有抗风浪的鲁棒性,表明算法具有系统稳定性。

2 无人艇模型

2.1 无人艇动力学与运动学模型

船舶的路径跟踪控制需要建立对应的船舶运动学模型和船舶动力学模型。由于通常情况下无人艇是小型船舶,且仅有一个螺旋桨和一个方向舵,因此大多数无人艇都是欠驱动无人艇。对它们建立三自由度运动学模型和动力学模型。运动学模型如图 1 所示^[27]。

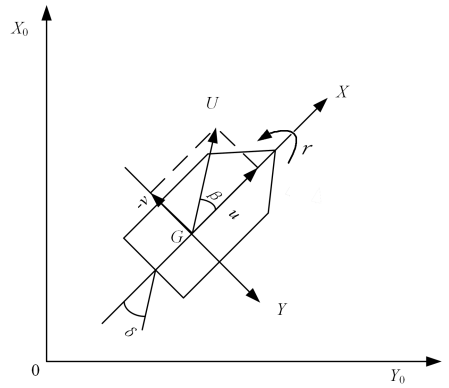


图 1 无人艇三自由度运动学模型

Fig. 1 Three degree of freedom kinematics model of unmanned surface vehicle

分离型模型(Mathematical Model Group, MMG)于 70 年代末由日本拖曳水池委员会(JTTC)提出。模型的特点是将作用于船舶的力与力矩按物理意义进行分离。三自由度动力学模型可表示为^[28]:

$$\begin{cases} (m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr=X_H+X_P+X_R+X_{wind}+X_{wave} \\ (m+m_y)\dot{v}-(m+m_x)ur=Y_H+Y_P+Y_R+Y_{wind}+Y_{wave} \\ (I_{ZZ}+J_{ZZ})\dot{r}=N_H+N_P+N_R+N_{wind}+N_{wave} \end{cases} \quad (1)$$

其中, X, Y, N 分别是船体的纵向、横向和垂直方向的力与力矩; H, P, R 分别表示裸船体、螺旋桨和舵机; m 是船体的质量; m_x 是水沿船体纵向方向的附加质量; m_y 是水沿船体横向方向的附加质量; I_{ZZ} 是船体在附体坐标系下绕 z 轴的转动惯量; J_{ZZ} 是船体在附体坐标系下绕 z 轴的附加转动惯量; u, v, r 分别表示船的纵荡速度、横荡速度和船摇速度; $X_{wind}, Y_{wind}, N_{wind}$ 表示船受到风的力和力矩; $X_{wave}, Y_{wave}, N_{wave}$ 表示船受到浪的力和力矩。

船舶在大地坐标系下的运动学表示^[27]为:

$$\begin{cases} \dot{x}=u \cos \Psi-v \sin \Psi \\ \dot{y}=v \cos \Psi+u \sin \Psi \\ \dot{\Psi}=r \end{cases} \quad (2)$$

其中, x, y 分别是船在大地坐标系下的重心的位置, Ψ 是船的航向角。

2.2 无人水面舰艇运动学约束与特性

无人水面舰艇作为目前广泛使用在开阔水域中的自动化、智能化机械设备,由于受螺旋桨、舵和电机的精密性和反应速度的影响,具有一定的滞后性特点,因此无人水面舰艇具有一定的运动学约束。约束主要有两种:1)无人水面舰艇与周围环境中物体之间的距离约束;2)无人水面舰艇在转向时的转角约束。

出于航行安全性的考虑,需要保证 USV 与障碍物之间的距离,即航道的安全距离。如图 2 所示,安全距离为船舶的宽度或船舶长度的一半,用 d 表示。

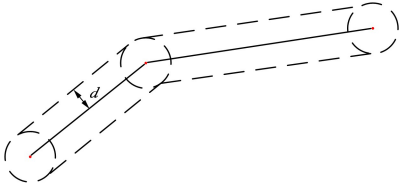


图 2 距离约束

Fig. 2 Distance constraint

船舶在转向时由于自身特性的影响,无法在短时间内转动太大的角度,此时需要引入两个概念:船舶转角约束和船舶转向半径。船舶转角约束,即单位时间内船舶艏向角改变的大小,主要受艏摇速度影响。船舶转向半径受船舶纵荡速度、艏摇速度、舵角、船舶形态及排水量等因素影响。在只考虑纵荡速度、舵角和艏摇速度等情况下,转向半径可以由式(3)一式(5)确定:

$$r = \frac{u}{R} \quad (3)$$

$$R = \frac{L}{2 \times \tan \theta} \quad (4)$$

$$\delta = k_r \times (\Psi - \Psi_0) \quad (5)$$

其中, u 为船舶纵荡速度, r 为船舶艏摇速度, R 为船舶转向半径, L 为船长, δ 为舵角, k_r 为舵效应指数, Ψ 为航向角, Ψ_0 为基准航向角。在船舶纵荡速度不变的情况下,艏摇速度越大,则转向半径越小;舵角越小,则转向半径越大。但转向半径应当不小于航道的安全距离约束,以确保安全性;舵角与航向角有对应关系,可以由航向角与 USV 和目标点夹角之间的差值确定舵角度数,进而影响转向半径。需注意的是,式(3)一式(5)均为船舶在静水面做匀速圆周运动时的近似公式,但在计算分析时仍具有参考意义。图 3 是船舶转角约束图,图 4 是船舶纵荡速度为 1 m/s 时转向角度与转向半径关系图,图 5 是船舶转向半径与舵角关系图。

