

基于改进 RRT*-Smart 的复杂动态环境下的无人艇路径规划

董璐¹, 熊爱玲²

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏 南京 211189;

2. 东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对在多移动障碍船的复杂动态环境下无人水面艇的路径规划问题, 设计了一种基于改进 RRT*-Smart 的无人艇路径规划方法 (RTSNew)。该方法首先优化了节点采样方式, 在以无人艇为原点的极坐标系中进行采样, 采用椭圆形的采样点范围约束以避免无效采样, 增加了历史路径缓存池以充分利用历史路径。该优化大幅降低了计算量, 提高了路径规划的速度。其次, 改进了节点拓展方式, 为了避免将动态障碍作为静态障碍处理, 给每个拓展节点增加时间信息以实现动态碰撞检测, 对动态障碍运动信息的充分利用大幅提高了路径的可行性。同时, 考虑到无人艇的操纵性, 增加了节点拓展的角度约束以保证路径平滑。最后, 对移动障碍船增加虚拟障碍, 使得规划路径符合《国际海上避碰规则》(COLREGS)。基于 VREP 平台进行了无人艇航行仿真实验和对比实验, 结果表明, 在多障碍船的复杂动态环境下, 该方法能够使无人艇高效、安全地抵达终点, 相较于人工势场法和传统 RRT*-Smart 方法, 该方法在规划效率、路径优化、安全性方面均表现优异, 并且保证运动路径遵守 COLREGS。提出的方法较好地解决了传统方法中将动态障碍当作静态障碍处理、未考虑 COLREGS、计算量大且效率低、不适用于多移动障碍船的复杂动态环境等问题。

关键词: 无人水面艇; RRT*-Smart; 路径规划; 动态碰撞检测; 《国际海上避碰规则》

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202229

Path planning for unmanned surface vehicle in complex dynamic environment based on improved RRT*-Smart

DONG Lu¹, XIONG Ailing²

1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: Aiming at the path planning problem of unmanned surface vehicle (USV) in complex dynamic environment with moving multi-obstacle ships, a path planning method based on improved RRT*-Smart (RTSNew) was designed. Firstly, the sampling mode of nodes was optimized, nodes were sampled in the polar coordinate system with USV as the origin, an elliptical sampling range constraint was adopted to avoid invalid sampling, and a historical path buffer pool was used to make full use of the historical path. The optimization greatly reduced the amount of calculation and improved the speed of path planning. Secondly, the expansion mode of nodes was improved. In order to avoid treating dynamic obstacles as static obstacles, time information was added to each node to realize dynamic collision detection and the full use of dynamic obstacles motion information greatly improves the feasibility of the planned path. At the same time, considering the maneuverability of USV, the angle constraint was added in expansion of nodes to ensure smooth path. Finally,

收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-04-16

通信作者: 熊爱玲, 220191542@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62173251); 广东省智能决策与协同控制重点实验室开放课题资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62173251), Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Decision and Cooperative Control, Fundamental Research Funds for the Central Universities

virtual obstacles were designed to mobile obstacle ships to make the planned path comply with International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGS). Based on VREP platform, the USV navigation simulation experiments and comparative experiments were carried out. The results show that RTSNew can make USV reach the destination efficiently and safely, and it performs better in planning efficiency, path optimization and path security than traditional methods in complex dynamic environment with multi-obstacle ships. RTSNew ensures that the motion path complies with COLREGS, and solves the problems of traditional methods: treating the dynamic obstacles as static obstacles, ignoring COLREGS, large amount of calculation and low efficiency, not suitable for the complex dynamic environment with moving multi-obstacle ships.

Key words: unmanned surface vehicle, RRT*-Smart, path planning, dynamic collision detection, COLREGS

0 引言

无人水面艇 (unmanned surface vehicle, USV) (以下简称无人艇) 是一种无人操作的水面舰艇, 主要用于执行危险以及不适合有人船只执行的任务, 被广泛应用于水文探测、海事巡航、军事作战、与无人机或无人车合作进行搜救和巡逻等领域。无人艇在城市水路货物运输方面也有很大的潜力, 应用无人艇能够缓解超载路网的拥堵。近年来, 随着人工智能的快速发展及自动驾驶技术的大规模应用, 无人艇作为智能技术与传统船舶学科交叉融合的产物, 已成为国内外智能装备的研究热点之一。另外, 许多国家越来越重视丰富的海洋资源, 一些国家已将无人艇纳入国家发展战略^[1]。

路径规划是无人艇实现智能航行的关键技术, 国内外许多学者在该方面取得了一定的研究成果。在无人艇全局路径规划方面, Shi B H 等人^[2]提出一种具有运动约束的混合 A* 算法生成初始参考路径, 基于《国际海上避碰规则》(International Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGS) 绘制了局部威胁图, 并使用阿波罗圈 (Apollonius circle) 避开这些障碍; Wang H J 等人^[3]将改进的蚁群算法应用于无人艇在静态未知、动态已知环境下的路径规划; Chen Y L 等人^[4]将蚁群算法和人工势场法结合, 实现了复杂动态环境中的无人艇路径规划; 吕进锋等人^[5]提出改进的随机路径图及和声算法为舰船进行航线规划, 能够有效生成更高质量的全局航线; 敖邦乾等人^[6]结合蚁群算法、Dubins 曲线算法、贝塞尔三阶曲线理论等得到一条优化可行的光滑路径。在无人艇局部路径规划、自主避碰方面, 许多学者将速度障碍 (velocity obstacle, VO) 法、动态窗口法 (dynamic window approach, DWA)、模型预测控制 (model predictive control, MPC) 等方法进行改进和融合应用。Xia G Q 等人^[7]基于速度障

碍法、动态窗口法和改进的粒子群算法求解无人艇碰撞问题; Sun X J 等人^[8]采用有限控制集模型预测控制实现了一个遵循 COLREGS 的避碰系统。此外, 还有一部分学者尝试将强化学习等智能方法应用到无人艇路径规划中。Xu X L 等人^[9]设计了一个基于深度 Q 网络 (deep Q-learning, DQN) 的无人艇自动避碰系统, 并验证了系统的有效性; Guo S Y 等人^[10]将深度确定性策略梯度 (deep deterministic policy gradient, DDPG) 与人工势场结合, 改进了深度强化学习 (deep reinforcement learning, DRL) 路径规划模型, 并将其集成到电子海图平台中进行实验。

快速扩展随机树 (rapidly-exploring random tree, RRT)^[11]是一种基于采样的规划方法, 通过对位置空间进行随机采样的方式搜索可行路径, 能够快速探索空间并生成起点到终点的路径, 具有概率完备性和较高的计算效率^[12-13]。RRT 的优化方法包括 RRT*^[14]、RRT*-Smart^[15]、Informed-RRT*^[16]等, RRT 及其优化方法被广泛应用于路径规划任务且表现优异。莫松等人^[17]将改进 RRT 方法应用于隐身突防航迹规划, 在复杂环境下快速生成更优的突防路径; 汪琴等人^[18]采用改进 RRT 方法进行期望时间下的移动机器人目标搜索路径规划, 显著缩短了移动机器人目标搜索的期望时间; 许万等人^[19]提出了一种基于简化地图的区域采样 RRT* 算法, 使移动机器人沿着该全局优化路径快速、平稳、安全地到达目标点。在无人艇路径规划方面, 庄佳园等人^[20]设计了一种基于改进 RRT 算法的局部路径规划方法, 提高搜索效率的同时缩短了规划距离, 欧阳子路等人^[21]将双向搜索树 (Bi-RRT) 算法与速度障碍法结合, 实现了无人艇自动避碰算法。

在无人艇实际应用环境中, 会出现来自不同方位、不同移动速度的多艘障碍船, 同时躲避多个动态障碍的要求大大提高了无人艇路径规划的难度。在这样多移动障碍船的复杂动态环境下, 以往无人

