

水面无人艇路径规划的现状与挑战

赵亮¹, 王芳², 白勇¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学城市学院 信息与电气工程学院, 杭州 310015)

摘要: 近年来, 随着人工智能技术的发展, 水面无人艇(USV)成为了海洋工程的研究热点, 而路径规划问题一直都是无人船艇智能化进程中的一项关键技术。文章首先介绍了现有路径规划的环境建模方法, 并对比了各种方法的特点。根据无人艇对环境信息的获取程度, 分别从全局路径规划、局部路径规划、近程反应式危险规避和运动规划等4个维度综述了路径规划方面的最新研究成果, 总结了学术界对各种算法改进的切入点。最后探讨了当前无人艇路径规划领域面临的挑战和研究重点, 未来对USV路径规划研究应该在实时海况数据的利用、控制器协同、COLREGS的融合、复杂海况的规避、碰撞危险评估模型的完善、路径评价体系的建立等方面重点开展。

关键词: 水面无人艇; 路径规划; 关键技术; 发展现状

中图分类号: TP18; U664.82 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2022.04.01

Current Status and Challenges of Unmanned Surface Vehicle Path Planning

ZHAO Liang¹, WANG Fang², BAI Yong¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In recent years, with the development of AI technology, unmanned surface vehicle(USV) has become a popular research field in ocean engineering, and path planning has always been a key technology in the process of unmanned ship intelligence. The existing path planning environment modeling methods are first introduced, and the characteristics of various methods are compared. According to the known degree of environmental information of unmanned surface vehicles, the latest researches are reviewed from 4 categories: global path planning, local path planning, collision avoidance and motion planning. Also, the improvement methods of the algorithms are summarized. Finally, the current challenges and future research focus in the field of USV path planning are discussed. The future research on USV path planning should focus on the utilization of actual sea state data, controller coordination, COLREGs fusion, avoidance of complex sea states, improvement of collision risk assessment model, establishment of path assessment system, etc.

Key words: unmanned surface vehicles; path planning; key technology; development status

0 引言

水面无人艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)即水面机器人, 是一种支持无人操作的船舶, 它只需要驾驶员在安全地点进行极少量的远程操作便能执行任务。USV在海洋数据采样、海上搜索和救援、港口船舶管理、内河交通^[1]等方面发挥着重大作用。目前, 在军事领域, 水面无人艇技术发展最成熟的国家是美

国和以色列, 美国海军研发的Spartan Scout、Seadoo Challenger 2000和MUSCL等水面无人艇可用于执行情报收集、反潜作战、监视和侦察等任务; 以色列海军的Protector、Stingary和Silver Marlin能够进行海岸物标识别、智能巡逻和电子战争等。在民用领域, 英国Plymouth大学的Springer可用于内河、水库和沿海等浅水域污染物追踪和环境测量; 中国的云洲智能将

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2022-02-21

作者简介: 赵亮(1997—), 男, 博士研究生。研究方向: 水面无人艇自主导航与运动控制。

通信作者: 白勇(1963—), 男, 博士、挪威技术科学院院士。研究方向: 海洋结构工程与海洋人工智能应用。

无人船应用于环境监测，可进行在线水质污染和核污染监测。

路径规划，即依据某些优化准则在工作空间中找到一条从起始到目标点的最优安全路径。路径规划问题一直都是水面无人艇领域的研究重点，在之前的研究中，已经有很多综述类文章^[2-5]对路径规划相关的问题进行了总结，但都是针对性地探讨某些方面，缺乏系统性的综述。刘佳等^[2]对各种算法的特点作了系统介绍，然而作者更注重算法原理，忽略了环境建模、避碰规则以及船舶操纵特性等因素对路径规划的影响；陈华等^[3]和 POLVARA 等^[4]详细介绍了路径规划相关的算法，但仅仅是从原理上进行介绍，没有对其优劣势和改进方法进行评价和总结；CAMPBELL 等^[5]对 USV 的发展进行了深入探讨，但侧重于控制相关的内容。除此之外，上述文献均从全局路径规划和局部路径规划这 2 个方面来总结，没有包含近程反应式危险规避和无人船运动规划等方面的内容。

相比于其他的研究综述，本文内容更加全面，具

体包括 4 个方面：1) 介绍了水面无人艇路径规划常用的几种环境建模方法，并将其优缺点进行对比分析；2) 跟进目前水面无人艇路径规划方面的最新研究进展，对各种算法及其改进算法进行评估，总结了学术界对各种算法改进的切入点；3) 除了全局路径规划和局部路径规划外，还总结了近程反应式危险规避和无人船运动规划的内容，包括碰撞危险度模型、船舶领域模型、避碰算法、运动规划与控制算法等；4) 综合近年来关于路径规划的文献，并为学者们提供未来的研究方向和重点。