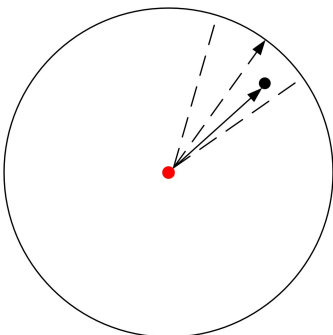
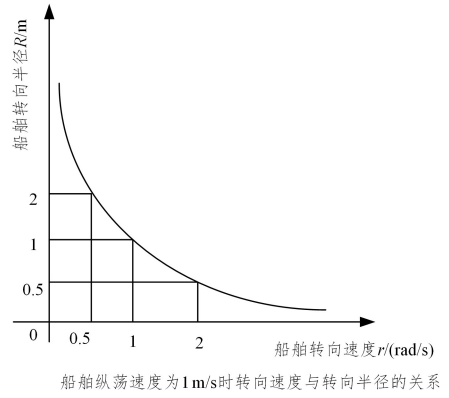


图 3 转角约束

Fig. 3 Corner constraint



船舶纵荡速度为 1 m/s 时转向速度与转向半径的关系

图 4 船舶转向半径与转向速度间的关系

Fig. 4 Relationship between ship turning radius and turning speed

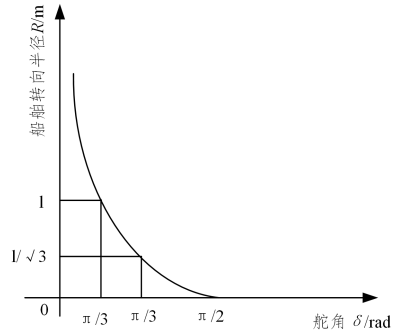


图 5 船舶转向半径与舵角间的关系

Fig. 5 Relationship between ship turning radius and rudder angle

2.3 干扰模型

船舶在行驶的过程中会受到海风、海浪的干扰,风浪会使船舶航向和航速发生改变,同时使得船舶产生横摇、纵摇和垂荡运动,影响船舶稳定性。然而,海风、海浪在实际情况中是不稳定的,需要结合当地的水文数据。因此,在通常情况下,仅考虑海风与海浪的近似方程与平均方程。

对于前进的船舶,风力和风力矩可表示为:

$$\tau_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(\gamma_{rw}) A_{Fw} \\ C_Y(\gamma_{rw}) A_{Lw} \\ C_N(\gamma_{rw}) A_{Lw} L_{\alpha} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, ρ_a 为空气密度; V_{rw} 为风与船舶的相对风速; A_{Fw} 和 A_{Lw} 为水面以上船体正面和侧面投影面积; C_X , C_Y 和 C_N 分别为 X 方向、 Y 方向和 N 方向的风系数; γ_{rw} 为风的攻角; L_{α} 为船长。

海浪干扰的计算较其他干扰更为复杂,目前并没有针对海浪的准确公式。海浪可分为一阶海浪与二阶海浪:一阶海浪对船舶的影响较小,而且主要是船舶垂荡的影响,本文不考虑;二阶海浪对船舶的影响较大,而且主要影响船舶的横荡、艏摇和纵荡。二阶海浪的计算式如式(7)所示:

$$\tau_{wave} = \frac{1}{2} \rho L a^2 \begin{bmatrix} C_{XD}(\lambda) \cos \chi \\ C_{YD}(\lambda) \sin \chi \\ LC_{ND}(\lambda) \sin \chi \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, ρ 为海水密度; a 为平均波浪幅值; λ 为海浪的波长; χ 为波浪的遭遇角; C_{XD} , C_{YD} 和 C_{ND} 分别为 X 方向、 Y 方向和 N 方向的波浪系数。

$$\begin{cases} C_{XD}=0.05-0.2\left(\frac{\lambda}{L}\right)+0.75\left(\frac{\lambda}{L}\right)^2-0.51\left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \\ C_{YD}=0.46-6.83\left(\frac{\lambda}{L}\right)-15.65\left(\frac{\lambda}{L}\right)^2+8.44\left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \\ C_{ND}=-0.11+0.68\left(\frac{\lambda}{L}\right)-0.79\left(\frac{\lambda}{L}\right)^2+0.21\left(\frac{\lambda}{L}\right)^3 \end{cases} \quad (8)$$

3 RRT* 算法与 APF 算法

3.1 RRT* 算法

RRT* 算法是一种渐进完备的采样算法,具有不依赖地图形状及计算量小等特点,被广泛应用于各种移动无人设备的路径规划中。RRT* 算法在 RRT 基础上进行了重新选择父节点和重布线的改进^[6]。重新选择父节点,即在新生成了节点 X_{new} 后,得到以 X_{new} 为中心、以一定的半径为圆内的所有的节点,并以这些节点为父节点,重新计算 X_{new} 到起点的路径长度,选择经过的最短路径的节点为 X_{new} 的父节点。这样有利于缩短路径长度,减小因随机采样得到的节点带来的不确定性。重布线,即以 X_{new} 为中心、距 X_{new} 一定距离内的所有节点,将这些节点的父节点改为 X_{new} 时,它们新的路径长度。如果新的路径长度较原来的路径长度短,则以新节点 X_{new} 为其他节点的父节点,这样有利于减小整个树的路径长度。经过重新选择父节点和重布线,路径得到了一定程度的优化。

3.2 APF 算法

人工势场法(Artificial Potential Field, APF)是一种局部路径规划算法,将物理学中“场”的概念引入路径规划之中,并假设智能体在建立的虚拟力场移动。APF 算法计算简单,且易于理解。虚拟力场由两部分组成:由障碍物建立的斥力势场和由目标点建立的引力势场。智能体在斥力势场和引力势场的作用下逐渐到达目标点。假设智能体在空间中的位置用 X 表示,目标用 X_{goal} 表示,则引力势场函数 U_{at} 为:

$$U_{\text{at}}(X) = \frac{1}{2}k(X - X_{\text{goal}})^2 \quad (9)$$

其中, k 为引力势场增益, $(X - X_{\text{goal}})$ 为智能体到目标的相对距离。相应的吸引力为:

$$F_{\text{at}}(X) = -\text{grad}[U_{\text{at}}(X)] = -k(X - X_{\text{goal}}) \quad (10)$$

