

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04348>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 楼建坤, 徐蒙源, 岳林, 等. 无人舰艇智能航行技术进展与前沿 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 3–14.

LOU J K, XU M Y, YUE L, et al. Advances and frontiers of key technologies in intelligent navigation for unmanned surface vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 3–14 (in Chinese).

无人舰艇智能航行技术进展与前沿



扫码阅读全文

楼建坤^{1,2}, 徐蒙源^{1,2}, 岳林³, 冯伟强⁴, 王鸿东^{*1,2}

1 海洋智能装备与系统教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240

2 上海交通大学 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240

3 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

4 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161

摘要: [目的] 无人舰艇智能航行系统主要负责舰艇的环境感知、决策规划和运动控制, 是执行具体任务的基础。旨在梳理该系统关键技术的发展现状, 剖析现存问题, 并对未来发展方向提出建议, 为无人舰艇智能航行关键技术的持续进步提供参考。[方法] 基于近年来无人舰艇完成的百公里及千公里自主远航任务, 深入综述智能航行关键技术在国内外的的发展情况, 通过相关技术的应用案例分析、理论研究成果梳理等方式, 归纳总结当前技术的优势与不足, 进而针对性地提出未来发展的关键技术方向。[结果] 当前, 无人舰艇智能航行技术在环境感知、决策规划和运动控制方面均取得一定进展, 但仍面临诸多挑战。在环境感知方面, 复杂环境下的目标感知准确性有待提升, 且缺乏对波浪的实时感知能力; 决策规划方面, 难以有效应对动态任务场景下的多约束问题; 运动控制方面, 全航程多工况自适应控制能力不足。[结论] 针对上述问题, 建议重点发展以下关键技术: 构建无人舰艇六自由度高精度运动模型, 为航行决策和控制提供精准依据; 利用多模态数据和人工智能前沿技术, 开发感知决策大模型, 增强系统的智能化水平; 研究面向高海况的安全航行技术, 提升无人舰艇在恶劣海洋环境中的作业能力和生存能力。

关键词: 无人艇; 环境感知; 传感器数据融合; 决策规划; 运动控制; 运动规划; 大模型

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04348

0 引言

伴随人工智能技术与船海装备的深度融合, 以无人舰艇为代表的海洋装备迎来前所未有的发展, 逐渐成为未来海上对抗的有生力量, 推动新一轮军事变革。其中, 智能航行系统是无人舰艇的关键核心, 主要负责舰艇的环境感知、决策规划和运动控制, 是执行具体任务、形成作战体系的基础。近年来, 各大高校及科研院所对其展开了深入研究。2021年, JARI-USV 多用途无人艇在中国船级社见证下完成国内首个百公里级自主航行^[1]。2024年, 我国某型无人舰艇完成千公里级别自主航行演示验证, 并实现5级海况下智能航行技术验证。目前, 我国无人舰艇智能航行的关键技术成熟度大多处于TRL6~TRL7级, 相关

技术已陆续完成真实海域的实装验证。

就具体技术而言, 在环境感知方面, 目前主要的感知方式包括可见光、红外、声呐、电磁信号、导航雷达和激光雷达等^[2]。同时, 随着多源信息融合技术的发展, 感知手段由先前的利用单传感器感知过渡到多传感器融合感知, 技术路线也逐渐从目标级融合向特征级融合发展^[3]。环境感知技术是目前制约无人舰艇进一步实现智能化航行的核心挑战, 准确高效的环境感知能力可为无人舰艇提供全面、准确的环境信息, 赋予其在复杂海洋环境中的自主航行能力。

在决策规划方面, 主要采用运筹学、最优化和人工智能算法等方法来实现任务、载荷和环境等多种约束下的最优决策生成^[4]。目前, 已具备给定任务条件下的全局最优航路规划、目标跟

收稿日期: 2025-01-05 修回日期: 2025-01-21 网络首发时间: 2025-02-21 11:55

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52271348)

作者简介: 楼建坤, 男, 1997年生, 博士生。研究方向: 无人舰艇建模与控制。E-mail: eternal1530@sjtu.edu.cn

王鸿东, 男, 1989年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 海洋智能与无人技术。E-mail: whd302@sjtu.edu.cn

*通信作者: 王鸿东

踪、应急避碰等能力,在多目标对抗博弈、环境工况强干扰等条件下的航路规划能力有待提升^[5]。决策规划技术是决定无人舰艇能否有效执行任务的前提,合理的决策规划可显著提升无人舰艇智能航行的经济性与安全性,为无人舰艇在复杂多变的海洋环境中高效执行任务提供基本保障。

在运动控制方面,主要采用比例-积分-微分控制(proportional-integral-derivative, PID)、模型预测控制(model predictive control, MPC)、无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)、线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)、鲁棒控制、滑模控制^[6-7]等控制算法,实现准确的循迹跟踪、航向保持与航速控制。目前,已具备设计工况下的精准控制能力,在工况剧烈变化条件下的自适应控制能力有待提升,且未能对横摇、纵摇等运动姿态进行有效控制。运动控制技术是无人舰艇智能航行系统功能的基础,是其有效执行具体任务的前提。

综上所述,无人舰艇智能航行技术已初步具备设计工况下自主航行与任务执行的功能,正往高海况环境和复杂任务场景发展。本文将针对上述关键技术总结其发展现状,分析相应的问题,并提出发展展望。

1 无人舰艇智能航行系统关键技术发展现状

1.1 环境感知技术

从感知对象的角度分析,无人舰艇的环境感知可分为自身状态感知和外部环境感知2个主要方面。具体而言,自身状态感知信息包括平台的航速、航向等运动信息,以及设备的运行状态。外部感知信息包括气象水文、其他船只、障碍物等环境信息。

自身状态感知是无人舰艇的基本功能,相关数据主要应用于健康管理和智能运维功能,在本文中不作深入探讨。在无人舰艇的智能航行过程中,外部环境感知问题是最主要的挑战,其效果直接关系到任务的安全与效率。按照传感器的种类,环境感知技术在无人舰艇智能航行系统中的研究现状如下。

雷达以其出色的探测能力,被广泛应用于无人舰艇的环境感知中,应用案例包括导航雷达、毫米波雷达和激光雷达等。根据不同处理算法需求,可以对雷达的原始回波数据或回波图像数据进行处理,实现目标的检测与跟踪,获取目标方

位、大小等信息,并计算其航速、航向^[8-9]。

视觉传感器(可见光和红外摄像头等设备)因其小巧的体积和丰富的信息输出,在各类无人装备中获得广泛应用。无人舰艇航行过程中,视觉传感器能提供直观的环境信息,部分替代人员瞭望功能,且具备目标种类的识别能力。近年来,有大量的学者在该领域开展研究,并实现产品化应用^[10]。基于视觉传感器,主要可以获取目标识别、场景识别、位置关系、运动趋势等信息。视觉传感器可以利用单目深度估计来估计相对位置关系。在此基础上,结合双目视觉或者激光定位测距,还能获取目标的距离信息。更进一步地,可结合时序关系,重建周围环境,或进行目标追踪,识别运动意图。