1 图形环境建模

环境建模一般是从图形学的角度出发，将现实的物理空间抽象成算法可以处理的抽象空间，实现相互之间的映射^[2]。合适的环境模型有助于更好地理解环境变量，减少不必要的规划和计算。常用的环境建模方法有可视图空间法、Voronoi 图法和栅格法等，各种方法的优缺点对比见表 1。

表 1 常用环境建模方法对比

环境建模方法	优点	缺点
可视图法	能搜索到全局最优路径	时间复杂度高；有发生碰撞的危险
Voronoi 图法	搜索速度快；保证路径的安全性	搜索节点有局限性，路径较长；需要依赖定位传感器
栅格法	搜索速度可以根据网格密度调节	搜索性能有限，得不到全局最优路径；冗余点多

可视图法采用多边形表示障碍物，每个端点都与其所有可见顶点相连（见图 1），多边形的顶点连接其所有相邻点，因此无人船可以沿多边形边缘移动，通过搜索这些路线的集合，挑选出最佳路径。可视图法的优点在于可以寻找出全局最优路径，缺点是搜索时间复杂度为 $O(n^2)$ ， n 指代问题规模，并且可能会发生碰撞，具体见图 1。

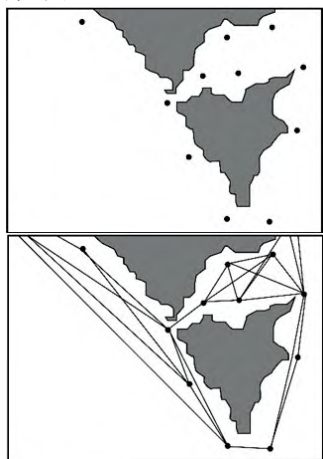


图 1 可视图法

Voronoi 图是由一组连接两邻点连线构成的连续多边形组成，具体见图 2^[6]。相比于可视图法，Voronoi 图计算速度更快，时间复杂度为 $O(n \log n)$ ，且可保证

默认情况下生成的是最安全的路径，但必须利用到定位传感器（如 LiDAR）进行准确计算举例。Voronoi 图主要的缺点在于其搜索的节点存在局限性，生成的路径往往会偏长。

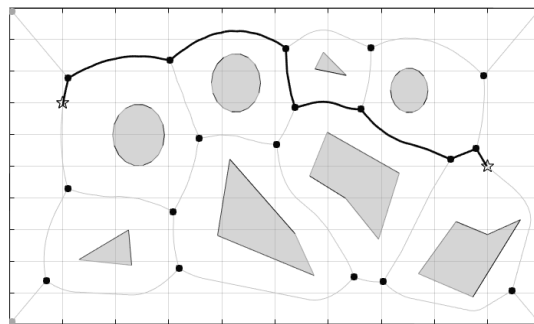


图 2 Voronoi 图

栅格法将工作空间离散化成多个矩形区域，即网格，再通过算法搜索从初始网格到目标网格的最短路径，见图 3^[7]。栅格法的搜索速度主要取决于网格的密度，可以根据地图的复杂程度进行调节，如果网格线之间的距离过大，搜索速度加快，但地图的精确度降低；如果网格线之间的距离过小，那么搜索时间将大幅度提升。栅格法的缺点在于其搜索性能有限，每次只能搜索 8 个或者 16 个方向，再加上网格的锯齿效应带来一系列的冗余点，很难得到最优路径。

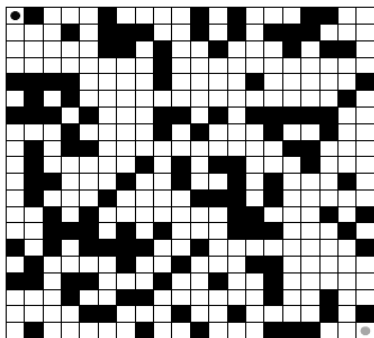


图3 栅格地图

2 全局路径规划

全局路径规划是基于全局海洋信息的静态环境地图进行的路径规划。水面无人艇的全局路径规划方法主要有进化算法和启发式搜索算法，这2种算法的特点与改进方法见表2和表3。进化算法可适应复杂的环境，改进的方法也更加多样化，易陷入局部最优状态，大多数情况下只能找到次优解。而启发式算法可找到最短的路径，但随着计算范围的增加，会消耗更多的时间和内存，缺乏适应性。

表2 主要的进化算法对比分析

项目	遗传算法	蚁群算法	粒子群优化算法
优势	鲁棒性好、适应性强	鲁棒性好、适应性强、容易与其他算法结合	计算简单、搜索速度快
缺点	局部搜索能力差、非全局最优、早熟收敛	参数难以平衡、算法初期速度慢、陷入局部最优	陷入局部最优、早熟收敛
个性化改进方案	引入新的算子和规则；与其他算法融合	搜索策略优化；参数自适应调整；与其他算法融合	结合启发式算子，加快初期搜索效率；引入新的搜索规则；与其他算法融合
共性改进方案	路径优化处理；与国际海上避碰规则（International Regulation for the preventing Collision at Sea, COLREGS）相结合；考虑海流、海浪、风的因素；多目标优化		