斥力势场函数为:

$$U_{\text{re}}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho(x, x_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & 0 \leq \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, η 为斥力势场增益, $\rho(x, x_{\text{obs}})$ 为障碍物与智能体间的距离, ρ_0 为障碍物所能影响的距离。相应的排斥力为:

$$F_{\text{re}}(X) = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho(x, x_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2(x, x_{\text{obs}})}\nabla\rho, & 0 \leq \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\nabla\rho$ 为障碍物指向智能体的单位向量。

4 考虑无人艇运动学约束的改进 RRT*-APF 算法

RRT* 算法是一种全局路径规划算法,对局部路径进行规划的能力较差。APF 算法具有局部极小值问题和目标点不

可达问题,并且它们均没有考虑 USV 的运动学特性,因此规划的路径有大量的转折点,难以直接应用于 USV 路径规划。

针对以上缺点,本文提出了在未知环境中考虑无人艇运动学约束的 IRRT*-APF 算法。该算法包括采样、RRT* 树生长和优化过程。首先,运用滚动窗口法建立在未知环境中的采样机制。改进 RRT* 运用滚动窗口,并在滚动窗口中进行节点重连和重布线,减少转折次数;运用动态步长,使得路径在满足 USV 的运动学特性的情况下更迅速地绕过障碍物。在采样和生长过程中,结合 APF 算法以及 USV 运动学特性对采样点及生长点进行了限制,减小了转角的度数和转折点数量。在优化过程中通过改进距离计算方法和碰撞检测方法,减少了节点数量,提高了计算效率。

4.1 滚动窗口的建立

在未知环境下,船舶只能根据传感器探测其周边的部分水域。在此情况下,可以建立以 USV 为中心的环境模型。USV 的位置不同,环境模型也会不断变化。因此,可以将当前的环境模型作为滚动窗口,根据路径规划算法确定下一步的方向,在 USV 不断前进时,滚动窗口也会不断更新,USV 的路径也就会不断优化。

同时,在确定 USV 与目标点或障碍物之间的距离时,改用曼哈顿距离。

$$d = |x - x_0| + |y - y_0| \quad (13)$$

其中, d 为距离, (x, y) 为 USV 的坐标, (x_0, y_0) 为目标点或障碍物中心点的坐标。曼哈顿距离与欧氏距离意义相近,同时曼哈顿距离只需要做加减法,这使得计算机在大量的计算过程中代价更低,而且会消除在开平方过程中取近似值而导致的误差。

本文滚动窗口由传感器的探测距离确定,即传感器的探测窗口为滚动窗口。滚动窗口模型如图 6 所示。

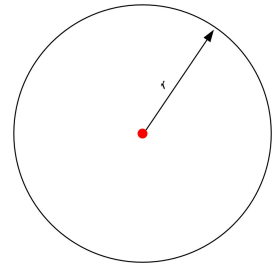


图 6 滚动窗口

Fig. 6 Scroll window

4.2 子目标点的确定方法

假设目标点的大致位置已由无人机或卫星等设备确定,则以当前 USV 的位置为圆心所建立的滚动窗口中,会根据不同情况确立当前子目标点。

根据 USV 和目标点的位置,可大致分以下 3 种情况进行讨论:1)目标点在 USV 滚动窗口的内部;2)目标点在 USV 滚动窗口的外部;3)目标点在 USV 滚动窗口的外部,且 USV 探测到 USV 到目标点之间有障碍物阻挡。

4.2.1 目标点在 USV 滚动窗口的内部

如图 7 所示,目标点在 USV 滚动窗口的内部,则此时 USV 探测到了目标点。图 7 中黑色点为目标点,此时 USV 可以完全探测到目标,则子目标点即为目标点。

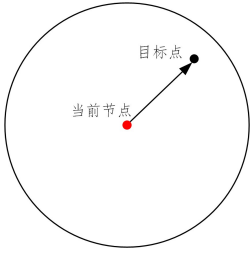


图7 目标点在滚动窗口的内部

Fig. 7 Target is inside of scroll window

4.2.2 目标点在 USV 滚动窗口的外部

如图 8 所示,目标点在滚动窗口的外部。

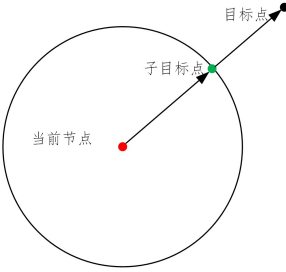


图8 目标点在滚动窗口的外部

Fig. 8 Target is outside of scroll window

此时,做 USV 到目标点的连线,与 USV 的滚动窗口边缘相交得到一点,则设定此点为子目标点。

4.2.3 目标点在 USV 滚动窗口的外部,且 USV 探测到

USV 到目标点之间有障碍物阻挡

如图 9 所示,目标点在滚动窗口的外部,且有障碍物阻挡。

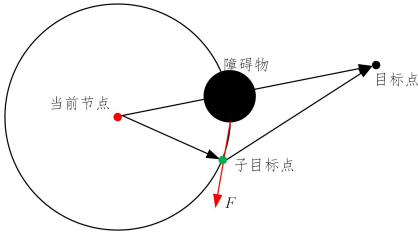


图9 目标点在滚动窗口的外部,且有障碍物阻挡

Fig. 9 Target is outside of scroll window with obstacles

此时,由于障碍物的阻挡,USV 无法到达目标点。首先,假设子目标点在障碍物附近;然后,由于有障碍物,子目标点会受到排斥力而偏移,直至子目标点不在障碍物的影响范围内,分别连接 USV 和子目标点,子目标点和目标点。此时,就决定了子目标点的位置。