此外,船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)也被广泛应用于水面民用船舶、浮标和海上结构的识别,可以获取目标的动态信息及安全信息,但对于未搭载 AIS 设备的目标则无法获取信息。面向水下目标,声呐或磁探设备也能有效获取目标信息,为无人舰艇实现水下目标感知作业提供基础。

在实际任务场景中,任何单一传感器都难以实现对环境完全、透彻感知,因此多源信息融合成为提高环境感知准确性和可靠性的重要手段。目前主流的融合感知方法主要分为目标级融合与特征级融合2类^[11]。目标级融合又称后融合,是指各传感器针对目标物体单独进行模型推理,各自输出带有传感器自身属性的检测目标结果,最后在决策层进行融合,其原理如图1所示。例如,融合摄像机和导航雷达测量值进行数据关联,能够自动检测水面舰艇并确定其相对于观测船的位置^[12];基于多传感器数据融合的定位与地图构建技术,可以有效提升无人舰艇环境感知精度和定位能力^[13]。Park等^[14]引入光电与红外等多个摄像头的数据进行融合,以补偿单摄像头的限制,在实船测试中增强了跟踪结果。周嘉华等^[15]基于改进的交并比指标(generalized intersection over union, GIoU)和匈牙利算法提出一种水面多目标关联算法,并在JARI-USV进行目标关联实船试验,结果显示,该算法可实现小尺度目标的成功关联,相比距离相关系数GIoU补充了度量尺度相似性的能力,减少了误匹配次数,相比传统算法其关联准确率和关联召回率更高。Lin等^[16]使用激光雷达作为主要传感器,与辅助信息源自动识别系统(AIS)进行融合以扩大检测范围,其中使用了卷积神经网络进行目标检测。

然而,目标级融合对传感器的独立性要求较

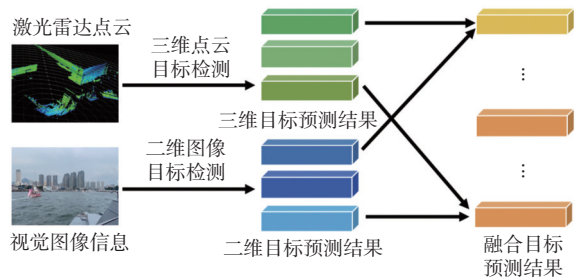


图 1 目标级融合原理示意图^[9]

Fig. 1 Schematic diagram of object-level fusion^[9]

高,需要单个感知模块能独立输出准确的结果,设置采信依据,难以处理传感器之间冲突的检测结果;另外,直接使用各传感器给出的目标信息输出可能导致关键信息丢失,降低整体融合精度。针对上述问题,目前的多源信息融合算法逐渐往特征级融合发展。特征级融合又称中间融合,是指在各类传感器原始数据层面对多模态数据进行融合。针对多传感器原始的多模态数据,使用特征提取器分别获取多种传感器的嵌入表示,再使用下游模块融合 2 种模态的特征,其原理如图 2 所示。特征融合技术可以结合来自不同传感器的数据,增强目标特征表达,有效提升无人艇在复杂海洋环境下目标识别与跟踪的效果。例如,Zhang 等^[17]使用点云来支持图像检测,从距离像和距离多普勒谱图中提取多层次快时间特征和距离特征,提取的多种互补性特征增加了目标和杂波之间的差异性;Kim 等^[18]通过雷达引导的 BEV(bird's-eye-view)编码器将相机特征转换为精

确的 BEV 表示,并结合雷达和相机的 BEV 特征,利用雷达提供的测距信息更准确地定位物体。贺治卜等^[19]提出一种融合激光雷达和惯性导航系统的靠离泊高精度定位方法,引入泊位高程来确定聚类阈值,减小因点云数据的随机性而产生的对岸线检测精度的影响。相较于目标级融合,特征级融合能充分挖掘各传感器原始数据中的丰富信息,同时也对算力提出了更高的要求。

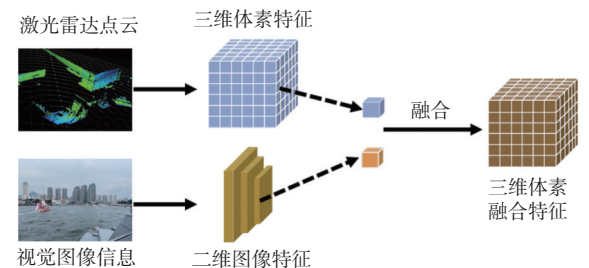


图 2 特征级融合原理示意图^[9]

Fig. 2 Schematic diagram of feature-level fusion^[9]

结合现有环境感知技术研究和应用情况,可归纳出每项技术的显著优势与潜在不足,详见表 1。总体而言,目前技术已具备开阔水域简单场景的目标探测与识别能力,在复杂环境下(雨雾、高海况、狭水道等)目标感知准确性仍有待提升,且缺乏对波浪场的实时感知能力。针对无人舰艇的特殊运行工况与功能需求,必须充分考虑并利用这些环境感知技术的优势,同时利用多源信息融合等手段克服或弥补单传感器感知能力的不足。

表 1 不同环境感知技术的优势和局限性

Table 1 Pros and cons of different environment perception technology

环境感知技术	优势	不足
航海雷达	探测范围广, 成像面积大	动态目标及微小目标易丢失
毫米波雷达	空间分辨率高, 抗干扰性高, 反隐身能力强	感知分辨率低, 易受环境影响, 存在测量盲区
激光雷达	近距离探测性能好, 精度和分辨率高	探测范围有限, 易受环境和噪声影响
声呐	水下探测覆盖能力较强, 精度较高	扫描范围有限, 易受环境和平台噪声影响
视觉传感器	探测范围大, 直观高效, 检测信息量大	易受环境和视野影响, 算力需求高
AIS	无人舰艇数据及水域动态信息显示直接	水域情况覆盖有限, 通信易被干扰

1.2 航路规划技术

无人舰艇的路径规划技术,是指在环境感知的基础上,对当前态势进行分析预测,给出满足安全和作业需求的规划路径的过程,是无人舰艇执行任务的关键环节。路径规划技术根据其规划阶段和目标功能的不同,可以分为全局路径规划与局部路径规划问题。

全局路径规划是指在海图、气象和法规等约

束下,给出满足时间、能效和经济性等一个或多个优化目标的航路的过程,其本质为一个多约束条件下的多目标优化问题。针对不同约束的表征方法,现有的全局规划算法如图优化算法^[20]、进化算法^[21]等基本可以满足真实海域航行需求,其主要问题在于如何获得精度较高的气象预报信息、海图信息或本船能效模型以实现准确的约束加载。目前,在智能船舶的全局路径规划技术方面,已有较为成熟的算法和产品被广泛应用于航