艇路径规划的方法往往存在以下问题：将动态障碍当作静态障碍处理；没有同时考虑 COLREGS；计算量大、效率低；不适用于多移动障碍船的复杂动态环境。针对这些问题，本文设计了一种基于改进 RRT*-Smart 的无人艇路径规划方法（RTSNew），该方法继承了 RRT*-Smart 方法计算量小、适应复杂环境等优点，并在其基础上进行了以下改进。

(1) 优化了节点采样方式，在以无人艇为原点的极坐标系中进行采样，受 Informed-RRT*启发，采用椭圆形的采样点范围约束以提高采样效率，增加历史路径缓存池以充分利用历史路径。该优化能够大幅减少计算量、提高路径规划速度。

(2) 改进了节点拓展方式，为了避免将动态障碍作为静态障碍处理，为每个拓展节点增加时间信息以实现局部动态避障，对动态障碍运动信息的充分利用可大幅提高路径的可行性，同时，考虑到无人艇的操纵性，增加了节点拓展的角度约束以保证路径平滑。

(3) 对移动障碍船增加虚拟障碍，使得规划路径符合 COLREGS。

最后，基于 VREP 平台进行了无人艇航行仿真实验和对比实验，仿真实验及对比实验表明，本文方法能够较好地解决上述问题，相较于人工势场法和传统 RRT*-Smart，本文方法在多障碍船的复杂动态环境下表现优异：规划速度快、效率高，路径更短、更平滑，碰撞次数更少，并且保证无人艇航行路径遵循 COLREGS。

本文剩余部分结构如下：第1节介绍复杂动态环境下的改进 RRT*-Smart 路径规划方法；第2节给出仿真实验的平台设计、实验数据和结论；第3节对全文进行总结。

1 复杂动态环境下的改进 RRT*-Smart 路径规划

首先，定义复杂动态环境为：在无人艇一定距离范围内存在两艘及以上移动障碍船，并且障碍船来自不同方向，有一定的行驶速度，在该范围内进行近似匀速直线运动。本节主要介绍针对复杂动态环境设计的改进 RRT*-Smart 路径规划方法。第一部分展示了 RRT*-Smart 原理，第二部分展示了对节点采样方式的优化，第三部分展示了虚拟障碍设计，第四部分展示了对节点拓展方式的优化，最后一部分展示了该方法总体流程和单次规划结果。

1.1 RRT*-Smart 原理

(1) RRT 基本方法。从起点开始，在空间中随机采样，并保证有一定概率采样到目标点，找到路径集合中与新采样点最接近且能与它无障碍连接的节点，将该节点作为新采样点的父节点，连接两点并将新采样点加入路径集合，直至终点附近区域被探索到^[12]。

(2) RRT*。在 RRT 基础上进行了重新选择父节点和重布线的改进。重新选择父节点是指在新采样点加入路径集合以后，从新节点附近一定范围内找到能使起点到该新节点的路径更短的父节点。重布线是指对于距离新节点一定范围内的节点，计算以新节点为其父节点时的新代价，若新代价降低，那么将新节点作为其父节点，将对应的代价更新为新的代价^[14]。

(3) RRT*-Smart。基于 RRT*，在找到一条可行路径之后进行优化，化曲为直。这个过程从叶子节点开始，在一定范围内寻找能够无障碍地直接连接的先辈节点^[15]。

1.2 节点采样方式优化

1.2.1 椭圆形采样范围约束

Informed-RRT*利用了先验知识：椭圆上的点到椭圆两焦点的距离之和相同，椭圆外的点到两焦点的距离之和大于椭圆上的点到两焦点的距离之和，椭圆内的点反之。Informed-RRT*基于 RRT*，在获得可行路径之后，将采样空间限制在一个椭圆形区域中，并且随着路径长度的不断缩短，逐渐缩小该椭圆形区域^[16]。

受 Informed-RRT*启发，为了避免无效采样并提高无人艇规划速度以适应复杂动态环境，本文方法在 RRT*-Smart 的基础上改进了随机点的采样方式。定义 $c_{\min}$ 为椭圆焦点之间的距离，也是起始点 $\text{pos}_{\text{start}}$ 和目标点 pos_{goal} 之间路径的最短长度。 c_{best} 为椭圆长轴， $\sqrt{c_{\text{best}}^2 - c_{\min}^2}$ 为椭圆短轴。撒点时，以 $\text{pos}_{\text{start}} - \text{pos}_{\text{goal}}$ 方向为极坐标正方向，逆时针为正，顺时针为负，角度范围 $[-180, 180]^\circ$ ，长度范围为 $(0, c_{\text{best}}]$ 。若采样点在以 $\text{pos}_{\text{start}}$ 和 pos_{goal} 为焦点、 c_{best} 为长轴、 $\sqrt{c_{\text{best}}^2 - c_{\min}^2}$ 为短轴的椭圆内，则保留；否则重新撒点。在路径规划初始阶段， c_{best} 初始化为 $1.3c_{\min}$ ，当搜索到可行路径， c_{best} 更新为最优可行路径长度，继续缩小椭圆形采样范围，从而提高规划效率。改进后的采样点范围如图1所示。

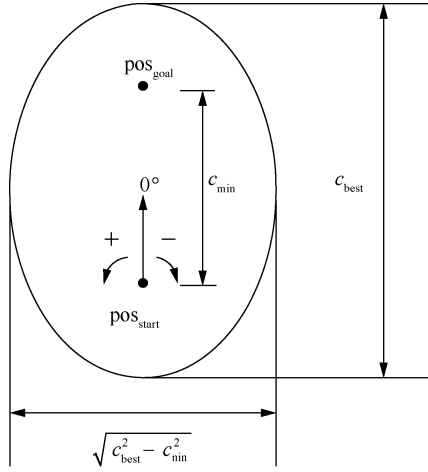


图1 改进后的采样点范围

1.2.2 路径缓存池

为了更充分地利用历史规划结果、加快规划速度，本文方法增加了历史可行路径缓存池，将历史可行路径节点保存在一定大小的缓存池中，当缓存池到达一定长度时，从旧路径进行截断。定义 $node_{dir}$ 为确定新节点生长方向的节点（简称方向节点）， P_{goal} 表示 $node_{dir}$ 为终点的概率， P_{way} 表示 $node_{dir}$ 为缓存池内路径点的概率， P_{random} 为随机撒点的概率，3 个概率满足：

$$P_{goal} + P_{way} + P_{random} = 1 \quad (1)$$

在路径规划的节点采样阶段， P_{goal} 使得随机树趋向目标生长， P_{way} 使得随机树趋向历史路径生长， P_{random} 使得随机树向未知方向生长以探索未知区域。这样既保留了原始随机树的优点，又能充分利用历史规划结果，提高规划效率。根据历史经验，设置 P_{goal} 、 P_{way} 、 P_{random} 分别为 0.3、0.2、0.5。

增加缓存池后采样阶段的方向节点选择算法见算法 1。其中， p 为采样概率， $Way_i \{n_1, n_2, \dots\}$ 为第 i 次规划的可行路径节点集合， $Pool \{Way_1, Way_2, \dots, Way_M\}$ 为历史路径缓存池，可存储 M 条路径记录，RandomReal 函数表示从某段实数范围中随机选择一个实数，RandomChoose 函数表示从全局范围或指定集合中随机选择一个元素。