4.3 改进 APF 算法

在引力势场和斥力势场中,引入 USV 与目标点和障碍物之间的夹角作为引力势场和斥力势场的组成部分。这种改变能够加快 USV 转向目标点的速度和 USV 远离障碍物的速度。

新的引力势场公式与斥力势场公式分别为:

$$U_{at}(X) = \frac{1}{2}k\Psi_{tar}(X - X_{goal})^2 \quad (14)$$

$$U_{re} = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\Psi_{obs}\left(\frac{1}{\rho(x, x_{obs})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & 0 \leq \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho_0 < \rho \end{cases} \quad (15)$$

其中, Ψ_{tar} 和 Ψ_{obs} 分别为 USV 与目标点和 USV 与障碍物之间的夹角大小。 Ψ_{tar} 越大,代表 USV 的航向角与 USV 到

目标点之间的夹角越大,说明此时 USV 有着远离目标点的趋势,则需要增大吸引力,使得 USV 能快速转向目标点; Ψ_{obs} 越小,代表 USV 的航向角与 USV 到障碍物之间的夹角越小,说明 USV 有着朝向障碍物前进的趋势,此时需要增大排斥力,使得 USV 能够快速远离障碍物。为了防止 Ψ_{tar} 太小和 Ψ_{obs} 太大时引力势场和斥力势场失效,则有:

$$\begin{cases} \Psi_{tar}, & \Psi_{tar} \geq \frac{\pi}{3} \text{ rad} \\ 1, & \Psi_{tar} < \frac{\pi}{3} \text{ rad} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Psi_{obs}, & \Psi_{obs} \leq 0.3 \text{ rad} \\ 1, & \Psi_{obs} > 0.3 \text{ rad} \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)和式(17)可知,当 Ψ_{tar} 大于 $\frac{\pi}{3}$ rad 时,会对引力势场产生影响;而 Ψ_{obs} 在小于 0.3 rad 时,会对斥力势场产生影响。

4.4 RRT* 新节点确定

4.4.1 引力势场与斥力势场对随机点确定的影响

在滚动窗口的内部,USV 会选取随机点,随机点会等概率在滚动窗口内产生,此时有可能会产生远离子目标点的随机点,这会导致生成的路径更加曲折,且会使得 USV 到达目标点的效率降低。如果子目标点会产生引力势场,则随机选取的随机点会受到引力势场的影响而靠近子目标点,使得生成的路径更加平滑并且符合 USV 的运动特性,提高了 USV 路径规划的效率。

当滚动窗口内部有障碍物时,障碍物会对子目标点和随机点产生影响。当障碍物与子目标点之间距离接近时,障碍物会对子目标点产生排斥力,导致子目标点移动而远离障碍物。子目标点和障碍物均会对随机点产生影响。首先,子目标点会对随机点产生吸引力,使得随机点靠近子目标点。如果此时随机点进入障碍物的影响范围,障碍物则会对随机点产生排斥力,使得随机点远离障碍物。该方法的优势是引力势场和斥力势场交替对随机点产生影响,而非同时对随机点产生影响,这样可以减少计算量,提高计算效率;并且只有随机点进入障碍物的影响范围时,障碍物才会对随机点产生排斥力,提高了计算结果的精确度。

4.4.2 改进的节点重连算法

在传统的 RRT* 算法中,节点重连算法只在新的节点及其一定范围内进行新的父节点的选取。而在滚动 RRT* 算法中,由于滚动窗口内的环境已经为 USV 所知,并且所有的节点均在滚动窗口内生成,因此在新得到的节点与 USV 所在的当前点之间无障碍物阻挡的情况下,可以直接将新节点与当前点相连。这样能减小存储的空间,加快算法运行速度,并且能做到“截弯取直”,使得路径更适合 USV 的运动学模型。

4.4.3 算法的动态步长调节

如果 USV 遭遇到大型或较长的障碍物(如墙等长条状障碍物)阻隔,APF 算法的效率将大大下降。这是因为在 APF 算法中,障碍物均被假设成圆形障碍物,这能够减小计算量,提高 APF 算法的效率。但是在智能体受到长条状障碍物的阻隔的情况下,APF 算法难以针对长条状障碍物进行斥力势场的建模和计算,则此时 APF 算法的效率将下降并且无法引导智能体朝向目标点所在的区域前进。如果能改变节点前进

的步长,则能够使得智能体绕开长条状障碍物并最终朝向目标点所在的区域继续前进。

当 USV 遇到长条状障碍物时,有两种可能的状况:1)子目标点应该在的位置被长条状障碍物遮挡;2)子目标点应该在的位置未被长条状障碍物遮挡。

若子目标点应该在的位置被长条状障碍物遮挡,则首先计算 USV 到障碍物的最短距离,并以此距离重新作为 USV 的最大探测范围,即为 USV 到子目标点的距离,同时子目标点会受到障碍物的排斥力作用而远离障碍物。在确定子目标点之后,随机点和 RRT* 的新节点将依照之前所描述的方法进行选择。

