

中国学术期刊网络出版总库 (CNKI) 收录

万方数据数字化期刊群收录

超星数字期刊数据库收录

维普网数据库收录

ISSN 2096-5915

CN 10-1565/TJ



无人系统技术

UNMANNED SYSTEMS TECHNOLOGY

主管：中国航天科工集团有限公司 主办：北京海鹰科技情报研究所

“水面无人系统平台自主航行及协同控制”专刊

专刊主编 马勇 (武汉理工大学)
专刊共同主编 彭周华 (大连海事大学)
范云生 (大连海事大学)
廖煜雷 (哈尔滨工程大学)
祝贵兵 (浙江海洋大学)

ISSN 2096-5915



9 772096 591229

2022.1
第5卷 NO.



无人系统技术

WUREN XITONG JISHU

第 5 卷第 1 期
2022 年 2 月

目 次 CONTENTS

· 系统综述 · Systematic Review

水域无人系统平台自主航行及协同控制研究进展	马 勇, 王雯琦, 严新平 (01)
Research Progress on Autonomous Navigation and Cooperative Control of Water Area Unmanned System Platform	MA Yong, et al (01)

· 集群协同与控制 · Swarm Cooperation and Control

规则空间下基于 MRFC-Vicsek 模型的集群控制	徐 博, 王朝阳 (17)
Cluster Control Based on MRFC-Vicsek Model in Rule Space	XU Bo, et al (17)
基于 CPSO 算法的海空跨域无人飞行器集群协同作业路径规划	殷 翔, 李培正, 骆曹飞, 等 (26)
A Cooperative Path Planning Strategy Based on CPSO Algorithm for Sea-air Cross-Domain Unmanned Vehicle Cluster	YIN Xiang, et al (26)

· 航迹规划 · Route Planning

基于 FP-TSDP 算法的船舶轨迹压缩	江海洋, 高 超, 马 勇 (36)
Ship Trajectory Compression Based on FP-TSDP Algorithm	JIANG Haiyang, et al (36)
基于双目视觉定位技术的无人船航迹跟踪控制室内模型实验	雷 洁, 徐文华, 许国冬, 等 (43)
Indoor Model Experiment of Unmanned Ship Track Tracking Control Based on Binocular Visual Positioning Technology	LEI Jie, et al (43)
海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划研究	李 可, 宋志斌, 刘骁锋, 等 (51)
Optimal Energy Path Planning for Oceanic Energy-driven Vehicle	LI Ke, et al (51)

· 目标定位与跟踪 · Target Location and Tracking

基于雷达数字孪生的水上多目标跟踪方法研究	徐凯凯, 宋利飞, 史晓骞, 等 (60)
Research on Water Multi-target Tracking Method Based on Digital Twin of Radar	XU Kaikai, et al (60)
一种基于极坐标模型的多 AUV 协同导航与定位算法	张洪酥, 王 盛, 王 涛, 等 (69)
A Cooperative Navigation and Positioning Algorithm of Multi-AUVs Based on the Polar-coordinate Model	ZHANG Haosu, et al (69)

· 平台测试与应用 · Platform Testing and Application

基于半实物仿真的水面无人艇测试系统构建方法	胥凤驰, 谢杨柳, 董洁琳, 等 (80)
Construction Method of Unmanned Surface Vessel Test System Based on Hardware-in-the-loop Simulation	XU Fengchi, et al (80)
考虑浮绳联结的双无人船艇系统协同控制策略研究	朱鹏祥, 李培正, 马赛男, 等 (88)
Research on Cooperative Control of Surface Unmanned System Platform	ZHU Pengxiang, et al (88)

[引用格式] 马勇, 王雯琦, 严新平. 水域无人系统平台自主航行及协同控制研究进展[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 1-16.