算法 1 增加缓存池后采样阶段的方向节点选择算法

输入： P_{goal} 、 P_{way} 、 P_{random} 、 $Pool$ ；

输出： $node_{dir}$ ；

1: 初始化采样概率 $p \leftarrow \text{RandomReal}((0.0, 1.0))$

2: if $0 < p < P_{goal}$ then

3: $node_{dir} = node_{goal}$

4: else if $P_{goal} < p < P_{goal} + P_{way}$

5: $Way_{temp} = \text{RandomChoose}(Pool)$

6: $node_{dir} = \text{RandomChoose}(Way_{temp})$

7: else

8: $node_{dir} = \text{RandomChoose}()$

1.3 虚拟障碍设计

COLREGS 的第 13、14、15 条将船舶航行期间可能发生的碰撞分为对遇、交叉和追越^[22]。具体地，根据来船相对于本船的位置按照角度划分为 4 种情况：对遇（ $0^\circ \sim 5^\circ$ ， $355^\circ \sim 360^\circ$ ）、右舷交叉相遇（ $5^\circ \sim 112.5^\circ$ ）、左舷交叉相遇（ $247.5^\circ \sim 355^\circ$ ）、追越（ $112.5^\circ \sim 247.5^\circ$ ），分别对应图 2 中的 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 区域。其中，追越还可分为本船追越前方障碍船和后方障碍船追越本船两种情况^[22]。如图 2 所示，障碍船 1 号（ obs_1 ）、障碍船 2 号（ obs_2 ）和障碍船 3 号（ obs_3 ）分别与中心无人艇形成对遇、左舷交叉相遇和右舷交叉相遇情况。

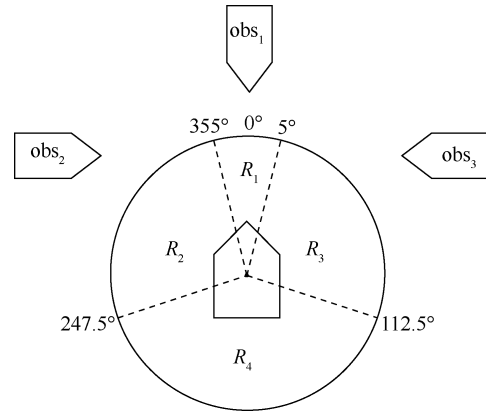


图2 船舶会遇类型

在 COLREGS 关于船舶航行危险的判断要素中，最关键的是障碍船与无人艇最近会遇距离（distance of closest point of approach, DCPA）和最近会遇时间（time of closest point of approach, TCPA）。DCPA（如图 3 所示）指无人艇坐标到相对速度直线的最小距离，最近会遇点（closest point of approach, CPA）为无人艇坐标到相对速度直线的垂足，TCPA 指障碍船抵达 CPA 的时间^[22]。

定义当前无人艇坐标为 pos_{usv} ，速度为 v_{usv} ， i 号障碍船坐标为 pos_{obs_i} ，速度为 v_{obs_i} ，无人艇与 i 号障碍船的相对速度为 v_r ，无人艇相对 i 号障碍船的位置向量与它们的相对速度之间的夹角为

φ_i , 无人艇与 i 号障碍船的距离、最近会遇距离、最近会遇时间分别为 d_{obs_i} 、 dcpa_i 、 tcpa_i 。相关定义如图 3 所示, 并有以下计算式:

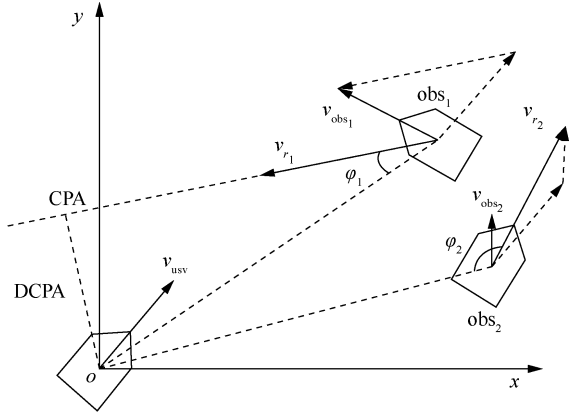


图3 最近会遇距离

$$v_{r_i} = v_{\text{obs}_i} - v_{\text{usv}} \quad (2)$$

$$d_{\text{obs}_i} = \|\text{pos}_{\text{usv}} - \text{pos}_{\text{obs}_i}\| \quad (3)$$

$$\varphi_i = \cos^{-1} \left[\frac{(\text{pos}_{\text{obs}_i} - \text{pos}_{\text{usv}}) \cdot v_{r_i}}{\|\text{pos}_{\text{obs}_i} - \text{pos}_{\text{usv}}\| |v_{r_i}|} \right] \quad (4)$$

$$\text{dcpa}_i = \begin{cases} d_{\text{obs}_i} \sin \varphi_i, \varphi_i \leq \frac{\pi}{2} \\ -d_{\text{obs}_i} \sin \varphi_i, \varphi_i > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{tcpa}_i = \begin{cases} \frac{d_{\text{obs}_i} \cos \varphi_i}{|v_{r_i}|}, \varphi_i \leq \frac{\pi}{2} \\ -\frac{d_{\text{obs}_i} \cos \varphi_i}{|v_{r_i}|}, \varphi_i > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (6)$$

无人艇相对障碍船的位置向量与相对速度之间的夹角 φ 决定着 DCPA 的符号。如图 3 所示, 无人艇相对 1 号障碍船的位置向量与它们的相对速度 v_{r1} 之间的夹角 φ_1 小于 90° , DCPA 符号为正, 两船还没有到达最近会遇点, 两船有互相靠近的趋势且可能存在碰撞危险。而无人艇相对 2 号障碍船的位置向量与它们的相对速度 v_{r2} 之间的夹角 φ_2 大于 90° , DCPA 符号为负, 此时两船已经通过最近会遇点, 碰撞危险已经消除, 两船有互相远离的趋势。

定义无人艇与各障碍船的危险标志为 U_i :

$$U_i = \begin{cases} 1, 0 \leq \text{dcpa}_i \leq d_1 \text{ 且 } 0 \leq \text{tcpa}_i \leq t_1 \\ 0, \text{其他} \\ -1, \text{dcpa}_i \geq d_2 \text{ 或 } \text{tcpa}_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, d_1 为紧急避让距离, t_1 为紧急避让时间, d_2 为安全航行距离, 可根据无人艇运动性能和航行环境而定。

$U_i = 1$, 最近会遇距离为正且小于 d_1 , 最近会遇时间为正且小于 t_1 时, 说明无人艇与障碍船有较大碰撞危险, 应采取紧急避碰措施或停止移动, 采取人工控制, 本文中采取停止移动; $U_i = -1$, 最近会遇距离大于 d_2 或最近会遇时间小于 0 时, 说明两船航行安全, 暂时没有碰撞危险; 其余情况下, 两船存在一定的碰撞可能, 需采取避碰措施。

针对 $U_i = 0$ 的情况, 对危险障碍船设置虚拟障碍, 具体如图 4 所示, 其中 obs 表示障碍船, v_{obs} 表示障碍船的速度。如图 4 (a) 所示, 在对遇的情况下, 前方障碍船右舷增加有限长障碍, 从而保证无人艇右拐, 从障碍船的左舷驶过。如图 4 (b) 所示, 在右舷交叉相遇的情况下, 在障碍船航行方向的水平分量上增加有限长障碍, 从而保证无人艇从右舷船后方通行。如图 4 (c) 所示, 在左舷交叉相遇的情况下, 障碍船理应为无人艇让行, 而无人艇无须改变航向, 所以不设置虚拟障碍。如图 4 (d) 所示, 在追越前方障碍船的情况下, 障碍船右舷增加有限长障碍, 从而保证无人艇左拐, 从障碍船的左舷驶过。