若子目标点应该在的位置未被长条状障碍物所遮挡,则此时有两种可能:1)USV 和子目标点同侧;2)USV 和子目标点不同侧。若 USV 和子目标点在同侧,则说明此时 USV 距离障碍物较远,不需要进行步长调整。若 USV 和子目标点在异侧,则说明此时 USV 距离障碍物较近,判断此时 USV 与障碍物之间的距离。若 USV 与障碍物之间的距离小于障碍物的作用范围或 USV 距离约束,则说明 USV 此时极有可能与障碍物相撞,因此去除当前点,重新在 RRT* 算法中选点前进。若 USV 与障碍物之间的距离大于障碍物的作用范围及 USV 距离约束,则进行动态步长的调整。首先,计算 USV 到障碍物的最短距离,并以此长度为 USV 的最大采样距离,即采样得到的随机点与 USV 之间的距离不大于此长度,同时随机点也会受到障碍物的排斥力影响而远离障碍物。然后,设定一个随机值 σ ,随机点的位置为 $(1-\sigma) * (x, y) + \sigma * (x', y')$,其中 (x, y) 为原位置, (x', y') 为随机位置,这会大大提高 USV 绕过长条状障碍物的概率,从而到达最终的目标点。

算法的流程如图 10 所示。

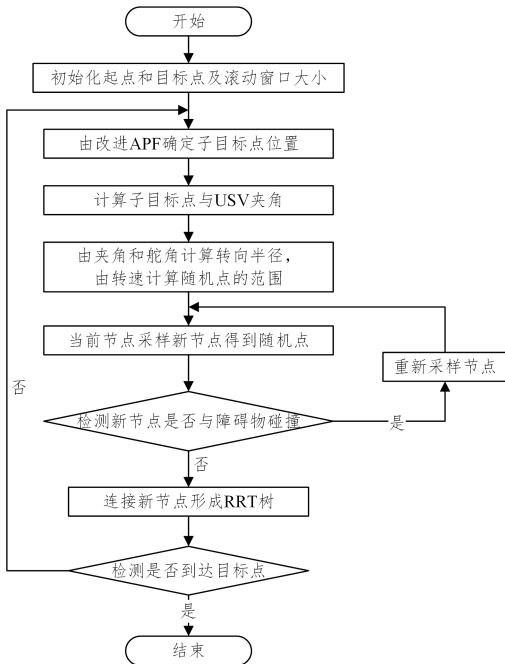


图 10 算法流程图

Fig. 10 Algorithm flowchart

5 仿真结果

为了验证 IRRT*-APF 的有效性,设计了其与滚动 RRT

算法^[29]和 PSOFS^[30]算法的对比仿真实验,仿真平台为 Pyc-harm。图 11 为仿真地图,大小为 900×800 。地图上生成 60 个障碍物。设定无人船的滚动窗口的半径为 50。仿真结果图中,红色线条为算法最终规划出来的路径,黑色圆形为障碍物,绿色线条为 IRRT*-APF 和滚动 RRT 算法在规划路线时散射出来的探测路径。

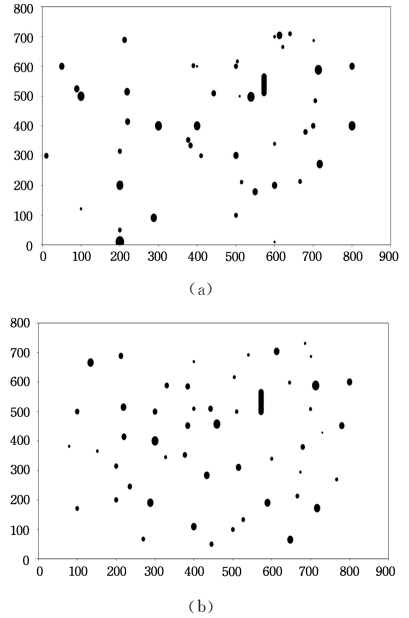


图 11 仿真地图

Fig. 11 Simulation map

评判标准有 5 个:路径长度,路径安全度,最大转角度数,平均转角度数和时间。路径长度是判定 USV 从起点到终点所经过的总距离,由欧氏距离计算。路径安全度指 USV 与障碍物之间的最短距离,是衡量 USV 是否会与障碍物碰撞的指标,其值越大,说明 USV 与障碍物之间的距离越大,则 USV 越安全。最大转角度数指路径所有转角中角度的最大值。平均转角度数指对路径所有转角的角度相加并求得平均值,是衡量路径转角大小的度量,其值越小,说明转角角度越小,则生成的路径越平缓,越符合无人艇的运动学特性。时间是算法规划得到的由起点到终点的路径的总时间,是衡量算法实时性的指标。

5.1 无干扰情况下的仿真

在无风浪干扰的情况下,分别对 3 种算法各做 20 个不同的目标点的仿真实验,每个仿真实验各做 20 次。图 12—图 14 是分别以 $(800, 700)$, $(660, 750)$ 和 $(640, 630)$ 为目标点所画出的 3 种算法的路径图。

由图可知,滚动 RRT 规划的航路最为曲折;IRRT*-APF 规划的航路最符合 USV 的运动学特性,路径更加平滑。

3 种算法各做 20 次仿真后,计算得到的性能指标的平均值如表 1 所列。其中,路径长度是 USV 实际经过长度除以起始点和目标点之间的距离所得到的归一化路径长度;时间为算法规划生成由起点到终点的路径的总时间;路径安全度和平均转角度数则是对 20 次的仿真实验作平均后得到的值。

表 1 无干扰下不同的目标点归一化的仿真结果

Table 1 Simulation results of normalization of different target points without interference

路径对比	路径长度	路径安全度	最大转角 度数/(°)	平均转角 度数/(°)	时间/s
滚动 RRT	1.052	4.84	19.7	16.8	5.27
PSOFS	1.035	1.92	17.3	13.4	14.37
IRRT*-APF	1.047	5.06	16.6	14.6	4.93