运场景的总体任务调度上。面向无人舰艇,全局路径规划还应进一步考虑任务需求,将任务目标作为约束和目标函数加入到算法当中,以实现长距离、大范围的任务决策调度。

局部路径规划是指在全局航线的执行过程

中,基于航行过程中的目标,给出无人舰艇在空间、时间和姿态等多个维度上的规划的过程,按输入类型、动力学约束形式及目标函数类型可以分为航线规划、航迹规划和运动规划 3 种方式^[5],如表 2 所示。

表 2 不同局部路径规划技术的目标与约束

Table 2 Objectives and constraints of different local path planning technology

路径规划技术	规划目标	约束
航线规划	针对静态目标规划最优路线	空间上的几何约束
航迹规划	针对动态目标规划最优轨迹	空间几何约束与舰艇运动的时间约束
运动规划	针对无人舰艇规划最优运动路径	几何约束、时间约束与无人舰艇运动状态约束

航线规划主要面向静态的任务目标,仅考虑空间上的几何约束,在静态目标避碰规划及部分开阔水域的动态目标避碰规划上已被广泛研究,A*和快速随机搜索树(rapidly-exploring random tree, RRT)等算法均具备针对这一类问题的规划能力。Song 等^[22]提出一种用于无人舰艇路径规划的平滑 A*算法,首先利用视距路径平滑器(line-of-sight path smoother, LOPS)减少转折点的数量,随后引入航点优化路径平滑器 waypoint refining path smoother, WRPS),利用三次样条平滑路径,有效地实现了对初次规划路径的平滑。王鸿东等^[1]以中型无人艇为对象,在 RRT 算法的基础上,提出虚拟障碍线方法加载 COLREGS 海事规则约束,以满足开阔水域避碰路径规划的应用需求;结合速度障碍法(velocity obstacle, VO)提出 VO-RRT 融合算法并给出最危险障碍物策略,以此解决多目标条件下的实时避碰问题;仿真及实船试验的结果表明,所提算法实时性较好,路径重规划耗时均在 50 ms 以内。

航迹规划是在航线规划基础上,进一步考虑无人舰艇运动的时间约束的方法。例如,针对水域的测绘、水面/水下集群的联合搜探等任务,不仅需要考虑其在空间上的覆盖,还需考虑任务的时效性。VO 是一种用于动态避障的局部路径规划算法,适用于移动障碍物环境下的避障任务。Wang 等^[23]通过对障碍物的进一步分析,重新定义常规速度障碍法中设定的障碍物几何模型,提出一种特殊的三角形障碍物几何模型来重建速度障碍物区域,大幅提高了避障的准确性。动态窗口法(dynamic window approach, DWA)也是一种适用于实时避障的局部路径规划算法。为解决传统 DWA 算法会绕过密集障碍物外围,导致路径距离较长的问题,Tan 等^[24]利用障碍物搜索角度的概念,改进 DWA 算法,更好地处理了密集障碍

物对无人舰艇路径规划的影响。

更进一步地,运动规划需要在时空维度的基础上,考虑本船的运动状态约束。一般而言,无人舰艇重点考虑横荡、纵荡、艏摇 3 个自由度的运动规划与控制,在部分场景下(导弹发射、舰载机起降等)则需要增加考虑垂荡、横摇、纵摇共计 6 个自由度。Mao 等^[25]针对传统路径规划方法中路径搜索规则没有充分考虑无人舰艇操纵运动约束的问题,基于无人艇运动状态预测提出一种快速探索随机树(state prediction rapidly exploring random tree, spRRT)运动规划方法,将无人艇完整的动态约束加入到 RRT 路径搜索规则中,从而有效地规划可行路径。深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法也是一种应用广泛的强化学习路径规划算法。Zhao 等^[26]利用 DDPG 算法,结合无人艇三自由度操纵运动模型,在静态障碍物的场景下进行了良好的运动规划。在面向自主靠离泊、狭水道航行和无人机起降等对无人舰艇航行姿态要求较高的特种任务场景中,相关技术已得到初步应用^[27-28]。

1.3 运动控制技术

航行控制是指无人舰艇根据当前运动状态以及航行决策模块给出的参考信号,分析计算出控制任务所需的控制命令,以实现实际无人舰艇对规划参考的有效跟踪^[29]。无人艇的运动控制问题,可从控制理论本质上归纳为抵消模型内部的不确定项以及外部未知干扰对无人艇运动控制带来的影响,这就要求运动控制算法具有较好的自适应能力,能够应对自身内部模型参数不确定与外部未知环境干扰的影响。对此,已有研究提出诸如滑模控制^[30]、模型预测控制^[31]、模糊控制^[32]、自适应控制^[33]、神经网络控制^[14]、数据驱动的机器学习控制^[34-36]等一系列控制方式。

无人舰艇的操纵运动模型是实现高效航行控制的基础。根据控制输入的维数与运动空间维数的大小,其操纵运动模型可以分为欠驱动模型和全驱动模型。大多数无人舰艇的动力推进形式为舵桨或双桨差动,在横向运动的自由度上没有对应的控制面,属于典型的欠驱动系统。相比于全驱动模型,欠驱动无人舰艇的控制问题更具有挑战性和普适性^[37],主要可分为镇定控制(point stabilization control)和航迹控制(path following control)2类。

镇定控制是指无人舰艇在控制系统的作用下,通过驱动执行器使其位置和艏向角收敛于期望值的过程,主要研究无人艇在控制律的作用下,由给定的初始状态出发,到达并保持在期望目标状态的问题^[38]。镇定控制需要同时考虑无人舰艇平面运动的3个自由度,极大地增加了控制器的设计难度。具体而言,镇定控制主要包括动力定位控制、锚泊定位控制和自动靠离泊控制等问题。上述任务的主要难点在于无人舰艇在低速航行时,受风浪流干扰影响显著增大,且受港内浅水效应、岸壁效应等多因素影响,模型发生动态变化,需要考虑将路径规划、速度规划方案和控制器设计相结合^[27]。针对无人艇在不同航速下因舰艇所受升力的改变而导致的无人舰艇运动模型的未知变化问题,Øvereng等^[35]基于深度强化学习方法提出一种适用于无人艇的动力定位控制方案,其通过设计 Actor-Critic 训练框架,引入多变量高斯奖励函数实现对控制算法的训练,最终在船模上进行了验证。在靠离泊算法方面,Liao等^[39]给出一种分层方法,将自动靠泊分为规划模式和控制模式2部分,设计改进的自适应模糊PID控制器,精确控制位置和航向角,以跟踪规划的轨迹,通过仿真和现场实验验证了所提方法的可行性和有效性。杨凌等^[40]提出一种基于零空间的自抗扰控制分配方法,实现先泊位外镇定再平行靠泊的方案,保证了控制分配的实时性与精确性。