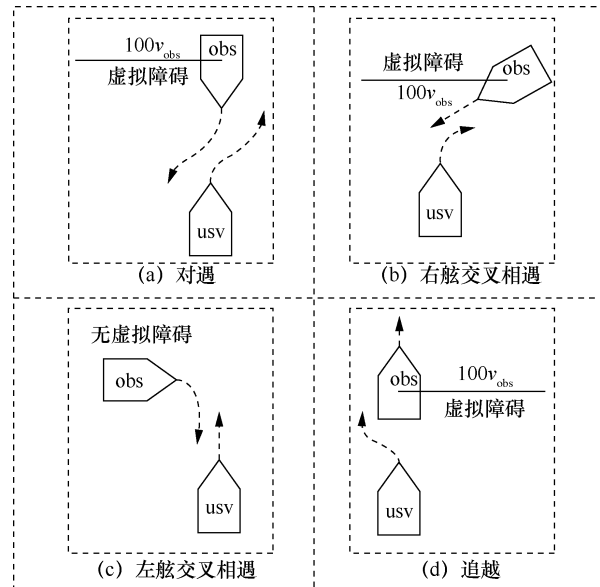


图4 虚拟障碍设计

1.4 节点拓展方式优化

1.4.1 动态碰撞检测

为了解决传统方法中将动态障碍当作静态障

碍处理的问题，并提高规划路径的可行性以适应复杂动态环境，本文方法为每个节点增加对应的航行时间，从而能够预测该节点对应的移动障碍的位置，实现动态避障，节点的时间信息同时还能代表路径长度，以便判断每条路径的优劣，减少单次规划的计算量。定义 node_i 、 $t(\text{node}_i)$ 为新生长 i 号节点及其时间， $\text{parent}_{\text{node}_i}$ 、 $t(\text{parent}_{\text{node}_i})$ 分别为新生长节点的父节点及其时间， v_{usv} 为无人艇行驶速度， v_{obs_j} 为 j 号障碍船的速度， $\text{pos}_{\text{obs}_j}^{\text{parent}_{\text{node}_i}}$ 为父节点对应的 j 号障碍船的位置。

新生长节点时间更新如下：

$$t(\text{node}_i) = t(\text{parent}_{\text{node}_i}) + \frac{\|\text{parent}_{\text{node}_i} - \text{node}_i\|}{|v_{\text{usv}}|} \quad (8)$$

新生长节点对应的 j 号障碍船位置更新方式如下：

$$\text{pos}_{\text{obs}_j}^{\text{parent}_{\text{node}_i}} = \text{pos}_{\text{obs}_j}^{\text{node}_i} + v_{\text{obs}_j} \cdot t(\text{node}_i) \quad (9)$$

改进后的节点同时具有空间和时间信息，检测碰撞不再是简单的固定障碍物的碰撞检测，不仅要考虑新生长节点是否与障碍船产生碰撞，还要考虑无人艇在两节点之间移动时与移动的障碍船是否产生碰撞。因此本文将传统碰撞检测方法优化为动态碰撞检测，在无人艇从父节点移动到子节点期间，障碍船也进行了移动，定义移动期间障碍船安全领域的全部移动范围为无人艇不可行区域。因此随机树上的可行节点应满足以下约束：

- (1) 子节点及其父节点在不可行区域外；
- (2) 在连接子节点与父节点的路径上，无人艇的安全领域与不可行区域没有交集。

动态碰撞检测过程如图 5 所示，其中，虚线外框表示的区域为不可行区域， $\text{pos}_{\text{obs}_1}^{\text{node}_2}$ 表示 2 号节点对应的 1 号障碍船的位置， $\text{pos}_{\text{obs}_1}^{\text{node}_4}$ 表示 4 号节点对应的 1 号障碍船的位置。新生长的 4 号节点的父节点为 2 号节点，无人艇从 2 号节点到 4 号节点的运动过程中，运动轨迹与 1 号移动障碍的运动轨迹（不可行区域）相交，因此判定 4 号节点产生碰撞，不能拓展该节点。在路径规划的采样阶段（新节点生长阶段）、重选父节点阶段和重布线阶段都需要进行子节点与父节点连接操作，因此都需要进行动态碰撞检测。

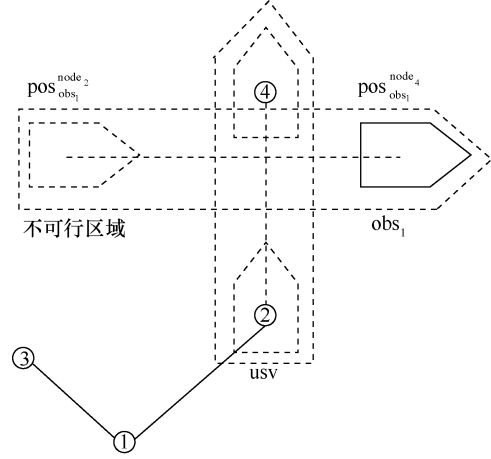


图 5 动态碰撞检测过程

1.4.2 节点拓展的角度约束

考虑到无人艇的操纵性能约束，无人艇无法迅速进行较大幅度的转向，本文对节点拓展增加了角度约束，从而保证规划路径的平滑性。在采样阶段、重选父节点和重布线阶段的节点拓展均需满足角度约束。节点扩展的角度约束如图 6 所示，若采样节点的航行方向与父节点航行方向的夹角大于阈值，则重新采样。设置阈值为 60° ，图 6 中节点 4 与其父节点 2 的航行方向夹角为 $\angle 1$ ，小于 60° ，因此该节点可以生长。新的节点 7 与父节点 2 的航行方向夹角为 $\angle 2$ ，大于 60° ，因此该节点不能生长。重选父节点和重布线阶段的节点拓展角度约束同理。

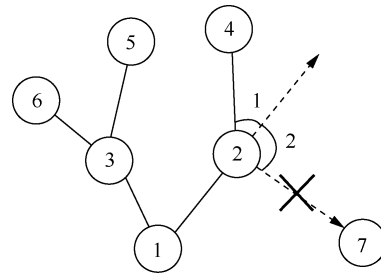


图 6 节点拓展的角度约束

特别地，约束角度阈值可根据无人艇的船长、船速以及水流状况等因素而调整。较小的约束角度阈值会增加一定的规划时间，实现更平滑的路径，较大的约束角度阈值则相反。

1.5 路径规划流程和规划结果

1.5.1 路径规划流程

在多移动障碍船的复杂动态环境下，由于水面环境、船舶运动性能等因素的影响，船体运动不完全等同于匀速直线运动，障碍船和无人艇的运动状

态会随时间而产生与预期不符的误差,因此除了起点进行路径规划,在无人艇运动过程中也要实时判断路径是否可行,若不可行则重新进行路径规划。同时,复杂动态环境对单次决策的要求更高,需要更快的规划、更优化的路径以保证无人艇的运动效率和安全性。因此,基于改进 RRT*-Smart 方法的单次路径规划流程设计如下。

(1) 更新参数:无人艇位置、障碍船的位置及速度、可行节点集合、缓存池等。

(2) 若存在上次规划的可行路径,对路径节点进行动态碰撞检测,判断是否可行,若全部可行,跳至步骤(11);若部分可行,保存至暂行路径。

(3) 判断本次规划时长是否大于单次规划时间 T_p ,若是,跳至步骤(11)。

(4) 根据优化后的采样规则进行采样,得到采样节点 $node_{rand}$ 。

(5) 找到 $node_{rand}$ 的初始父节点并判断 $node_{rand}$ 是否满足动态碰撞约束、角度约束,若不满足则返回步骤(3)。

(6) 更新 $node_{rand}$ 为 $node_{new}$,连接至其父节点,并将其加入可行节点集合 V 。

(7) 对 $node_{new}$ 邻域进行重选父节点和重布线。

(8) 判断 $node_{new}$ 是否在目标点附近,若是,将目标节点 $node_{goal}$ 的父节点设置为该节点,表示找到一条可行路径;否则,返回步骤(3)。