表3 启发式搜索算法对比分析

项目	A*算法	Dijkstra 算法
优势	全局最优；相对于 Dijkstra 引入了启发信息，效率更高	全局最优
缺点	缺乏适应性	缺乏适应性、算法低效
个性化改进方案	优化启发函数、改变环境建模方法	分层搜索、改进数据结构、加入启发信息
共性改进方案	双向搜索、扩大搜索角度；引入路径优化规则，如安全距离、视线制导；优化环境模型	

2.1 进化算法

遗传算法是最常用的优化工具之一，由 HOLLAND^[8]提出。遗传算法的优点是有较强的鲁棒性和适应性，但其局部搜索能力较弱，容易产生冗余点，难以得到最优路径。学术界对遗传算法的改进通常包括：1) 进化算子的改进或引入新的搜索规则；2) 其他算法进行融合。

TAM等^[9]提出了一种结合 COLREGS 规则的遗传算法，并且考虑了船舶的速度和转向角度等动力学因素，将其应用于船舶近距离避障。CAO^[10]基于 Voronoi 图提出了一种基于多处理器的遗传算法，当一个处理器进行决策时，另一个处理器同时预测所有可能目标的演化过程，预先筛选出优秀的个体，从而大大降低了搜索时间。ZHANG 等^[11]提出了一种遗传算法与模拟退火算法的混合方法，将插入算子和删除算子引入遗传算法中来提高算法的效率，同时利用 Metropolis 准则改善了算法的局部搜索性能和收敛速度。SZLAPCZYNSKI^[12-13]的一系列研究利用遗传算法解决了多个船舶相遇的路径规划问题，并且将其应用于能见度低的环境中。

蚁群算法最初由 DORIGO 等^[14]提出，这种算法的

优点在于强鲁棒性和适应性，且易与其他算法结合。而缺点在于，若初期缺少信息素，则会降低算法的求解速度。同时，蚁群算法对初始参数的要求较高。学术界对蚁群算法的优化主要从3个方面进行：1) 基于搜索策略的优化；2) 基于参数自适应的调整；3) 与其他优化算法相结合。

WU 等^[15]对蚁群算法的搜索策略进行了改进，引入了返回和死亡机制，如果蚂蚁周围没有可行的解，将返回上一个节点，如果返回之后搜索不到其他可行节点，那么蚂蚁死亡。这种方法屏蔽了无效路径的影响，提高了搜索效率。封声飞等^[16]对算法进行了自适应调整，在状态转移概率中引入了转角启发信息，提高了搜索的效率，同时在迭代次数达到阈值后会重新调节信息素挥发系数和浓度，避免算法进入局部最优。LAZAROWSKA^[17]利用试验船 Horyzont II 的航行数据模拟实际海洋环境，并在仿真平台上验证了蚁群算法在真实海洋条件下依然具有良好的安全性和实用性。

粒子群优化算法是一种形式较为简单的智能优化算法，由 EBERHART 等^[18]于 1995 年提出。粒子群算法与其他智能算法相比，其优势在于计算简单且容易实现，但容易陷入局部最优。

SHEN 等^[19]将传统粒子群优化算法应用到切线图中, 类似地, LIU 等^[20]利用混沌序列和多人口机制对粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 进行改进, 然后再应用于切线图中。虽然一种算法的收敛性和搜索能力都得到了提高, 但二者都是先通过 Dijkstra 算法生成链接图, 再利用 PSO 对各个节点进行优化, 这种方法从根本上限制了 PSO 的使用范围。HU 等^[21]提出了一种将分级排序规则融入到多目标 PSO 的算法, 在迭代过程中有针对性地选择更符合要求的粒子, 从而优化了算法的过程。MA 等^[22]提出了动态增强多目标 PSO 算法, 可同时优化路径的长度、光滑度、经济性和安全性等 4 个目标, 并且在环境建模时还考虑了海流的影响。

2.2 启发式搜索算法

A*算法由 HART 等^[23]在 1968 年提出, 是一种基于启发函数的图搜索算法, 用于寻找 2 个节点之间最短的路径。相对于其他启发式搜索算法, A*算法效率更高, 能够保证以最小的成本返回最短路径。但其缺点是适应性差, 需要消耗大量的时间和储存空间, 同时算法生成的锯齿状路径对船舶的航行不利。