航迹控制是指无人舰艇在控制系统的作用下,由任意初始位置朝着期望路径运动并沿着此路径到达目的地的过程^[41]。航迹控制分为轨迹跟踪控制和路径跟踪控制2类。轨迹跟踪控制主要致力于解决无人艇从给定的初始状态出发,在控制器作用下,到达并跟踪一条随时间变化的参考轨迹的问题,而路径跟踪控制研究无人艇到达并跟踪一条预定的期望路径问题,不考虑时间的约束。无人舰艇航迹控制主要由制导和控制2个环节组成,当前制导方法主要有视线法(line of

sight, LOS)和动态虚拟船型法(dynamic virtual ship, DVS),基本解决了由航路点规划的曲线光滑路径制导和风浪干扰下未知侧漂力补偿的制导问题。控制方法主要基于李雅普诺夫直接法,在Backstepping设计框架下发展而来,包括鲁棒控制、输出反馈控制、事件触发控制等。近年来重点解决了模型结构不确定、海洋环境干扰、快速时间收敛、预设性能约束、执行器增益不确定及故障失效等问题。当前的航迹控制理论已经基本覆盖无人舰艇实际航行任务需求,且朝着强鲁棒、低能耗、高可靠的方向发展^[42]。Menoyo等^[31]针对路径跟踪控制中存在的无人艇模型内部不确定项问题,基于Mamdani模糊系统设计模糊逻辑控制器用以实现对无人艇艏向的快速鲁棒控制。Li等^[32]将模糊控制与自适应控制相结合,提出一种基于自适应模糊输出调节的控制方法,使存在未知动态扰动的无人艇控制系统仍能实现对目标的稳定跟踪。Martinsen等^[34]将强化学习与模型预测控制方法相结合,通过模型预测控制器实现对无人艇轨迹跟踪的最优控制,同时,通过强化学习训练的方式结合系统辨识以实现对模型预测控制器参数的调整。Wang等^[36]将基于Actor-Critic的强化学习与有限时间控制技术相结合,提出一种基于强化学习的有限时间轨迹跟踪控制方法,创建Actor-Critic有限时间控制结构,并基于Bellman误差公式完成了控制算法的设计。闫昭琨等^[43-44]提出一种吃水观测方法和自适应控制策略,利用无人舰艇运动状态、质量和吃水之间的强耦合,采用径向基函数神经网络进行实时吃水观测,实现自适应控制策略的反演,对于无人舰艇质量发生显著变化时的运动控制有较好效果。

随着无人舰艇的航行范围扩大和任务要求的多样化,单艇作业不能满足许多作业要求,无人舰艇也逐渐朝着集群协同化方向发展。无人舰艇集群是由多个无人艇通过通信连接方式,进行群体协作而形成的整体,通过信息交互与协同决策在更广的范围内具备更高的任务执行效率和灵活性。近年来,学者也对无人舰艇协同控制领域开展了深入研究。宋洋等^[45]通过引入Agent技术,构建适应于无人艇协同作战的智能控制系统,该系统能够实现无人艇高效协同,增强对不断变化的战场环境的高度适应性。Redding等^[46]为提高无人艇在海域环境下的协作能力,提出针对多个无人艇的高效协作任务规划、自主控制技术(CoMPACT),可实现高效冲突解决、动态任务、任务重新规划和目标分配。Liu等^[47]结合自组织

映射和快速行进法设计智能多任务分配算法,结合路径规划和通信距离平衡每个无人艇在集群中的能量储备,保证每个无人舰艇与对应基站之间的通信稳定性和航行控制的高效性。

2 无人舰艇智能航行系统关键技术问题与挑战

目前,无人舰艇的智能航行系统研制可满足自主航行基本需求,其设计运行条件主要面向中低海况、开阔水域等简单场景,并逐渐往高海况、复杂水域等场景发展。同时,随着目标应用场景日益复杂,其智能航行系统不仅要满足保障航行安全的目标,还要具备执行不同任务的能力。因此,无人舰艇需要应对干扰更强、约束更多的环境和任务不确定性问题,相关技术有待进一步深入研究。本章将主要针对无人舰艇智能航行系统的现有关键技术在应对未来需求上的问题和挑战展开分析。

2.1 复杂环境下的目标感知问题

在环境感知方面,应重点突破复杂海洋环境干扰下的单传感器感知能力下降问题,以及对水面弱、小目标的探测和感知问题。

一方面,现有较为成熟的单传感器解决方案,在迁移应用至无人舰艇航行系统中时,往往需要解决复杂海洋环境的干扰问题。具体而言,雨、雪、雾等天气引起的信号衰减,水面波浪带来的杂波干扰以及温盐湿等环境引起的硬件性能下降问题,均会导致单传感器在特定条件下的感知能力下降(图3),引起虚警或漏警。此外,面向狭水道、进出港等近岸场景,岸上无关目标的信号也会给感知设备带来显著影响。同时,由于应对虚

警和漏警问题的方法在逻辑层面存在一定的互斥性,为避免虚警所使用的参数阈值将很有可能引起较多漏警,反之亦然。因此,从系统层面衡量上述2类指标需求以保证航行安全,同时避免复杂态势引起决策算法失效,也是亟待突破的问题。

另一方面,渔网、浮标、锚链和缆绳等水面附近的弱、小目标感知,也是影响无人舰艇航行安全的主要问题。这类目标的主要特点为反射强度低、尺度小,在单一传感器中受分辨率影响,容易被作为杂波过滤,甚至无法在传感器原始数据中进行辨别。

此外,面向更高海况下无人舰艇的安全航行目标,航行系统在保证避开障碍物目标基础上,还应具备有效应对波浪载荷砰击的能力,防止倾覆。现有的波浪识别手段集中在波浪浮标等单点式测量或测波雷达等频谱测量方面,缺少时序的波浪感知和推演能力,无法为高海况下安全航行决策提供有效支持。

2.2 动态任务场景下的多约束决策规划问题

在决策规划方面,应重点突破平台与载荷联合约束下的协同规划技术,以及面向动态博弈场景下的任务决策技术。

动态任务场景下的运动模型建立是支撑决策规划的关键技术难点。一方面,无人舰艇的运动模型需充分考虑波浪环境的影响。在传统的舰艇操纵运动模型理论中,通常对波浪等外载荷做准静态假设,给出舰艇在一定时间内的运动趋势。然而,随着载荷作业约束和高海况任务的需求增多,在高海况条件下,舰艇横摇、纵摇幅值显著增大,可达常规作业工况的2~3倍,如图4所示。现有的舰艇操纵运动模型建模方法难以表征舰艇在波浪中的瞬态运动响应,无法为决策控制算法提供准确的模型支撑。另一方面,载荷的变化会给舰艇的运动模型带来不确定性。在传统有人船的场景下,导弹等武器装备以及燃油等载荷占比有限,燃油消耗和载荷运用不会对舰艇运动带来显著影响。然而,舰艇无人化后,上述载荷的有效占比显著提升,载荷运用会对舰艇运动产生显著影响。此外,声呐等拖体、附体载荷,也会显著影响模型的运动性能。此时,舰艇吃水、最大航速等性能会发生较大改变,继而影响决策和控制算法效能。

现有的决策规划算法往往针对一个确定的场景展开,其规划过程中任务目标函数基本不发生变化,一定程度上可以被抽象为一类最优化问题。然而,在实际任务过程中,受限于环境和任