(9) 将本次规划路径节点存入历史路径缓存池。

(10) 判断缓存池是否大于规定长度,若是,则从旧路径进行截断。

(11) 结束本次规划,若存在可行路径,将路径节点传至路径跟踪控制器;若存在暂行路径,传送暂行路径节点至控制器;否则,传送停止信号至控制器。

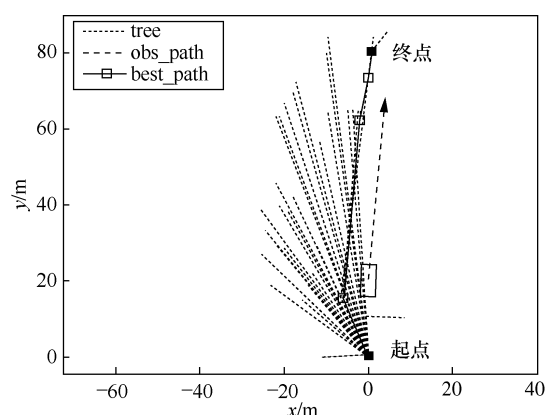
特别地,步骤(2)中的暂行路线是为了解决特殊环境下无法规划出可行路径的问题,使得无人艇尽可能快速地到达目标点;步骤(3)中,为了保证无人艇的运动控制效率,限制单次规划时间 T_p 为 0.5 s。

1.5.2 规划结果

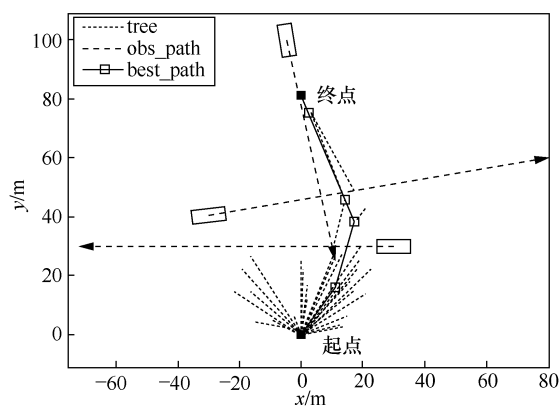
不同情况下路径规划结果如图7所示,其中, $tree$ 表示从起点生长的随机树, $best_path$ 表示规划的最终路线,矩形表示移动障碍船, obs_path 表示其运动轨迹。随机树以无人艇起点为根节点并向目标点方向生长,节点限制在椭圆形范围内,

由于动态碰撞检测和虚拟障碍设置,可能产生碰撞的区域和大部分违反避碰规则的区域都没有节点生长。

图7(a)表示无人艇追越前方障碍船的规划结果,前方障碍船右舷有虚拟障碍,因此节点只能在障碍船行驶方向左侧拓展。图7(b)表示同时存在3艘障碍船的规划结果,起主要作用的是右舷交叉船前方和对遇船右舷的虚拟障碍, $best_path$ 符合避碰规则。



(a) 追越情况



(b) 多船会遇情况

图7 不同情况下路径规划结果

2 实验

2.1 仿真环境及实验设置

为了模拟常见无人艇躲避多移动障碍船的行驶环境,仿真实验基于 VREP 平台,实验环境如图8所示。环境中包含安装了若干定位模块的船体模型、有波浪的水面,以机器人操作系统(robot operating system, ROS)话题的形式进行信息传输。船重 50 kg,船长 2 m,船宽 1 m,其中无人艇平均行驶速度为 1 m/s,移动障碍船位置、方位、速度随机,速度范围为 0.5~2 m/s,保持近似匀速直线运动。特别地,由

于船体模型在仿真环境中受到重力、浮力和阻力, 存在与实际情况近似的环境干扰。行驶速度综合考虑了实际小型无人艇的行驶速度、仿真船体的运动控制效果等因素(过小的速度无法体现环境的复杂性, 过大的速度则容易导致船体失控)。

节点生长的最小步长设置为 4 m, 在实际应用中步长应根据船舶大小、速度、船舶与目标点的距离进行适当调整; 单次随机点采样时间限制为 0.05 s, 采样概率 P_{goal} 、 P_{way} 、 P_{random} 分别为 0.3、0.2、0.5; 单次规划时间 T_p 为 0.5 s。

本节在 40 组仿真实验和对比实验的基础上, 主要展示 4 种特殊情况的实验结果。情况 1: 一艘对遇障碍船, 一艘右舷交叉障碍船。情况 2: 一艘超越船, 一艘右舷交叉船。情况 3: 一艘对遇船, 一艘左舷交叉船, 一艘右舷交叉船。情况 4: 随机三船会遇。

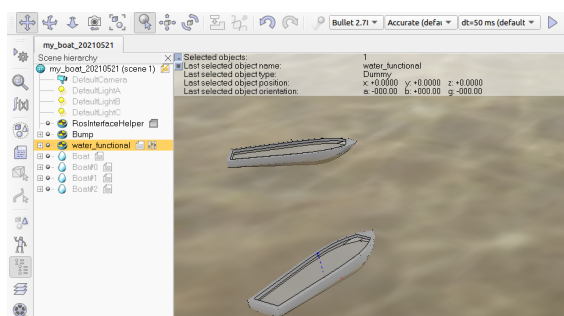


图8 VREP 仿真环境

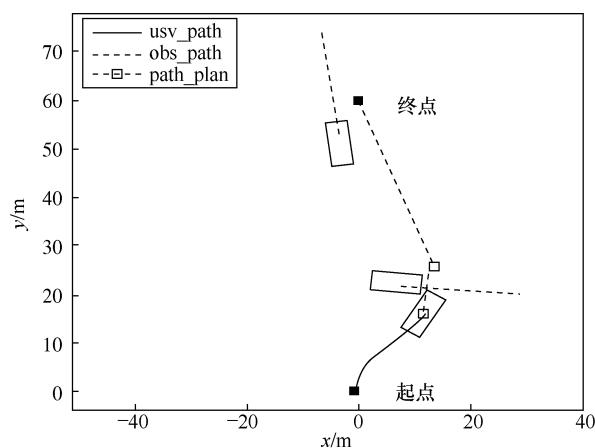
2.2 仿真实验

仿真实验主要展示本文方法在无人艇路径规划过程中的表现, 实验结果如图 9~图 12 所示。其中, path_plan 表示规划路径, usv_path 表示无人艇运动轨迹, 黑色矩形表示船体, obs_path 表示移动障碍船的运动轨迹。

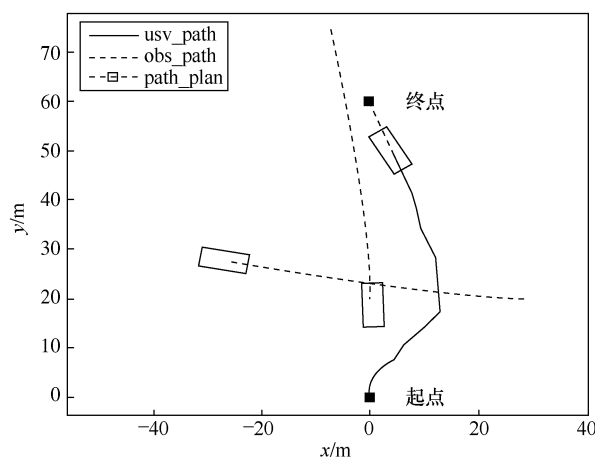
图 9 展示了情况 1 的实验结果。图 9 (a) 中起始阶段的 path_plan 表明规划路径符合右舷交叉避碰规则, 图 9 (b) 中最终的行驶路径表明无人艇运动符合对遇及右舷交叉避碰规则。图 10 展示了情况 2 的实验结果。图 10 (a) 中起始阶段的 path_plan 表明规划路径符合追越避碰规则, 图 10 (b) 中最终的行驶路径表明无人艇运动符合追越和右舷交叉避碰规则。图 11 展示了情况 3 的实验结果。图 11 (a) 中起始阶段的 path_plan 表明无人艇从左舷交叉船的后侧通过, 即将从右舷交叉船的后侧通过, 规划路径符合左右舷交叉

避碰规则。图 11 (b) 中最终的行驶路径也表明无人艇从右舷交叉船的后侧、对遇船的左舷通过, 运动符合避碰规则。图 12 展示了情况 4 的实验结果。图 12 (a) 中起始阶段, 前方和右方来船分别满足对遇船和右舷交叉船要求, 无人艇需要向右拐弯, 同时躲避左侧来船。无人艇行驶至图 12 (b) 所示位置时, 前方来船已不符合对遇情况, 因此无须进行特殊规避, 行驶路径安全且平滑。