表 1 中, PSOFS 的路径长度最短, 平均归一化后的值为 1.035。而对于路径安全度, IRRT*-APF 规划的路线距障碍物最远, 其平均值为 5.06。IRRT*-APF 算法的最大转角度数的值为 16.6°, 是 3 种算法中的最小值。IRRT*-APF 和 PSOFS 平均转角度数的值均小于 15°。IRRT*-APF 的耗时最短, 作平均归一化后的值为 4.93 s。

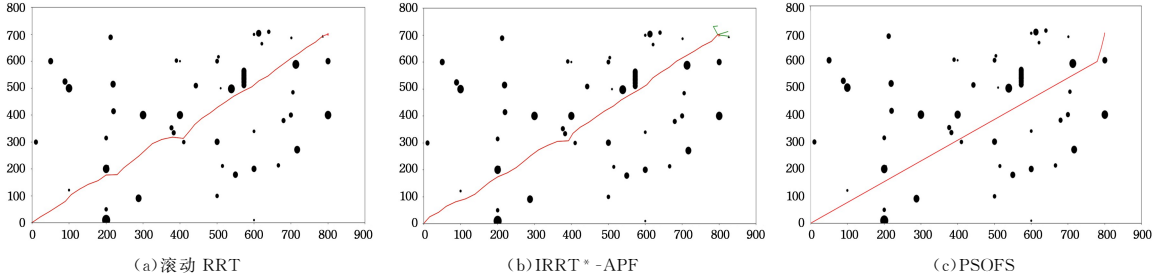


图 12 目标点为(800,700)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 12 Simulation with target points(800,700)

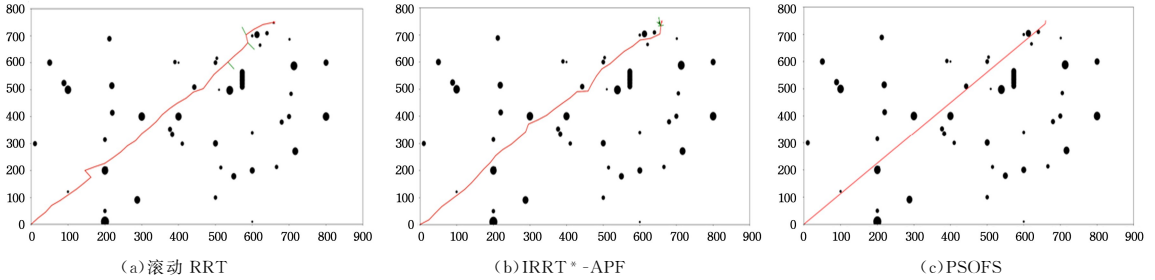


图 13 目标点为(660,750)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 13 Simulation with target points(660,750)

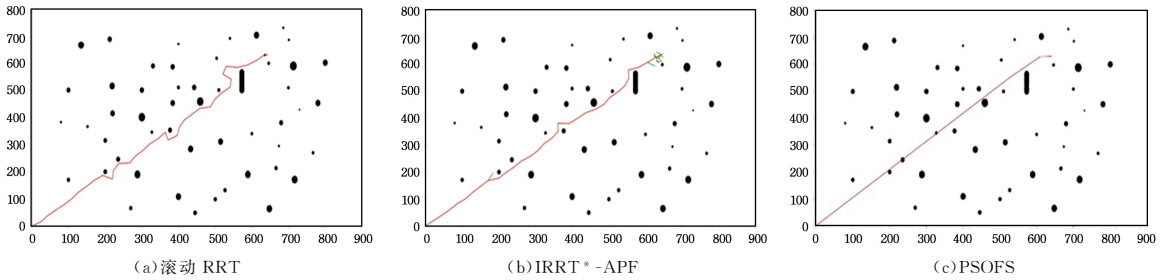


图 14 目标点为(640,630)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 14 Simulation with target points(640,630)

5.2 有风浪干扰情况下的仿真

在有干扰的情况下进行仿真, 风力为 2 级, 风向北偏东 45°, 平均波浪幅值 $a=0.008\text{m}$, 波浪遭遇角 $\chi=20^\circ$, 波长 $\lambda=2.4\text{m}$ 。在风浪影响下, USV 会发生侧滑以及艏向角的剧烈摆动, 对路径规划算法产生影响。改进的人工势场法能根据

艏向角的大小调节 USV 与目标点之间引力的大小, 从而抑制干扰的影响。分别对 3 种算法各做 20 个不同的目标点的仿真实验, 每个仿真实验各做 20 次。图 15—图 17 分别是以 (800,700), (660,750) 和 (640,630) 为目标点所画出的 3 种算法的路径图。

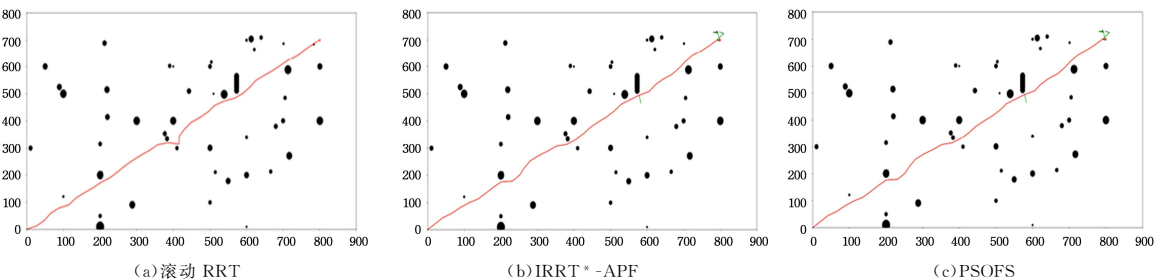


图 15 目标点为(800,700)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 15 Simulation with target Points(800,700)