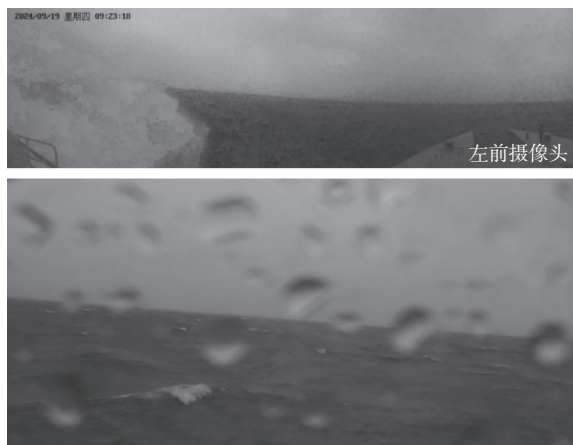


图3 高海况条件下波浪遮挡和水滴附着导致感知受限

Fig. 3 The perception is limited by waves and drips under high sea conditions

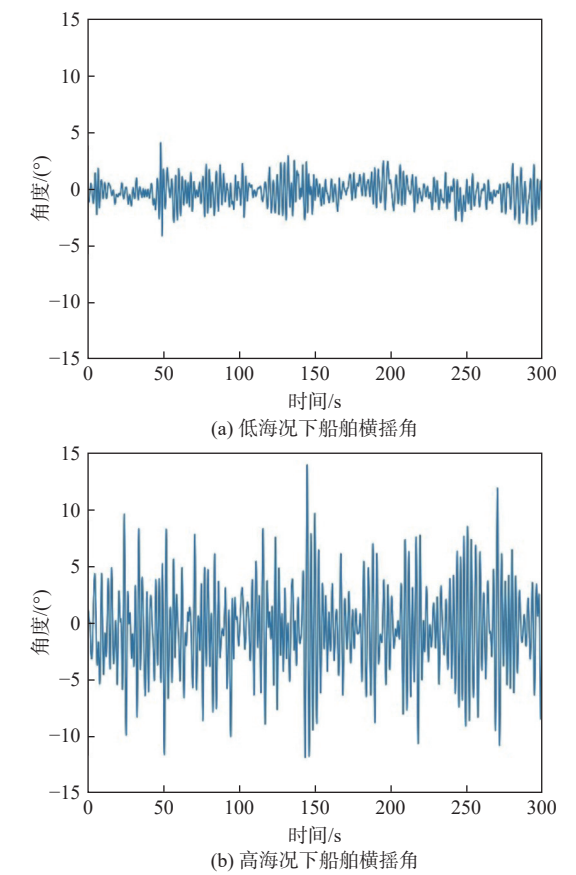


图 4 相同平台不同海况下船舶横摇运动

Fig. 4 Ship roll and pitch motion under different sea conditions

务的不确定性,无人舰艇时常处于动态博弈的状态,其目标函数动态改变,难以用统一模型进行描述。同时,实际航道环境更为复杂且目标众多,如图 5 所示,有更强的不确定性。因此,动态决策规划的适用性是需要解决的关键问题。

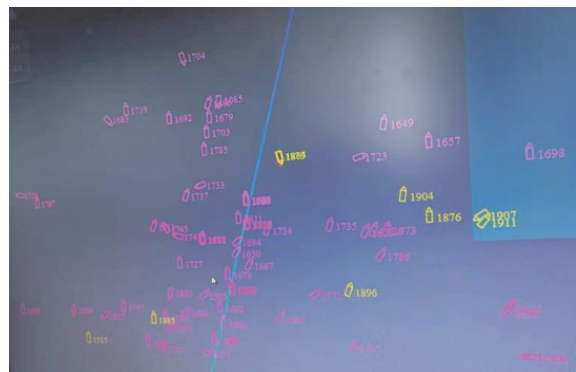


图 5 试验海域碍航船只众多(粉色为确认目标)

Fig. 5 Multiple targets in real sea area (targets with pink label are checked)

2.3 全航程多工况自适应控制问题

面向全航程自主需求,无人舰艇需具备浅水、狭水道等受限水域的运动控制能力。这类场景可被进一步总结为操纵性能差、机械结构响应延迟影响大的场景下的运动控制问题。此时,舰

艇运动控制的欠驱动问题会被进一步放大,受动力执行机构响应的延迟和外界环境扰动影响更为明显。

此外,受海况、载荷等影响,无人舰艇的运动控制往往处于动态的工况当中,单一的算法无法满足全航程的运动控制需求。结合高海况或载荷运用需求,无人舰艇运动控制不再简单以航速航向或航迹为控制目标,还需关注控制过程的姿态变化,这使得运动控制算法需考虑的约束自由度更多,给算法的稳定性分析和参数整定带来新的挑战。

全航程多工况自适应控制的难点还应体现在不同场景航行适应性问题。例如,靠离泊航行工况和高速航行工况与常规航行状态存在显著差异。靠离泊时,无人舰艇需要在低速下进行精确操作,同时,靠离泊时周围环境复杂,存在其他船舶、码头设施等多种干扰因素。高速航行时,无人舰艇对海况及气象的影响更为敏感,也面临着更易失稳的挑战。无人舰艇需能够在上述限制的约束下灵活稳定切换工况航行,这对无人舰艇自适应控制的能力提出了更高的要求。

3 无人舰艇智能航行技术发展展望

根据无人舰艇智能航行技术存在的问题,可以看出,以实际装备应用为导向,智能航行技术需要重点突破各类复杂工况和复杂任务下的感知、决策与控制问题。对此,从平台自身出发,应充分考虑其与环境与载荷耦合作用下的运动响应模型,为航行决策和控制提供准确的模型输入。从任务场景出发,无人舰艇需要应对的必然是复杂的动态场景,应充分利用其运行过程中的多模态数据,结合大模型方法提升感知决策能力边界。此外,面向远海防卫战略需求,无人舰艇需要具备远海区域常态 5 级海况的作业能力,以及峰值 6~7 级海况下的生存能力,对此应在现有设计工况技术上,探索高海况下的安全航行技术,提升其设计运行边界。

3.1 发展无人舰艇六自由度运动建模技术

智能航行系统算法与无人舰艇运动性能的匹配是提升其系统效能的关键,复杂场景下的智能航行必须充分考虑舰艇的六自由度运动模型。因此,适配多种工况的高精度无人舰艇六自由度运动模型的研究是提升智能航行算法在各种任务场景下表现的基础。无人舰艇实测成本高、测试周期长,智能航行算法调试极大依赖于虚拟仿真试

验。其中,各种工况下准确的六自由度运动模型,是决定算法能否快速迁移至实艇的关键,能为算法测试、协同训练提供有效的模型支撑。

在充分结合六自由度运动模型的基础上,应进一步结合无人舰艇建模与波浪的实时观测技术,基于高精度的波浪实时观测,实现对舰艇运动的准确预报。同时,应开展平台-载荷联合的决策规划研究,提升平台与载荷间的适配能力,满足多种载荷运用需求。此外,面向高海况下航行安全需求,无人舰艇航路规划还应避免出现横浪等危险状态,也即在具备一定波浪观测能力的基础上,需基于舰艇六自由度运动预报技术,开展高海况条件下的运动规划研究。