特别地, 由于仿真实验中的水面有波浪且无人艇的运动控制存在一定时延、跟踪误差等, 因此规划路径与实际行驶路径会有偏差, 产生波动, 这与实际情况下的无人艇运动相符。另外, 由于路径规划是实时进行的, 规划的路径 (path_plan) 会随着无人艇的移动实时检测和更新: 检测已规划路径是否依然可行, 若不可行则重新规划。因此 path_plan 只是当前的路径参考, 并不代表最终的行驶轨迹。

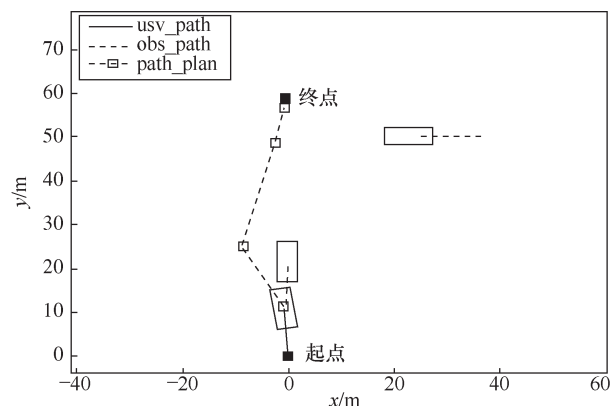


(a) 起始阶段

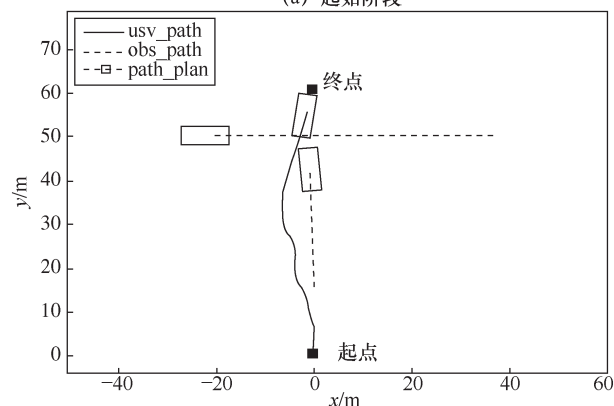


(b) 到达终点附近

图9 情况1的实验结果

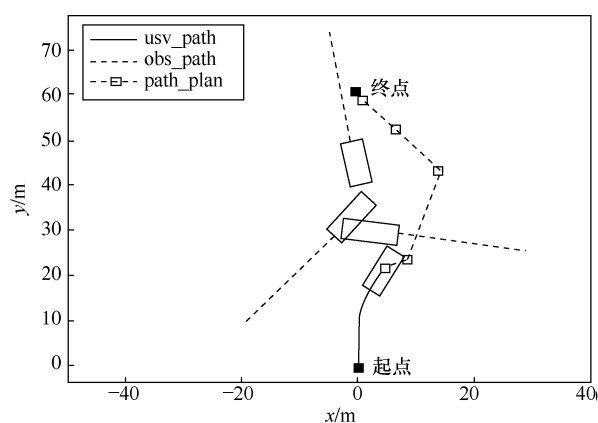


(a) 起始阶段

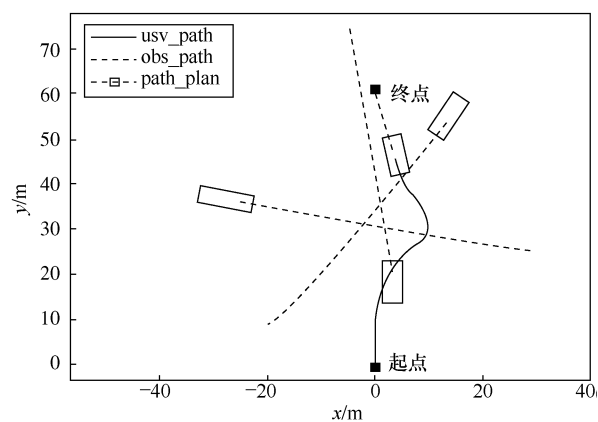


(b) 到达终点附近

图 10 情况 2 的实验结果

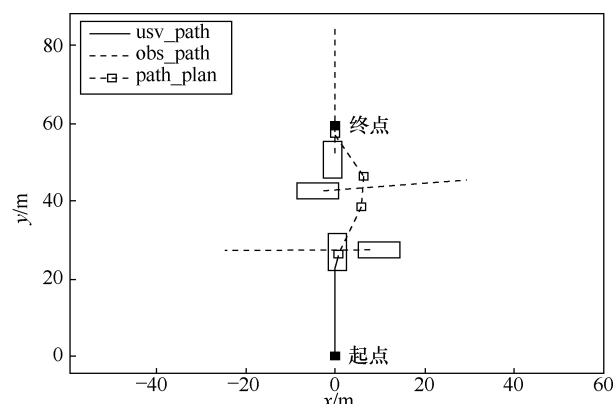


(a) 起始阶段

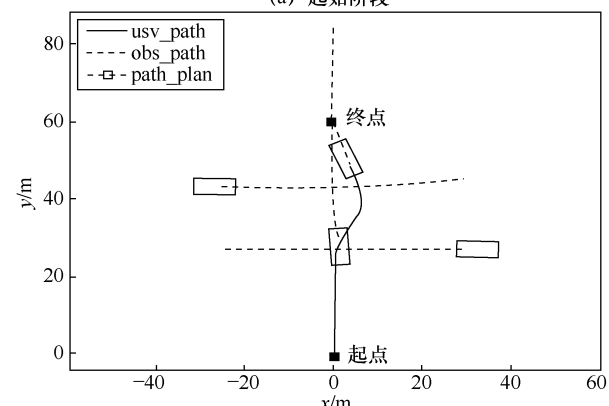


(b) 到达终点附近

图 12 情况 4 的实验结果



(a) 起始阶段



(b) 到达终点附近

图 11 情况 3 的实验结果

2.3 对比实验

本节针对本文方法（以下简称 RTSNew 方法）与人工势场法（APF）、传统 RRT*-Smart 方法进行了 40 组对比实验，4 种特殊情况的实验结果如图 13~图 14 所示。图 13 中，黑色矩形表示船体，OBS_Path 表示障碍船的运动轨迹，连接起点和终点的曲线表示不同路径规划方法下无人艇的运动轨迹，APF_Path 表示采用人工势场法的运动轨迹，RTS_Path 表示采用传统 RRT*-Smart 方法的运动轨迹，RTSNew_Path 表示采用 RTSNew 方法的运动轨迹。图 14 中，APF 表示人工势场法，RTS 表示传统 RRT*-Smart 方法，RTSNew 表示 RTSNew 方法。

情况 1 的路径和速度分别如图 13 (a)、图 14 (a) 所示。按照避碰规则，无人艇应从右舷交叉船后侧通过，从对遇船的左舷通过。图 13 (a) 显示，RTSNew_Path 符合避碰规则且路径平滑。APF_Path 和 RTS_Path 表明无人艇从右侧来船的前方通过，不符合避碰规则。RTS_Path 左方有一个明显的转折，表明无人艇运动过程中出现较大转向。图 14 (a) 显示，RTSNew 方法到达目标耗时

最短且速度平稳没有较大波动,与 APF 表现相似,传统 RRT*-Smart 方法有停顿且耗时最长。实际行驶过程中,仅 APF 下的无人艇与障碍船产生了轻微的碰撞。由 RTS_Path 和 APF_Path 的起始阶段可看出,传统方法从起始点规划了一条从左侧绕过右方障碍船的路径,无人艇为了躲避左移的障碍船不停地向左偏,直到障碍船不再阻挡无人艇到目标点的运动,无人艇才右转,从而导致了停顿和较大转折。