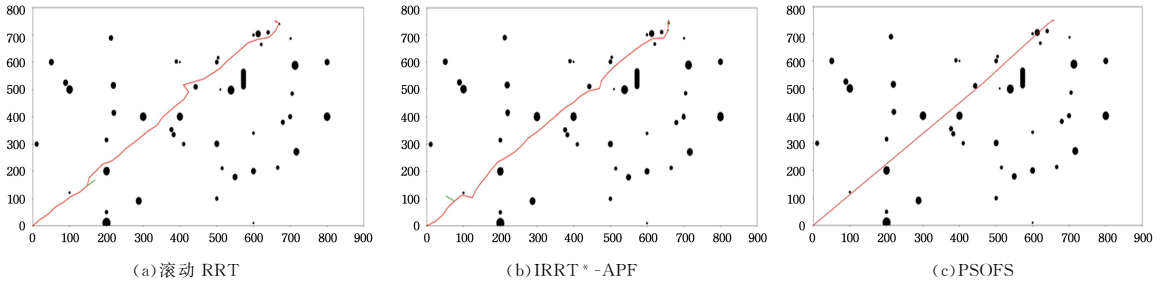


图 16 目标点为(660,750)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 16 Simulation with target points(660,750)

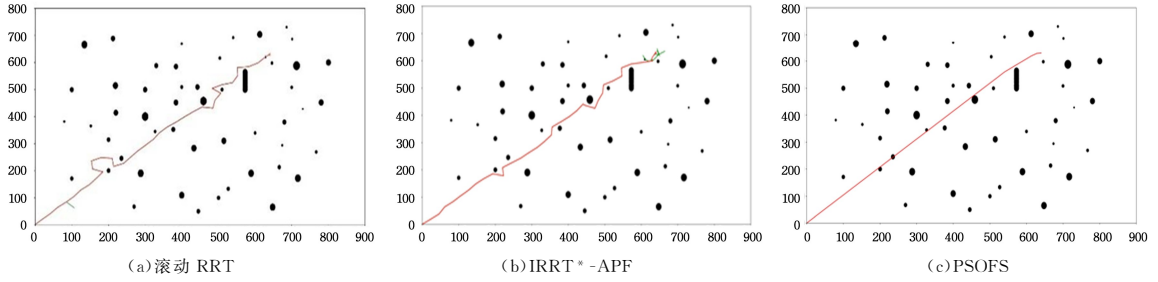


图 17 目标点为(640,630)的仿真结果(电子版为彩图)

Fig. 17 Simulation with target points(640,630)

在有干扰的影响下 3 种算法都受到不同程度的影响,但 3 种算法总体稳定。由图可知,IRRT*-APF 所规划的路径最符合 USV 的运动学特性。

表 2 列出了对 3 种算法各做 20 次的仿真实验后取平均所得到的实验结果。其中,路径长度是 USV 实际经过长度除以起始点和目标点之间的距离所得到的归一化路径长度;时间为算法规划生成由起点到终点的路径的总时间;路径安全性和平均转角度数则是对 20 个不同的目标点的仿真实验作平均后得到的值。

表 2 有干扰下 20 个不同的目标点归一化的仿真结果

Table 2 Simulation results of normalization of 20 different target points under interference

路径对比	路径长度	路径安全度	最大转角 度数/(°)	平均转角 度数/(°)	时间/s
滚动 RRT	1.057	4.26	20.4	17.3	5.33
PSOFS	1.041	1.08	17.9	16.2	16.05
IRRT*-APF	1.053	4.53	18.6	16.9	5.26

表 2 中,在路径长度一栏中,PSOFS 的路径长度最短,平均归一化后的值为 1.041。IRRT*-APF 规划的路线距障碍物最远,其平均值为 4.53,这意味着 IRRT*-APF 更安全。IRRT*-APF 和 PSOFS 算法的最大转角度数相近,分别为 18.6° 和 17.9°,两者的平均转角度数分别为 16.9° 和 16.2°。IRRT*-APF 的耗时最短,平均归一化后的值为 5.26 s。同时,在部分实验中出现了 PSOFS 算法规划的路径和障碍物重叠的情况,这在现实中是不允许的,因为这会导致 USV 撞到障碍物。

相比滚动 RRT 算法,IRRT*-APF 算法采用改进的节点重连算法和动态步长调节,能够使得规划所得的路径距离更短且转向的角度更小,更符合 USV 的运动特性。相比 PSOFS 算法,IRRT*-APF 算法采用了 APF 算法,规划所得的路径能离障碍物足够远,从而保证 USV 通过有障碍物的水域时的安全性。而且在所有测试中,IRRT*-APF 算法规划

所用时间最短,算法的效率最高。

结束语 针对未知环境下的无人艇路径规划问题,本文提出了一种基于无人艇运动学特性的改进 RRT*-APF 算法。该算法引入了增加了无人艇与障碍物或目标点的角度的人工势场法以及无人艇的运动学特性,用于对随机点的位置以及 RRT* 新节点的位置进行调节;同时运用曼哈顿距离法缩短了计算时间,提高了计算效率;最后,引入动态步长,使得规划的路径能在尽可能远离障碍物的同时,更加符合无人艇的运动学特性。实验结果表明,本文算法能够在规划的路径长度和规划时间、路径安全程度以及路径的转角的大小之间取得平衡,且较为符合无人艇的运动学特性并具有抗风浪能力,具有实时性和实用性。

但是本文算法仍有进一步改进的方向:动态步长需要更加适应 USV 的运动学特性;转向角的大小除符合 USV 的运动学特性外,还可结合环境的复杂性;无人艇在行进中还需考虑速度变化等。