3.2 发展基于多模态数据的感知与决策大模型

随着无人舰艇航行控制智能航行技术的发展,其任务场景、功能边界和运用需求逐步明确。当前应用于航行控制智能航行系统的算法,除少量感知算法外,绝大多数仍属于白箱算法,其智能水平极大依赖于对任务和场景的解读。白箱算法的优势在于边界清晰可追溯,在应对明确场景时不易产生异常情况。然而,面向未来作战运用需求,对抗和博弈是无人舰艇需要应对的重要场景,此时,面向动态变化的目标需求,现有的白箱算法显然难以满足高维约束条件下的决策规划目标。

在此背景下,基于多模态数据(multimodal data)的感知与决策方法成为智能航行系统的有效发展方向。多模态数据指结合不同类型数据的信息,例如图像、视频、声信号、运动状态、雷达数据等。多模态数据通过融合多种类型的数据,为智能航行系统提供更丰富、全面的信息输入,有助于提高系统的性能。

同时,应充分结合各传感器在复杂海洋环境影响下的失效模式,突破多源信息融合技术,实现从目标级别的融合向特征级别融合的过渡,以充分利用传感器原始数据中包含的丰富信息,提升目标感知的信息维度与精度,以增强智能航行系统的鲁棒性。在感知数据的基础上,需要进一步结合船长经验,利用人工智能手段,综合位置、电子海图和目标分布等信息对感知目标进行研判,给出可靠的安全航行区域。效仿船长在高海况下“看浪行船”的操作经验,实现对波浪场的实时感知。例如,利用电子海图中渔区的先验信息,结合浮标感知分布情况,将浮标集中区域的包络作为不可航行区域,降低无人舰艇在其中穿

行时被渔网缠绕的可能性。综上所述,充分结合人工智能前沿技术,将大模型等人工智能方法运用于无人舰艇的感知、任务决策与控制当中,是提升其智能化水平的重要方向。感知与决策大模型可通过强大的学习能力、复杂的模式识别能力、高效的决策支持、自适应和自进化能力和多层级风险评估,显著提升无人舰艇在动态任务场景下的自主性和智能性,确保其在复杂海洋环境中能安全高效完成航行任务。已有丰富研究表明大模型在面对智能化决策问题中的有效性,如Duan等^[48]论证了大模型在学习和适应大数据环境中的决策任务方面具有显著优势,进一步研究可以发掘其在模式识别和数据融合方面的潜力。Liu等^[49]针对自动驾驶复杂场景(例如无信号的交叉路口)中的多任务决策问题,结合强化学习和序列建模任务,使用GPT模型学习驾驶数据并生成动作决策,展现了大模型在未知复杂环境中的泛化决策能力。进一步地,针对大模型中潜在的感知或决策错误的可能性,以及其迁移到舰艇航行问题上的实际效果,发展基于人机协同的作战决策指控体系,挖掘作战场景人工介入决策机制,提升大模型在实际运用中的可靠性和可信度,也是支撑大模型运用于实际装备的基础。

3.3 发展高海况安全航行控制技术

面向未来深远海应用需求,还应重点突破高海况下安全航行控制技术。高海况下,海洋扰动力的峰值可达舰艇控制作用力的5~10倍,埋艏或“飞车”甩艉等现象周期性出现,传统航行决策控制方法通常不考虑对波浪载荷的观测,无法计入波浪砰击等扰动对决策控制的影响,难以保证航行安全。

面对连续的高浪砰击,传统的稳态航迹控制方法在高海况下无法实现姿态的调控,极易导致横浪、失速等稳性丧失现象。对此,应结合波浪实时观测与舰艇六自由度运动预报技术,开展无人舰艇高海况下反应式决策控制技术研究。基于光学波浪感知动态判断当前最佳迎浪航向和危险航向区间,实时生成适应海况的操舵策略,减少波浪砰击对艇体姿态的影响。同时,结合舰艇操纵运动预报,通过对舰艇姿态、船尾吃水深度和当前航速的实时预测,系统判断船尾的实时入水状态,基于螺旋桨出入水状态实施离散式操舵控制,避免频繁打舵,尽可能减小“飞车”对舰艇航行稳态的影响,保证舰艇在高海况中的航行安全。

突破高海况安全航行技术,实现更小平台在更高海况下的安全航行,是拓展设计运行条件边

界, 发挥无人舰艇独特优势的关键。

4 结 语

无人舰艇智能航行技术是其充分发挥自身平台优势、高效执行任务的基础。目前, 我国无人舰艇智能航行技术成熟度较高, 已具备开阔水域等典型场景自主航行能力, 并往高海况、狭水道和博弈对抗等复杂场景发展。

未来, 面向无人舰艇投入实装应用的需求, 应充分考虑其在运行过程中可能遇到的场景和任务边界, 认识和利用其与环境 and 载荷耦合的运动响应规律, 为决策控制提供支撑。需结合现有人工智能领域前沿技术, 发展大模型在无人舰艇等海洋装备上的运用, 提升平台智能化水平。同时, 应着力突破在高海况下的安全航行技术, 提升作业的设计运行条件边界, 充分发挥舰艇无人化优势。在此基础上, 进一步推动无人舰艇的实装测试和应用, 加快相应的作战运用与指挥控制体系构建, 指导智能航行关键技术的发展与突破。

参考文献:

[1] 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, 203.
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, 203 (in both Chinese and English).

[2] 朱健楠, 虞梦苓, 杨益新. 无人水面艇感知技术发展综述 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(10): 1486–1492.
ZHU J N, YU M L, YANG Y X. Overview of development of unmanned-surface-vehicle sensing technology[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(10): 1486–1492 (in Chinese).

[3] HUANG K L, SHI B T, LI X, et al. Multi-modal sensor fusion for auto driving perception: a survey[J/OL]. *ArXiv*: 2202.02703. (2024-12-16) [2024-12-28] <https://arxiv.org/html/2202.02703v3>.

[4] WU G X, LI D B, DING H, et al. An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, 10(1): 981–1003.

[5] 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.

[6] 黄烽笙, 徐郑攀, 陈远明, 等. 无人艇自主靠泊控制系统设计 [J]. *中国测试*, 2020, 46(10): 111–117.

HUANG Y S, XU Z P, CHEN Y M, et al. Design of automatic berthing control system of USV[J]. *China Measurement & Testing technology*, 2020, 46(10): 111–117 (in Chinese).

[7] 李诗杰, 徐诚祺, 刘佳仑, 等. 船舶自抗扰无模型自适应航迹控制 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 280–289.
LI S J, XU C Q, LIU J L, et al. Tracking control of ships based on ADRC–MFAC[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 280–289 (in both Chinese and English).

[8] KIM H, KIM D, LEE S M. Marine object segmentation and tracking by learning marine radar images for autonomous surface vehicles[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(9): 10062–10070.