SONG 等^[24]对 A*算法进行了改进, 将算法的搜索范围扩大了 1 倍, 利用 3 种路径优化方法解决了转折过多的问题, 并且将其运用到了无人船 “Springer” 系统中。YANG 等^[25]提出了 “有限角度 A*算法 (FFA*)”, 在扩大搜索范围的同时引入了安全距离和视线制导的规则, 保证了路径的有效性和合理性。WANG 等^[26]将改进的 A*算法用在了六边形网格地图中, 提升了算法的效率, 并且将 “引导值” 加进了启发函数当中, 解决了启发函数相同时的决策问题。CHEN 等^[27]提出了 A*BG 算法, 这种算法保留了 A*VG 可搜索全局最优路径的优点^[28], 并且证明该算法的速度要优于传统的 A*, 但试验中没有考虑近海基础设施和算法实时信息的数据, 其实用性还有待验证。综上可知, 学术界对 A*算法的改进主要包括: 1) 扩大邻接点的搜索数目, 改进搜索规则; 2) 启发函数的改进; 3) 优化路径; 4) 采用不同的环境建模方法。

Dijkstra 算法由 DIJKSTRA^[29]在 1959 年提出, 是一种经典的最短路径搜索算法。Dijkstra 算法在搜索的过程当中执行了很多与最短路径无关的顶点计算, 当情况较复杂的时候, 算法的效率较低。目前学术界对 Dijkstra 算法的改进通常分为 3 种: 1) 基于搜索策略的优化, 如扩展搜索区域; 2) 优化数据储存结构; 3) 优化环境模型, 如分层搜索。

CHENG 等^[30]对 Dijkstra 算法的搜索策略进行了改进, 将多个角度纳入搜索范围之内, 用栅格地图验证了本方法比传统 Dijkstra 和八方向搜索的 Dijkstra 得到的路径距离更短。SEKARAN 等^[31]提出 Dijkstra 的改进算法, 只计算距离最近的节点, 减少了不必要

的节点计算, 节省时间的消耗, 并且在 V-REP 试验平台上验证了该算法的实用性。GUO 等^[32]在算法中引入了运行时间计算机制, 当出现多条路径长度相等的情况时, 通过运行时间计算出最优的路径。康文雄等^[33]提出了分层 Dijkstra 算法, 该算法利用分层结构, 可实现对搜索进度的保存与回溯等操作, 该算法虽不一定能找到理论最优解, 但在数据量大的时候可以快速找到次优解。

3 局部路径规划

局部路径规划依靠传感器获取周围环境信息和无人船的位置, 将各种传感器信息融合后建立环境模型, 再通过算法进行路径规划。主要的算法包括人工势场法、快速扩展随机树法和动态窗口法等。

3.1 人工势场法

人工势场法 (Artificial Potential Field, APF) 最早由 KHATIB^[34]提出, 是水面无人艇局部路径规划的一种常用算法。人工势场法具有模型结构简单、计算快速和实时性强等多个优点, 但可能会出现局部最优、受力平衡、斥力大于吸引力等不利情况。综合近年来的研究, 学者们对人工势场法的改进切入点包括 3 类: 1) 修改引力和斥力的势场模型; 2) 与其他算法相结合; 3) 采用不同环境建模方法。

MIELNICZUK^[35]将人工势场法运用于船舶航线生成中, 利用 4 种不同的障碍物情景进行了有效性验证, 结果表明, 人工势场法能够快速、高效地找到一条安全的航线, 但没有解决局部最优问题。LAZAROWSKA^[36-37]在一系列研究中提出了离散人工势场法 (Discrete Artificial Potential Field, DAPF), 将环境模型离散化为栅格地图, 再根据 COLREGS 和计算规则确定了每个栅格的势能, 分别在静态和动态障碍物环境下验证了算法的有效性, 结果表明, 该算法不仅能高效快速地计算出安全路径, 而且也解决了局部最优和受力平衡等问题。LYU^[38]提出了 “路径引导人工势场法”, 该算法考虑了 COLREGS 规则和船舶操纵特性, 同时在运行过程中可快速根据环境的变化及时反馈信息, 并做出路径调整, 但本文仅对船舶的转向角做出了限制。

3.2 快速扩展随机树

快速扩展随机树 (Rapidly-exploring Random Tree, RRT) 最早由 LAVALLE^[39]提出, 该方法适合解决多自由度机器人在复杂环境下和动态环境中的路径规划, 但生成的最终路径不是最优。

对 RRT 算法的改进可以从 3 个方面切入: 1) 引入启发信息, 使探索过程不再随机化; 2) 改变搜索策略, 如扩展搜索方向、引入新规则; 3) 与其他算法结合。CHIANG 等^[40]提出了一种结合 COLREGS 的改进 RRT 算法, 通过 RRT 的增长期间对其他船舶进行联

合仿真来实现的，从而预测未来发生的碰撞。仿真结果表明，相比基于模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）与 APF 的避障算法，该算法拥有更高的成功率，但仿真没有考虑到风、浪、海流的影响。庄佳园等^[41]设计一种基于改进 RRT 算法的局部路径规划方法，在生长时加入了衡量节点探索失败次数的抑制因子，使探索不再随机发生，同时限制了最大转角，使规划航迹趋于实用。该算法提高了搜索效率，并且符合实际的无人船跟踪路径，缺点是没有考虑 COLREGS 规则 and 实际环境的影响。