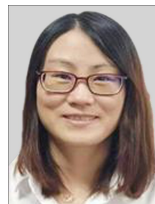
参考文献

- [1] DU Y Q, HYANG J, ZHANG H J. Multi-directional Path Planning Method of Surface Unmanned vehicle[J]. Command Control & Simulation, 2021, 43(4): 7-12.
- [2] LI C, HUANG X, DING J, et al. Global path planning based on a bidirectional alternating search A* algorithm for mobile robots [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108123.
- [3] ZHANG T, XIANG Q, ZHENG W, et al. Application of Path Planning Based on Improved A* Algorithm in War Gaming of Naval Warfare[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 960-968.
- [4] TONG X C, ZHANG H J, GUO H. Multi-directional path planning algorithm for unmanned surface vehicle [J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(11): 3373-3378.
- [5] KOENIG S, LIKHACHEV M. Fast replanning for navigation in

- unknown terrain [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(3):354-363.
- [6] JIABIN Y, MENG Y, ZHIYAO Z, et al. Path planning of unmanned surface vessel in an unknown environment based on improved D* Lite algorithm [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112873.
- [7] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(7):846-894.
- [8] WANG X, MA X, LI X, et al. Target-biased informed trees: sampling-based method for optimal motion planning in complex environments [J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022, 9(2):755-771.
- [9] WANG K, XU J, SONG K, et al. Informed anytime Bidirectional Fast Marching Tree for optimal motion planning in complex cluttered environments [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 215: 119263.
- [10] KUN W, BING Y R. A method on dynamic path planning for robotic manipulator autonomous obstacle avoidance based on an improved RRT algorithm [J]. *Sensors*, 2018, 18(2):571-585.
- [11] LAI T, RAMOS F, FRANCIS G. Balancing Global Exploration and Local-connectivity Exploitation with Rapidly-exploring Random disjointed-Trees [C] // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019:5537-5543.
- [12] XIE Y L, WANG Z. Path Planning for Ship Based on Improved Genetic Algorithm [J]. *Computer Technology and Development*, 2019, 29(5):152-156.
- [13] PU X C, SONG X L. Improvement of ant colony algorithm in group teaching and its application in robot path planning [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(4):764-771.
- [14] LIU H P, NIAN Z S. Improved Ant Colony Algorithm for Path Planning [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2024, 45(4):853-858.
- [15] HAO K, ZHAO J, WANG B, et al. The Application of an Adaptive Genetic Algorithm Based on Collision Detection in Path Planning of Mobile Robots [J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021(5):1-20.
- [16] LIU J, ANAVATTI S, GARRATT M, et al. Modified continuous Ant Colony Optimization for multiple Unmanned Ground Vehicle path planning [J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 196:116605.
- [17] YU Z, SI Z, LI X, et al. A novel hybrid particle swarm optimization algorithm for path planning of UAVs [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(22):22547-22558.
- [18] FERNANDES P B, OLIVEIRA R, NETO J F. Trajectory planning of autonomous mobile robots applying a particle swarm optimization algorithm with peaks of diversity [J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 116:108108.
- [19] SAHU B, DAS P K, KABAT M R. Multi-robot cooperation and path planning for stick transporting using improved Q-learning and democratic robotics PSO [J]. *Journal of Computational Science*, 2022, 60:101637.
- [20] GUO X, PENG G, MENG Y. A modified Q-learning algorithm for robot path planning in a digital twin assembly system [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119:3951-3961.
- [21] ASGHARI A, SOHRABI M K, YAGHMAEE F. Task scheduling, resource provisioning, and load balancing on scientific workflows using parallel SARSA reinforcement learning agents and genetic algorithm [J]. *Journal of Supercomputing*, 2021, 77(3):2800-2828.
- [22] HOU J R, WAN Y, LIANG X C, et al. Robot Dynamic Path Planning Algorithm for Unknown Environment [J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2022, 22(1):29-32.
- [23] ZHAO H W, LV B, LIANG Y. Path Planning Design of Mobile Robot Based on Fuzzy Control in Unknown Environment [C] // 2022 4th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT). IEEE, 2022:1225-1228.
- [24] ZHANG Z, CHEN S, LI Y H, et al. Local Path Planning of Unmanned Underwater Vehicle Based on Improved APF and Rolling Window Method [C] // 2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCS). IEEE, 2022:542-549.
- [25] GAO Y, HU T, WANG Y, et al. Research on the Path Planning Algorithm of Mobile Robot [C] // 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). 2021:447-450.
- [26] LIAO X, WANG Y, XUAN Y, et al. AGV Path Planning Model based on Reinforcement Learning [C] // 2020 Chinese Automation Congress (CAC). 2020:6722-6726.
- [27] CHEN X, LIU Z, DONG J, et al. Path following algorithm of Underactuated USV [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2018, 30(3):107-112.
- [28] YANG Y S. Mathematical model of ship motion; mechanism modeling and identification modeling [M]. Dalian Maritime University Press, 1999:1-450.
- [29] LI J, ZHANG Y, CHEN T. Application of the Improved RRT algorithm to AUV target search in an unknown 3D environment [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2022, 17(2):368-375.
- [30] WAHAB M N A, LEE C M, AKBAR M F, et al. Path Planning for Mobile Robot Navigation in Unknown Indoor Environments Using Hybrid PSOFS Algorithm [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:161805-161815.



LIU Yi, born in 1997, postgraduate. His main research interests include robot path planning and control, and so on.



QI Jie, born in 1978, Ph.D, professor. Her main research interests include multi-robot collaborative control, distributed parameter system control, modeling of complex industrial processes, optimization and control.