[9] 李正宇, 王鸿东, 魏圣哲, 等. 海上激光雷达强度–空间联合滤波方法 [J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1910001.
LI Z Y, WANG H D, WEI S Z, et al. Marine LiDAR intensity-space combined filtering method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1910001 (in Chinese).

[10] WANG N, WANG Y Y, WEI Y, et al. Marine vessel detection dataset and benchmark for unmanned surface vehicles[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 142: 103835.

[11] CHEN X Z, MA H M, WAN J, et al. Multi-view 3D object detection network for autonomous driving[C]// *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017. doi: 10.1109/CVPR.2017.691.

[12] KIM K, KIM J, KIM J. Robust data association for multi-object detection in maritime environments using camera and radar measurements[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(3): 5865–5872.

[13] 贾薇, 王宁, 张富宇, 等. 基于多传感器融合 SLAM 的无人船靠泊技术 [J]. *大连海事大学学报*, 2023, 49(4): 65–75.
JIA W, WANG N, ZHANG F Y, et al. Unmanned surface vehicle berthing technology based on multi-sensor fusion SLAM[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2023, 49(4): 65–75 (in Chinese).

[14] PARK J H, ROH M I, LEE H W, et al. Multi-vessel target tracking with camera fusion for unmanned surface vehicles[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2024, 16: 100608.

[15] 周嘉华, 王鸿东, 魏圣哲, 等. 基于广义交并比的无人艇激光与视觉目标关联算法 [J]. *船舶工程*, 2023, 45(3): 120–127.
ZHOU J H, WANG H D, WEI S Z, et al. Association algorithm of USV's LiDAR and vision objects based on Giou correlation coefficient[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(3): 120–127 (in Chinese).

[16] LIN J Y, DIEKMANN P, FRAMING C E, et al. Maritime environment perception based on deep learning[J].

- IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15487–15497.
- [17] ZHANG Q, SHAN Y X, ZHANG Z Q, et al. Multisensor fusion-based maritime ship object detection method for autonomous surface vehicles[J]. *Journal of Field Robotics*, 2024, 41(3): 493–510.
 - [18] KIM J, SEONG M, BANG G, et al. RCM-Fusion: radar-camera multi-level fusion for 3D object detection[C]//Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama, Japan: IEEE, 2024. doi: [10.1109/ICRA57147.2024.10611449](https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10611449).
 - [19] 贺治卜, 闫文洲, 柳晨光, 等. 融合激光雷达和惯性导航的船舶靠离泊高精度定位方法 [J]. *中国舰船研究*, 2024: 1–10(2024-05-28) [2024-12-30]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03858>.
HE Z B, YAN W Z, LIU C G, et al. High-precision berthing and unberthing ship positioning method by fusing LiDAR and inertial navigation system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024: 1–10(2024-05-28) [2024-12-30] (in Chinese). <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03858>.
 - [20] HUANG Y, XIAO Y M H, WANG H D, et al. A rapid globe-wide shortest route planning algorithm based on two-layer oceanic shortcut network considering great circle distance[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115761.
 - [21] 林法君, 李焰. 基于改进粒子群算法的水面无人艇全局路径规划 [J]. *舰船电子工程*, 2022, 42(8): 59–63, 73.
LIN F J, LI Y. Global path planning for unmanned surface vehicle based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, 42(8): 59–63, 73 (in Chinese).
 - [22] 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.
 - [23] WANG J, WANG R T, LU D H, et al. USV dynamic accurate obstacle avoidance based on improved velocity obstacle method[J]. *Electronics*, 2022, 11(17): 2720.
 - [24] TAN Z K, WEI N X, LIU Z F. Local path planning for unmanned surface vehicle based on the improved dwa algorithm[C]//Proceedings of the 2022 41st Chinese Control Conference (CCC). Hefei, China: IEEE, 2022. doi: [10.23919/CCC55666.2022.9901807](https://doi.org/10.23919/CCC55666.2022.9901807).
 - [25] MAO S Q, YANG P, GAO D J, et al. A motion planning method for unmanned surface vehicle based on improved RRT algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(4): 687.
 - [26] ZHAO J, WANG P R, LI B Y, et al. A DDPG-based USV path-planning algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10567.
 - [27] 李国帅, 张显库, 张安超. 智能船舶靠泊技术研究热点与趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 3–14.
 - LI G S, ZHANG X K, ZHANG A C. Research hotspots and tendency of intelligent ship berthing technology[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 3–14 (in Chinese).
 - [28] 赵鹏程, 宋保维, 毛昭勇, 等. 基于改进的复合自适应遗传算法的UUV水下回收路径规划 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(10): 2598–2608.
ZHAO P C, SONG B W, MAO Z Y, et al. Path planning for UUV underwater recovery based on improved composite adaptive genetic algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(10): 2598–2608 (in Chinese).
 - [29] 张国庆, 张显库. 船舶智能航行制导与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
ZHANG G Q, ZHANG X K. Intelligent navigation guidance and control for ships[M]. Beijing: Science Press, 2022 (in Chinese).
 - [30] PENG Z H, MENG C C, LIU L, et al. PWM-driven model predictive speed control for an unmanned surface vehicle with unknown propeller dynamics based on parameter identification and neural prediction[J]. *Neurocomputing*, 2021, 432: 1–9.
 - [31] MENOYO LARRAZABAL J, SANTOS PEÑAS M. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 55: 106–117.
 - [32] LI S B, MA T T, LUO X Y, et al. Adaptive fuzzy output regulation for unmanned surface vehicles with prescribed performance[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18(2): 405–414.
 - [33] ZHANG Y Y, LI S, WENG J. Learning and near-optimal control of underactuated surface vessels with periodic disturbances[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(8): 7453–7463.
 - [34] MARTINSEN A B, LEKKAS A M, GROS S. Reinforcement learning-based NMPC for tracking control of ASVs: theory and experiments[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 120: 105024.
 - [35] ØVERENG S S, NGUYEN D T, HAMRE G. Dynamic positioning using deep reinforcement learning[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109433.
 - [36] WANG N, GAO Y, YANG C, et al. Reinforcement learning-based finite-time tracking control of an unknown unmanned surface vehicle with input constraints[J]. *Neurocomputing*, 2022, 484: 26–37.
 - [37] FOSSEN T I. An adaptive line-of-sight (ALOS) guidance law for path following of aircraft and marine craft[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2023, 31(6): 2887–2894.
 - [38] 马勇, 王雯琦, 严新平. 面向新一代航运系统的船舶智能航行技术研究进展 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(11): 1795–1806.

MA Y, WANG W Q, YAN X P. Research progress of vessel intelligent navigation technology for the new generation of waterborne transportation system[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2023, 53(11): 1795–1806 (in Chinese).

[39] LIAO Y L, JIA Z H, ZHANG W B, et al. Layered berthing method and experiment of unmanned surface vehicle based on multiple constraints analysis[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 86: 47–60.

[40] 杨凌, 徐海祥, 余文翌. 基于零空间的船舶自主靠泊自抗扰控制分配 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 128–136.

YANG L, XU H X, YU W Z. Null-space-based active disturbance rejection control allocation for ship autonomous berthing[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 128–136 (in Chinese).