情况 2 的路径和速度分别如图 13 (b)、图 14 (b) 所示。根据避碰规则,从前方船只左舷通过实现超越,从右舷交叉船后侧通过。图 14 (b) 显示,RTSNew_Path 符合避碰规则,APF_Path 和 RTS_Path 从前方船只的右舷追越,不符合避碰规则,并且路线转折较大且绕远,原因与情况 1 相同。图 13 (b) 显示,RTSNew 方法下无人艇到达目标耗时最短,有较小波动,APF 和传统 RRT*-Smart 方法时较长且后者存在较小波动。实际行驶过程中,3 种方法下的无人艇均未与障碍船产生碰撞。

情况 3 的路径和速度分别如图 13 (c)、图 14 (c) 所示。根据避碰规则,无人艇需从对遇船左舷通过,从右舷交叉船后侧通过,图 13 (c) 显示,3 种方法均符合避碰规则,但传统方法下的运动路径绕远,原因与情况 1 相同:被左方来船逼迫绕远。图 14 (c) 显示,RTSNew 方法耗时最短且产生 1 次波动,传统 RRT*-Smart 方法耗时较长且在躲避左方来船时产生大幅减速或停顿,APF 虽然没有停顿但路径绕远耗时最长。实际行驶过程中,传统方法下的无人艇与左方障碍船产生轻微碰撞。

情况 4 的路径和速度分别如图 13 (d)、图 14 (d) 所示。图 13 (d) 显示,RTSNew_Path 路径较短且较平滑,APF_Path 和 RTS_Path 有较大转折且绕远。图 14 (d) 显示,RTSNew 方法耗时最短,APF 次之,传统 RRT*-Smart 方法速度波动较大且耗时最长。3 种方法都在行驶过程中存在大幅减速让行的情况,但根据实际行驶情况,传统方法产生停顿的原因是前期路径规划欠佳,被障碍船逼迫绕远而产生转折停顿;RTSNew 方法则综合考虑了路径的安全性、高效性、节能性,过于复杂危险的环境下应停顿,等待障碍船驶离再前行,这样既安全又节省能源和时间,而不该像传统方法那样选择绕远且危险的路径。实际行驶过程中,传统方法下的无人艇与障碍船产生轻微碰撞。