3.3 动态窗口方法

动态窗口方法（Dynamic Window Approach, DWA）是一种常用的路径规划方法，最初由 FOX 等^[42]于 1997 年提出。该算法在速度空间中采样多组速度值，并模拟机器人在各速度下生成的轨迹，在时间最

短内达到目标点即为最优解。

WANG 等^[43]提出了一种 DWA 与 A*算法结合的路径规划系统，同时考虑了路径的实用性和 USV 的动力学性能，并且无人船可通过选择最优速度来躲避未知的障碍物。MISSURA 等^[44]对传统 DWA 算法进行了改进，引入了“动态碰撞模型”，在考虑障碍物运动的同时预测未来可能的碰撞。LIN 等^[45]提出了一种可实时路径规划的 DWA 算法，该算法根据障碍物的比例用圆形或者矩形建模，简化障碍物形状，减少了空间和时间的浪费，同时可以考虑多个静态和动态障碍物，具有很强的适应性，但其缺点在于仿真过程没有考虑环境因素。

3.4 对比分析

表 4 总结了上述局部路径规划方法的优缺点以及学术界对算法改进的切入点。

表 4 局部路径规划算法对比分析

项目	APF	RRT	DWA
优点	模型结构简单、计算快速、实时性强	适合多自由度水面机器人、可适应复杂和动态环境	规划速度快、计算量小
缺点	局部最优、受力平衡、斥力大于吸引力	非最优路径、随机性高、算法稳定性差	算法稳定性差、对控制性能要求高
个性化改进方案	修改引力和斥力的势场模型；与其他算法相结合；采用不同环境建模方法	引入启发信息，使探索过程不再随机化；改变搜索策略，如扩展搜索方向、引入新规则；与其他算法结合	与其他算法相结合；改进环境建模方法；引入碰撞模型，进行障碍物预测
共性改进方案	路径优化处理；与 COLREGS 相结合；考虑海流、海浪、风的因素；考虑船舶操纵特性		

4 近程反应式危险规避

近程反应式危险规避是指水面无人艇在按照既定路线航行的过程中，如果发现突然出现的障碍物，水面无人艇应及时进行调整和应对，从而有效避免与障碍物的碰撞。船舶的近程避碰与上文提到的路径规划有很大的区别。路径规划通常将船视为质点，忽略了其操作运动特性，而近程避碰需要考虑到船舶的形状、领域、会遇姿态以及安全距离等。

4.1 碰撞危险的识别

判断船舶在未来航行中的碰撞危险可以用碰撞危险系数（Collision Risk Index, CRI）进行判别，当 CRI 超过某设定阈值时，则会发出警报表示碰撞危险较高。计算 CRI 最常用的 2 个量化指标分别是两船相遇的最近会遇距离（Distance to Closet Point of Approach, DCPA）和到达最近会遇点的时间（Time to Closet Point of Approach, TCPA），这 2 个指标可通过两船的速度和航向求得。DCPA 通常用于确定碰撞危险发生的可能性，TCPA 用于估计危险程度，因此学者们将 DCPA 与 TCPA 的值按照一定的函数关系得到 CRI，从而对碰撞危险进行综合评估。一种普遍的 CRI 计算公式为

$$CRI = w_1 f(DCPA) + w_2 f(TCPA) \quad (1)$$

式中： w_1 和 w_2 均为权重，通常根据专家的经验以及

一些数学方法来确定，如模糊理论、概率回归等。

碰撞危险度模型可作为船舶采取避碰行动的依据。CRI 是一个简化后的模型，但实际上碰撞会与很多抽象的因素相关，而 CRI 只能判断船舶之间是否存在碰撞风险，无法给出避碰方法。

另一种重要的碰撞模型是船舶领域模型。船舶领域是指船舶周围的有效区域，该区域是保证任何一艘安全航行的所需水域。船舶领域的概念最初由 FUJII 等^[46]提出，该模型的研究使得避碰模型更加完善，可以根据船舶的位置、速度和航向来推断最小安全通过距离和船舶领域尺寸，这对碰撞危险的识别和避碰路线的选择有重要意义。

4.2 主要算法

陈姚节等^[47]提出了基于速度障碍法的船舶避碰模型，考虑到了多个目标船的约束条件以及船舶的操纵要求，但未考虑复杂环境下的约束条件以及环境扰动的影响。马文耀等^[48]将人工鱼群法应用在避碰路径规划决策中，以前进距离为目标函数，计算出最优的避让转向时机、避让角度、复航时间和角度，还考虑到了 COLREGS 规则。王得燕等^[49]利用粒子群优化算法解决多船会遇情况下的本船最优转向角度值，有助于多船避碰决策系统的智能化设计与开发。SONG 等^[50]