[41] XU H T, OLIVEIRA P, GUEDES SOARES C. L1 adaptive backstepping control for path-following of under-actuated marine surface ships[J]. *European Journal of Control*, 2021, 58: 357–372.

[42] 严新平, 李晨, 刘佳仑, 等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 22–29,76.

YAN X P, LI C, LIU J L, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5): 22–29,76 (in Chinese).

[43] 闫昭琨, 杨冠宇, 王鸿东. 基于超螺旋滑模观测的变质量无人艇航速自适应控制 [J]. *中国舰船研究*, 2023: 1–16(2023-11-27)[2024-12-30]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03517122>.

YAN Z K, YANG G Y, WANG H D. Adaptive surge control of variable-mass unmanned surface vehicle based on super-twisting sliding mode observation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023: 1–16 (in Chinese). (2023-11-27) [2024-12-30].<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03517122>.

[44] YAN Z K, WANG H D, ZHANG M Y. Learning-based adaptive neural control for safer navigation of unmanned surface vehicle with variable mass[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 313: 119471.

[45] 宋洋, 毛建舟. 多无人艇协同作战智能指挥控制系统研究 [J]. *舰船电子工程*, 2020, 40(10): 1–4,57.

SONG Y, MAO J Z. Research on multi-USV intelligent command and control cooperative system[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(10): 1–4,57 (in Chinese).

[46] REDDING J, AMIN J, BOSKOVIC J, et al. Collaborative mission planning, autonomy and control technology (CoMPACT) for unmanned surface vehicles[C]//AIAA Guidance, Navigation, & Control Conference. Chicago: AIAA, 2009. doi: [10.2514/6.2009-5774](https://doi.org/10.2514/6.2009-5774).

[47] LIU Y C, SONG R, BUCKNALL R, et al. Intelligent multi-task allocation and planning for multiple unmanned surface vehicles (USVs) using self-organising maps and fast marching method[J]. *Information Sciences*, 2019, 496: 180–197.

[48] DUAN Y Q, EDWARDS J S, DWIVEDI Y K. Artificial intelligence for decision making in the era of big data—evolution, challenges and research agenda[J]. *International Journal of Information Management*, 2019, 48: 63–71.

[49] LIU J Q, HANG P, QI X, et al. MTD-GPT: a multi-task decision-making GPT model for autonomous driving at unsignalized intersections[C]//2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Bilbao, Spain: IEEE, 2023. doi: [10.1109/ITSC57777.2023.10421993](https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10421993).

Advances and frontiers of key technologies in intelligent navigation for unmanned surface vehicles

LOU Jiankun^{1,2}, XU Mengyuan^{1,2}, YUE Lin³, FENG Weiqiang⁴, WANG Hongdong^{*1,2}

1 Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Ministry of Education, Shanghai 200240, China

2 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

4 The 92492 Unit of PLA, Beijing 100161, China

Abstract: [**Objectives**] The rapid integration of artificial intelligence (AI) into maritime technology has driven unprecedented advancements in unmanned surface vehicles (USVs), positioning them as a crucial force in future maritime operations and military transformations. The intelligent navigation system is the core of USVs, responsible for environmental perception, decision-making, and motion control, which collectively enable autonomous mission execution and integration into systematic operations. This study provides a comprehensive review of the fundamental technologies underpinning USV intelligent navigation, critically evaluates existing challenges, and proposes future research directions to advance and expand the application of intelligent navigation technologies for USVs. The research aims to bridge existing knowledge gaps, providing a foundation for the further development of autonomous maritime systems. [**Method**] This research provides a comprehensive review of the current state of intelligent navigation technologies for USVs, focusing on three critical areas: environmental perception, decision-making and planning, and motion control. (a) In the domain of environmental perception, the primary sensing modalities include visible light, infrared, sonar, electromagnetic signals, navigation radar, and LiDAR. With advancements in multi-source information fusion technology, perception techniques have evolved from relying on single sensors to utilizing multi-sensor fusion, transitioning from object-level fusion to feature-level fusion. Despite these advancements, achieving accurate and efficient environmental perception remains a key challenge. The ability to provide real-time, comprehensive environmental awareness is essential for USVs to navigate autonomously in complex maritime conditions. (b) For decision-making and planning, a variety of methodologies, including operations research, optimization algorithms, and AI-based approaches, have been employed to generate optimal decisions under multiple constraints, such as mission parameters, payload configurations, and environmental factors. Existing technologies facilitate global path optimization, target tracking, and emergency collision avoidance under predefined conditions. However, challenges remain in multi-objective adversarial decision-making and path planning in highly dynamic and adversarial environments, especially under strong external interferences. The ability to enhance decision-making robustness in these scenarios is crucial for advancing autonomous USV capabilities. (c) In motion control, various algorithms such as proportional-integral-derivative (PID) control, model predictive control (MPC), model-free adaptive control (MFAC), linear quadratic regulators (LQR), robust control, and sliding mode control have been applied to achieve accurate trajectory tracking, course keeping, and speed regulation. Current advancements allow for precise control under design conditions; however, adaptive control remains a challenge in scenarios with extreme environmental variations. Moreover, effective control of roll and pitch motions remains underdeveloped, limiting USV stability in high sea states. Motion control techniques serve as the foundation of USV intelligent navigation, ensuring the successful implementation of autonomous navigation systems. [**Results**] The study identifies key limitations. In environmental perception, while current technologies allow for target detection and identification in open seas, their accuracy significantly decreases under adverse weather conditions, such as fog, heavy rain, and high sea states. Real-time wave field perception remains inadequate, further compromising navigation safety in dynamic operational conditions. Decision-making and planning algorithms, though effective in structured mission scenarios, struggle with the complexity of dynamic constraints, adversarial interactions, and unexpected environmental disturbances in real operations. Motion control strategies, while efficient under nominal operating conditions, require enhanced adaptability to handle sudden environmental shifts and complex vessel dynamics. The inability to manage roll and pitch movements effectively limits the operational capability of USVs in high sea states. [**Conclusions**] To address these challenges, the study proposes four key technological advancements and research directions. First, the development of high-precision six-degree-of-freedom (6-DoF) motion modeling for USVs will provide a robust framework for intelligent navigation algorithms. Second, the integration of large-scale AI models for multi-modal perception and decision-making will enhance autonomous situational awareness and adaptive response capabilities. Third, the advancement of high-sea-state adaptive navigation technologies through real-time wave observation and predictive motion modeling will significantly improve USV stability and safety in complex maritime environments. Additionally, the incorporation of real-time optimization techniques will enhance navigation efficiency under operational constraints. These technological developments will not only expand the application scope of USVs but also significantly improve their autonomous navigation capabilities. The study emphasizes the necessity of interdisciplinary research efforts that integrate AI-driven models, control theory, and maritime engineering to accelerate the development of fully autonomous USVs capable of performing in diverse operational conditions.

Key words: unmanned vehicles; environment perception; sensor data fusion; decision-making and planning; motion control; motion planning; large models