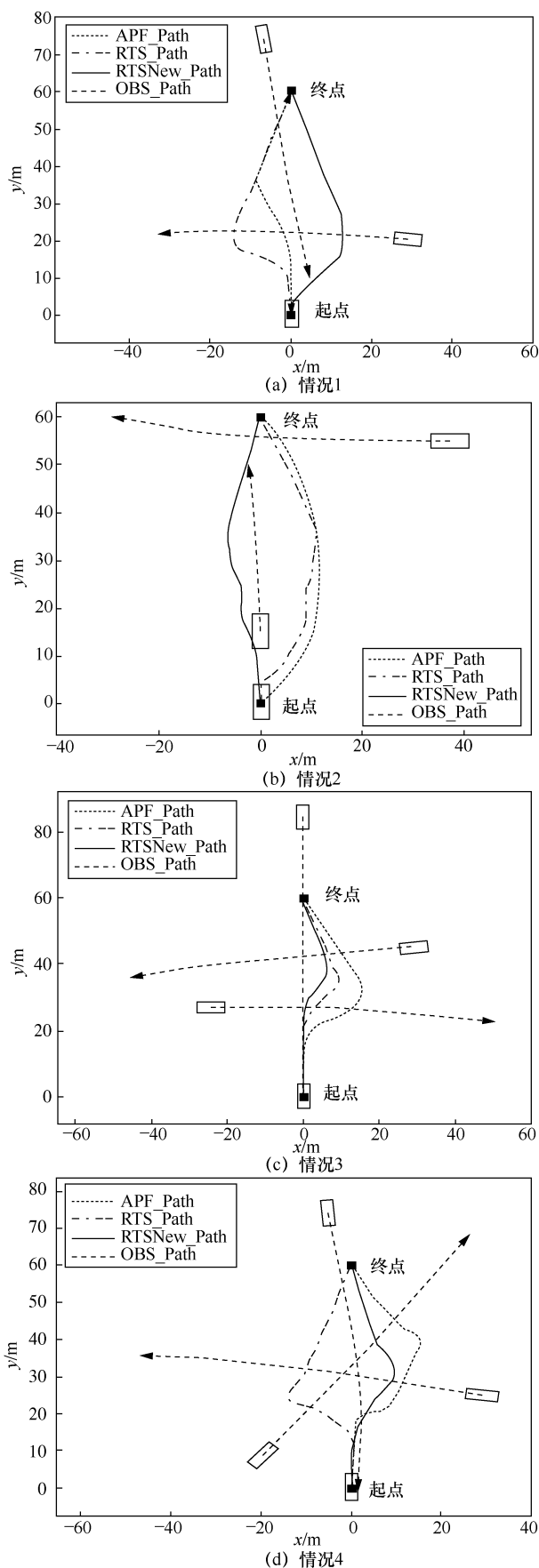


图 13 对比实验路径

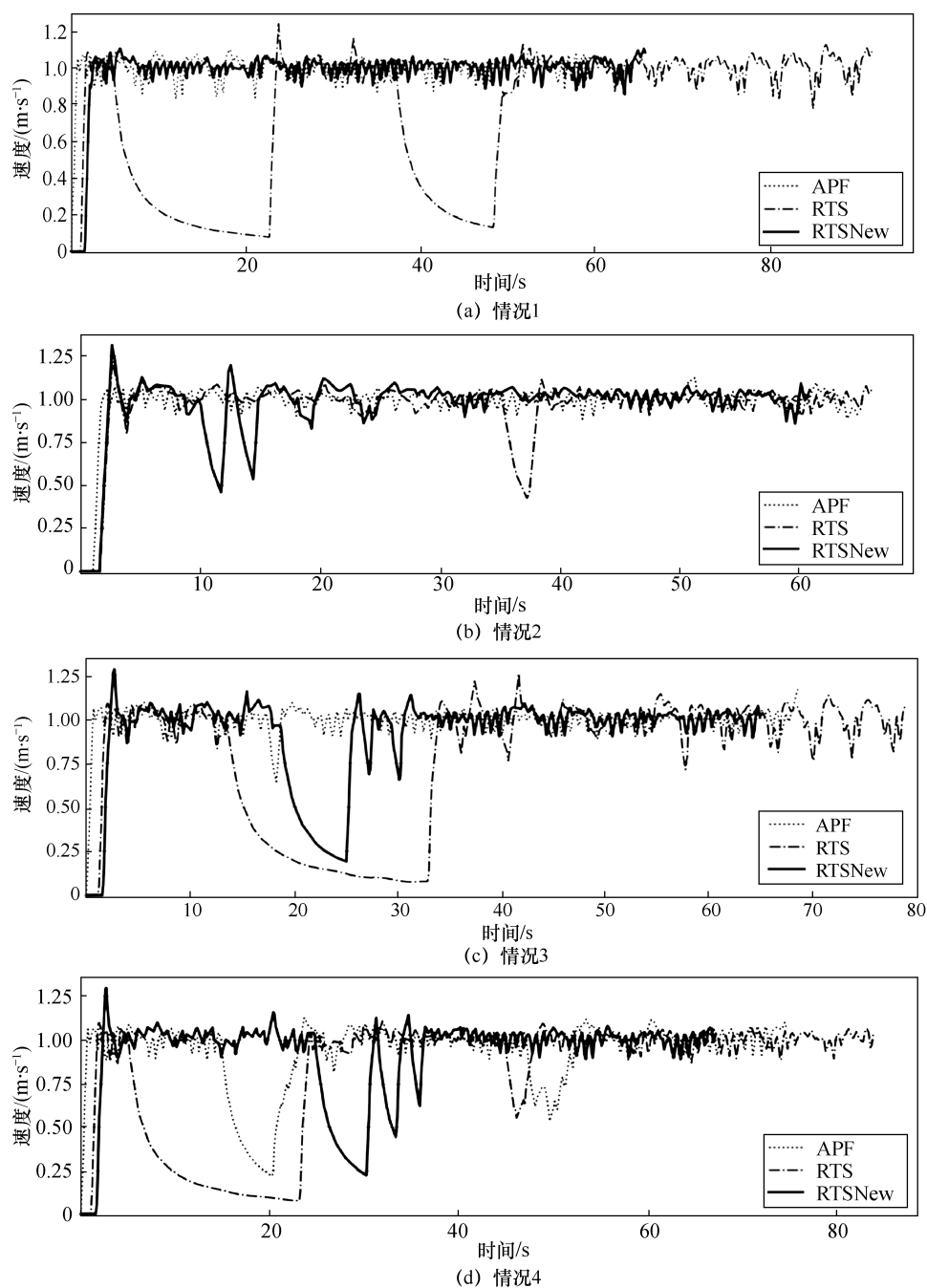


图14 对比实验速度

40组对比实验中3种方法的表现情况见表1。

表1 对比试验结果统计

方法	平均用时/s	平均行驶 路径/m	违反避碰 规则次数/次	碰撞次数/次
APF	72.3	87.8	11	5
RTS	80.1	78.3	7	8
本文方法	64.2	69.6	0	1

根据表1, 在平均用时、平均行驶路径、违反

避碰规则次数和碰撞次数方面, 本文方法比其他两种方法表现优异。在对比实验中, 传统方法容易导致无人艇运动不符合避碰规则、绕远、产生较大转折和碰撞等, 主要有以下原因。

(1) 传统方法没有根据避碰规则对规划方法进行特殊处理, 只考虑路径可到达而不考虑是否符合规则, 从而导致无人艇运动不符合避碰规则。

(2) 传统方法在规划路径时, 将移动障碍当作静止障碍, 只考虑躲避障碍当前所在区域, 而不考

虑障碍的移动情况。

(3) 传统方法对路径没有转折角度约束, 因此容易造成规划的路径产生较大转折。

(4) 传统方法计算量较大, 每次规划所用时间较长, 而无人艇一直在运动, 规划前采集的环境信息和规划后无人艇的实际环境有较大变化, 导致无人艇运动控制滞后严重, 最终执行效果不好。

实验结果表明, 本文提出的改进 RRT*-Smart 方法解决了上述问题, 不仅规划速度快, 保证遵守避碰规则, 还能保证路径短且平滑, 使无人艇在移动障碍船的复杂环境下安全行驶。

3 结束语

本文设计了一种针对复杂动态环境下的无人艇路径规划方法, 在传统 RRT*-Smart 方法上优化了节点采样方式、改进了节点拓展方式, 并且对移动障碍船增加虚拟障碍, 使得规划路径符合海上避碰规则。基于 VREP 平台进行了无人艇航行仿真实验和对比实验, 结果表明, 相较于传统的人工势场法和 RRT*-Smart 方法, 本文方法在多障碍船的复杂动态环境下表现优异: 规划效率高, 路径更短、更平滑, 碰撞次数更少, 并且保证无人艇航行路径遵循《国际海上避碰规则》。

参考文献:

- [1] ZHOU C H, GU S D, WEN Y Q, et al. The review unmanned surface vehicle path planning: based on multi-modality constraint[J]. Ocean Engineering, 2020, 200: 107043.
- [2] SHI B H, SU Y X, WANG C, et al. Study on intelligent collision avoidance and recovery path planning system for the water-jet-propelled unmanned surface vehicle[J]. Ocean Engineering, 2019, 182: 489-498.
- [3] WANG H J, GUO F, YAO H F, et al. Collision avoidance planning method of USV based on improved ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 52964-52975.
- [4] CHEN Y L, BAI G Q, ZHAN Y, et al. Path planning and obstacle avoiding of the USV based on improved ACO-APF hybrid algorithm with adaptive early-warning[J]. IEEE Access, 2021, 9: 40728-40742.
- [5] 吕进锋, 马建伟, 李晓静. 基于改进的随机路径图及和声算法的舰船航线规划[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2551-2559.
- [6] LYU J F, MA J W, LI X J. Route planning based on improved probabilistic roadmap and harmony search[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2551-2559.
- [6] 敖邦乾, 杨莎, 叶振环. 改进蚁群算法水面无人艇平滑路径规划[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 1006-1014.
- [7] AO B Q, YANG S, YE Z H. Improved ant colony algorithm for unmanned surface vehicle smooth path planning[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(7): 1006-1014.
- [7] XIA G Q, HAN Z W, ZHAO B, et al. Local path planning for unmanned surface vehicle collision avoidance based on modified quantum particle swarm optimization[J]. Complexity, 2020: 3095426.
- [8] SUN X J, WANG G F, FAN Y S, et al. Collision avoidance of podded propulsion unmanned surface vehicle with COLREGs compliance and its modeling and identification[J]. IEEE Access, 2018, 6: 55473-55491.
- [9] XU X L, LU Y, LIU X C, et al. Intelligent collision avoidance algorithms for USVs via deep reinforcement learning under COLREGs[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107704.
- [10] GUO S Y, ZHANG X G, ZHENG Y S, et al. An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(2): 426.
- [11] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(7): 846-894.
- [12] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Randomized kinodynamic planning[J]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400.
- [13] KUWATA Y, TEO J, FIORE G, et al. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(5): 1105-1118.
- [14] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random trees: progress and prospects[M]//Algorithmic and computational robotics. [S.l.]: A K Peters/CRC Press, 2001.
- [15] ISLAM F, NASIR J, MALIK U, et al. RRT-Smart: rapid convergence implementation of RRT towards optimal solution[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1651-1656.
- [16] GAMMELL J D, SRINIVASA S S, BARFOOT T D. Informed RRT: optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic[C]//Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.:s.n.], 2014: 2997-3004.
- [17] 莫松, 黄俊, 郑征, 等. 基于改进快速扩展随机树方法的隐身无人机突防航迹规划[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3): 375-385.
- [18] MO S, HUANG J, ZHENG Z, et al. Stealth penetration path planning for stealth unmanned aerial vehicle based on improved rapidly-exploring-random-tree[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(3): 375-385.
- [18] 汪琴, 张波涛, 宋士吉. 期望时间下的移动机器人目标搜索路径规划[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(7): 1451-1460.
- [19] WANG Q, ZHANG B T, SONG S J. Path planning of target search for mobile robot with expected time[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(7): 1451-1460.
- [19] 许万, 杨晔, 余磊涛, 等. 一种基于改进 RRT* 的全局路径规划算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 829-838.
- [19] XU W, YANG Y, YU L T, et al. A global path planning algorithm based

on improved RRT*[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 829-838.

- [20] 庄佳园, 张磊, 孙寒冰, 等. 应用改进随机树算法的无人艇局部路径规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1): 112-117.

ZHUANG J Y, ZHANG L, SUN H B, et al. Improved rapidly-exploring random tree algorithm application in unmanned surface vehicle local path planning[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(1): 112-117.

- [21] 欧阳子路, 王鸿东, 王检耀, 等. 基于改进Bi-RRT的无人水面艇自动避碰算法[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 8-14.

OUYANG Z L, WANG H D, WANG J Y, et al. Automatic collision avoidance algorithm for unmanned surface vessel based on improved Bi-RRT algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 8-14.

- [22] 秦梓荷. 水面无人艇运动控制及集群协调规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

QIN Z H. The study on motion control and swarm coordinated planning for unmanned surface vehicles(USV)[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[作者简介]



董璐(1990—), 女, 博士, 东南大学网络空间安全学院副研究员, 主要研究方向为多智能体强化学习。



熊爱玲(1996—), 女, 东南大学自动化学院硕士生, 主要研究方向为无人艇路径规划。