提出了一种速度障碍法与 APF 结合的混合算法进行避障, 其中 APF 起到一个全局路径规划作用, 提高了避障的实时性能。同样, LU^[51]结合了 APF 与速度障碍法, 且加入了 COLREGS 规则以及路径优化功能。

5 运动规划与控制

运动规划阶段完全考虑了水面无人艇的运动学和动力学约束, 通常会从控制层面来研究规划问题, 其目标是通过自身的控制系统来逼近和实现规划的路径。按照研究对象的可控程度来划分, 运动规划可分为完全驱动系统和欠驱动系统。对于完全驱动系统, 其运动过程完全可控, 所能呈现的运动姿态都可以通过方程进行准确表达。因此, 完全驱动系统常见的运动规划方法是建立精准的运动控制模型, 然后根据具体的规划任务对主要控制参数进行调整和优化。无人艇属于欠驱动系统, 由于系统的控制量个数小于自由度个数, 因此很难简单地通过优化控制参数来进行路径规划, 其运动规划通常分为 2 步: 1) 利用路线规划算法, 从起始状态到目标状态寻找一条安全路径; 2) 以研究对象的运动学和动力学模型为基础, 设计相应的控制器来驱动机器人按照该路径运动, 最终到达目标点。

无人艇的运动规划研究起步较晚, 多数规划方法都是基于传统的路线规划算法。FEDORENKO 等^[52]在机器人操作系统 (Robot Operating System, ROS) 环境下设计了基于 Voronoi 图的无人船路径规划系统, 利用李雅普诺夫不稳定性定理进行运动规划, 这种方法的优点在于实现简单并且不需要在障碍物区域重新构建路径, 保证了算法的实时性。ESCARIO 等^[53]利用改良后的蚁群算法进行 USV 的运动规划, 该算法结合无人船的数学模型, 利用优化方法生成最优的运动和操纵轨迹, 并且分别在开阔海域和受限制的海域验证了该算法的有效性。GU 等^[54]基于改进的 A* 算法和轨迹单元法, 设计了一种适用于受限制水域的运动规划方法, 可同时满足船舶状态、操作特性和水域环境等多个约束条件, 且采用真实船舶模型在受限制水域进行了验证。

6 结语与展望

学术界认为, 水面无人艇路径规划和避碰的解决方案仍有很大的发展空间, 未来无人船路径规划的研究应以 7 方面为研究重点:

1) 利用实际的海洋交通数据进行试验。本文提到的大部分文献都是用非实际的数据进行仿真, 只能证明其理论上的有效性, 无法评估算法在实际环境数据下的效率, 故其实用性有待验证。

2) 考虑外界干扰信号如风、浪、海流的影响。现有研究的环境建模忽略了风、浪、流对无人艇的影响,

环境模型不够完善, 算法在实际航行中的表现会与理论存在偏差。

3) 路径优化和运动规划, 考虑控制器的协同。许多算法在仿真过程中都没有将船舶的动力学特点作为约束条件, 生成的路径缺乏实用性, 在进一步的研究中, 要将路径优化方法与路径规划方法结合生成更加光滑和简洁的路线, 同时考虑船舶的操纵性能, 限制船舶的转向角、速度和加速度值等参数进行运动规划, 与下层的控制器协同。

4) 开发基于国际海上避碰规则的路径规划系统。目前许多加入了国际海上避碰规则的算法都只考虑到特定的几条规则, 如第 13~15 条, 且都是在单一情况下。然而很多复杂的海况可能会同时出现交叉、追遇等多种情形, 特别是在多船规划时, 避碰系统很难界定应该采用哪条规则进行避碰。因此, 完全将 COLREGS 整合到路径规划中仍是一个巨大的挑战。

5) 考虑复杂动态情况下的危险规避。现有的危险规避仿真中, 障碍物通常是静态或者半动态, 障碍物的运动仅限于直线, 不会改变运动的方向。而实际航行中远比该情况复杂, 障碍物的运动轨迹是未知的, 速度和航向都可能会发生变化, 将其视为直线仅仅是考虑最简单的情况。

6) 完善船舶碰撞危险度评估模型。现有的碰撞危险度模型采用 1~2 个主要因素来评估船舶发生碰撞的危险度, 而实际上航行的潜在危险将受到很多抽象和定性因素的影响, 如何通过模型来建立完整的环境模型仍然需要大量研究。

7) 完善对路径的评价体系。除了安全之外, 路径的长度最小通常是路径规划的重要评价指标, 许多算法都会以距离作为最终的优化目标。但路径的好坏受到多方面因素的影响, 如光滑度、经济性、能耗和时间等, 因此路径评价体系还需完善。

参考文献:

- [1] 柳晨光, 初秀民, 谢朔, 等. 船舶智能化研究现状与展望[J]. 船舶工程, 2016, 38(3): 77-84.
- [2] 刘佳, 王杰. 无人水面艇避障路径规划算法综述[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(8): 1-10.
- [3] 陈华, 张新宇, 姜长锋, 等. 水面无人艇路径规划研究综述[J]. 世界海运, 2015, 38(11): 30-33.
- [4] POLVARA R, SHARMA S, WAN J, et al. Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles[J]. Journal of Navigation, 2018, 71(1): 241-256.
- [5] CAMPBELL S, NAEEM W, IRWIN G W. A Review on Improving the Autonomy of Unmanned Surface Vehicles Through Intelligent Collision Avoidance Manoeuvres[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(2): 267-283.

- [6] MAGID E, LAVRENOV R, AFANASYEV I. Voronoi-Based Trajectory Optimization for UGV Path Planning[C]// International Conference on Mechanical, System and Control Engineering. 2017.
- [7] 江岩, 黄宜庆. 基于改进人工鱼群算法的移动机器人路径规划[J]. 绥化学院学报, 2020, 40(3): 139-142.
- [8] HOLLAND J H. Adaptation In Natural and Artificial Systems[M]. Bradford: A Bradford Book, 1992.
- [9] TAM C K, BUCKNALL R. Path-Planning Algorithm for Ships in Close-Range Encounters[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2010, 15(4): 395-407.
- [10] CAO L. Improved Genetic Algorithm for Fast Path Planning of USV[C]//The 9th International Symposium on Multispectral Image Processing and Pattern Recognition. 2015.
- [11] ZHANG W C, XU Y M, XIE J P. Path Planning of USV Based on Improved Hybrid Genetic Algorithm[C]// European Navigation Conference. 2019.
- [12] SZLAPCZYNSKI R. Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories: A New Approach to Collision Avoidance[J]. Journal of Navigation, 2011, 64(1): 169-181.
- [13] SZLAPCZYNSKI R. Evolutionary Ship Track Planning within Traffic Separation Schemes-Evaluation of Individuals [J]. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2013, 7(2): 301-308.
- [14] DORIGO M, CARO G D, GAMBARDELLA L M. Ant Algorithms for Discrete Optimization[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 137-172.
- [15] WU X X, WU G L, SONG Y, et al. Improved ACO-Based Path Planning with Rollback and Death Strategies[J]. Systems Science and Control Engineering an Open Access Journal, 2018, 6(1): 102-107.
- [16] 封声飞, 雷琦, 吴文烈, 等. 自适应蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(17): 35-43.
- [17] LAZAROWSKA A. Research on Algorithms for Autonomous Navigation of Ships[J]. WMU Journal of Maritime Affairs, 2019, 18(23): 1-18.
- [18] EBERHART R, KENNEDY J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[C]// The 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. 1995.
- [19] SHEN Y, WANG F P, ZHAO P M, et al. Ship Route Planning Based on Particle Swarm Optimization[C]//The 34rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation(YAC). 2019.
- [20] LIU Y J, YU P, SU Y X, et al. Ship Path Planning Based on Improved Particle Swarm Optimization[C]//Chinese Automation Congress(CAC). 2018.
- [21] HU L, NAEEM W, RAJABALLY E, et al. A Multiobjective Optimization Approach for COLREGs-Compliant Path Planning of Autonomous Surface Vehicles Verified on Networked Bridge Simulators[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(3): 1167-1179.
- [22] MA Y, HU M Q, YAN X P. Multi-Objective Path Planning for Unmanned Surface Vehicle with Currents Effects[J]. ISA Transactions, 2018, 75(2): 137-156.
- [23] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1972, 4(2): 28-29.
- [24] SONG R, LIU Y C, BUCKNALL R. Smoothed A* Algorithm for Practical Unmanned Surface Vehicle Path Planning[J]. Applied Ocean Research, 2019, 83: 9-20.
- [25] YANG J M, TSENG C M, TSENG P S. Path Planning on Satellite Images for Unmanned Surface Vehicles[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2015, 7(1): 87-99.
- [26] WANG Y L, YU X M, LIANG X. Design and Implementation of Global Path Planning System for Unmanned Surface Vehicle among Multiple Task Points[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2018, 14(1): 82-105.
- [27] CHEN L Y, NEGENBORN R R, LODEWIJKS G. Path Planning for Autonomous Inland Vessels Using A*BG[C]// International Conference on Computational Logistics. 2016.
- [28] DE BERG M, VAN KREVELD M, NÉ SCHWARZKOPF O C, et al. Computational Geometry: Algorithms and Applications[M]. 3 ed. Heidelberg: Springer Berlin, 2008.
- [29] DIJKSTRA E W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1: 269-271.
- [30] CHENG Z H, ZHANG H J, ZHAO Q. The Method Based On Dijkstra Of Multi-Directional Ship's Path Planning[C]// The 32th Chinese Control and Decision Conference. 2020.
- [31] SEKARAN J F, KALUVAN H. Path Planning of Robot Using Modified Dijkstra Algorithm[C]// National Power Engineering Conference. 2018.
- [32] GUO Q, ZHANG Z, XU Y. Path-Planning of Automated Guided Vehicle Based on Improved Dijkstra Algorithm [C]//The 29th Chinese Control and Decision Conference. 2017.
- [33] 康文雄, 许耀钊. 节点约束型最短路径的分层 Dijkstra 算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 66-73.

(下转第48页)

- [2] 陆汉辉. 干线公路线形对交通安全的影响分析与评价[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
 - [3] Winnesota 咨询公司. 交通数据统计公告[EB/OL]. [2021-06-28]. <https://www.winnesota.com/hudson-cold-storage>.
 - [4] 张海亮. 区块链技术在交通运输领域的应用场景与挑战[J]. 中国交通信息化, 2020(12): 96-98.
 - [5] 尚慧靓. 区块链技术在国际航运领域的应用分析[J]. 中国港口, 2021(10): 52-54.
 - [6] Tradelens平台. Digitizing Global Supply Chains [EB/OL]. [2021-05-28]. <https://docs.tradelens.com>.
 - [7] MBL. BunkerTrace: Track & Trace Marine Fuel[EB/OL]. [2021-07-21]. <https://wearebloc.io/products>.
 - [8] 伍朝辉, 武晓博, 王亮. 交通强国背景下智慧交通发展趋势展望[J]. 交通运输研究, 2019, 5(4): 26-36.
 - [9] 中国信息通讯研究院. 区块链白皮书[R]. 2020.
 - [10] 赵腾波. 区块链技术对信用体系的影响及展望[J]. 南方农机, 2019, 50(1): 169-170.
- =====
- (上接第7页)
- [34] KHATIB O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
 - [35] MIELNICZUK M. A Method of Artificial Potential Fields for the Determination of Ship's Safe Trajectory[J]. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, 2017, 51(123): 45-49.
 - [36] LAZAROWSKA A. Comparison of Discrete Artificial Potential Field Algorithm and Wave-Front Algorithm for Autonomous Ship Trajectory Planning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 221013-221026.
 - [37] LAZAROWSKA A. Discrete Artificial Potential Field for Ship Trajectory Planning[J]. Journal of Navigation, 2019, 73(1): 1-19.
 - [38] LYU H G, YIN Y. Fast Path Planning for Autonomous Ships in Restricted Waters[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2592.
 - [39] LAVALLE S M. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning[R]. 1998.
 - [40] CHIANG H T L, TAPIA L. COLREG-RRT: A RRT-Based COLREGS-Compliant Motion Planner for Surface Vehicle Navigation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2024-2031.
 - [41] 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.
 - [42] FOX D, BURGARD W. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
 - [43] WANG N, GAO Y C, ZHENG Z J, et al. A Hybrid Path-Planning Scheme for an Unmanned Surface Vehicle [C]//The Eighth International Conference on Information Science and Technology. 2018.
 - [44] MISSURA M, BENNEWITZ M. Predictive Collision Avoidance for the Dynamic Window Approach[C]//International Conference on Robotics and Automation. 2019.
 - [45] LIN X G, FU Y. Research of USV Obstacle Avoidance Strategy Based on Dynamic Window[C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2017.
 - [46] FUJII Y, KENICHI T. Studies in Marine Traffic Engineering: Traffic Capacity[J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4): 543-552.
 - [47] 陈姚节, 李爽, 范桓, 等. 基于速度矢量坐标系的多船自动避碰研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(6): 420-424.
 - [48] 马文耀, 吴兆麟, 杨家轩, 等. 人工鱼群算法的避碰路径规划决策支持[J]. 中国航海, 2014, 37(3): 63-67.
 - [49] 王得燕, 刘以安. 粒子群算法在多船避碰决策中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(14): 3380-3382.
 - [50] SONG L F, SU Y R, DONG Z P, et al. A Two-Level Dynamic Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 351-360.
 - [51] LU H G. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Modified Artificial Potential Field[C]//The 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering. 2017.
 - [52] FEDORENKO R, GURENKO B V. Local and Global Motion Planning for Unmanned Surface Vehicle[C]//The 3rd International Conference on Control, Mechatronics and Automation. 2015.
 - [53] ESCARIO J B, JIMÉNEZ J, GIRON-SIERRA J M. Optimisation of Autonomous Ship Manoeuvres Applying Ant Colony Optimisation Metaheuristic[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(11): 10120-10139.
 - [54] GU S D, ZHOU C H, WEN Y Q, et al. A Motion Planning Method for Unmanned Surface Vehicle in Restricted Waters [J]. Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2020, 234(2): 332-345.