水域无人系统平台自主航行及协同控制研究进展

马勇^{1,2}, 王雯琦^{1,2}, 严新平^{2,3,4}

(1. 武汉理工大学航运学院, 武汉 430063; 2. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063;
3. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063; 4. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063)

摘要: 水域无人系统平台是指可通过远程遥控、无人驾驶、自主航行等方式达成任务的一类平台, 涵盖无人船艇及其所配备的无人机、自主水下机器人等。自主航行及协同控制理论技术水平是水域无人系统平台的核心所在, 已成为船舶与海洋工程及水上交通等领域的热点研究方向。为掌握水域无人系统平台的自主航行及协同控制方面的发展动态和趋势, 综述了水域无人系统平台自主航行及协同控制的研究进展。阐述了水域无人系统平台的研究现状, 梳理了水域无人系统平台智能感知、智能航行、协同控制、网络安全等航行和作业关键技术, 分析了水域无人系统平台面临的机遇与挑战。

关键词: 水域无人系统平台; 智能感知; 智能航行; 协同控制; 网络安全

中图分类号: U664.82 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2022)01-01-16

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.001

Research Progress on Autonomous Navigation and Cooperative Control of Water Area Unmanned System Platform

MA Yong^{1,2}, WANG Wenqi^{1,2}, YAN Xinping^{2,3,4}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China; 3. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Water area unmanned system platform refers to a kind of platform on the basis of unmanned surface vehicle via several navigation means including remote control, unmanned driving, and autonomous navigation to achieve tasks, and can be equipped with unmanned aerial vehicle, autonomous underwater vehicle, etc. The theoretical and technical level of autonomous navigation and collaborative control is the core of the water area unmanned system platform, and has become a hot research direction in the fields of ship and marine engineering and water transportation. In order to grasp the development trend and development trend of autonomous navigation and cooperative control of water area unmanned system platform, this paper summarizes the research progress of autonomous navigation and cooperative control of water area unmanned system platform. This paper expounds the research status of the water area unmanned system platform, sorts out the key technologies of navigation and operation of the water area unmanned system platform, such as intelligent perception, intelligent navigation, collaborative control, and network security, and analyzes the opportunities and challenges faced by the water unmanned system platform.

Key words: Water Area Unmanned System Platform; Intelligent Perception; Intelligent Navigation; Collaborative Control; Network Security

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(52022073, 62073251); 湖北省自然科学基金(2020CFA055)

1 引言

随着船舶工业和人工智能技术的持续发展,以自主、智能为突出优势的水域无人系统平台,已在海洋科考、海事管理等水上作业活动中发挥了巨大作用,是未来船舶工业和水上交通领域发展的重要方向之一。水域无人系统平台(Water Area Unmanned System Platform, WAUSP)是以无人船艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)为基础,同时引入了无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)以及自主水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)等协同单元,各无人系统间有机协同、紧密耦合,共同执行相关作业任务,具备安全可靠、智能自主、经济高效等优点。水域无人系统平台的充分应用,可降低操作成本,提升作业效率,减少人员参与,扩大操作范围,亦可在恶劣危险环境下执行作业任务,创造显著的社会经济效益。

无人系统平台一般分为同构系统和异构系统两大类。在同构系统中,同一类型的航行器在同一环境中协同执行某一任务。例如,多艘无人船艇在水域执行串联卸载作业^[1]、区域搜索^[2]、船舶补给^[3]。在远距离作业中,一艘母船搭载多艘无人船艇航行,承担运输、供电和回收等功能,抵达作业水域后,释放无人船艇来执行勘探和海面巡逻任务^[4]。与同构系统相比,异构系统含有不同类型的航行器,能够处理海空监视、目标跟踪和通信等跨域协同任务^[4]。水域无人系统如仅由同一类型的无人船艇构成,则为同构系统;如由多种类型的无人船艇构成或者引入了无人机或自主水下机器人^[5],则为异构系统。

目前,水域无人系统被全球多个发达国家和地区作为重点发展对象,其用途在不断拓展,如应用于海洋科考、资源勘探、水上安全保障等领域,承担水文探测、应急搜救、情报搜集、监视侦察等任务,推动了水域有人系统平台的少人化、无人化、自主化、智能化发展进程。水域无人系统平台开展作业时,需具备自主航行能力,各无人系统间需实现有序、安全、高效的协同控制,

以确保顺利实施各项作业任务。

2 水域无人系统平台研究进展

信息通信、人工智能等新技术、新理念迅速发展为推动水域无人系统平台快速发展提供了有力支撑。水域无人系统平台在战略制定和理论技术两方面的研究进展如图1所示。

诸多国家和地区高度关注无人系统发展战略制定工作。我国2015年提出的《中国制造2025》规划中要求推进无人系统产业化快速发展^[6],全面推广应用以绿色、智能、协同为特征的先进设计技术。2016年,日本防卫省防卫装备厅制定了《未来无人装备相关研究开发愿景》,力争在未来20年具备无人战斗机群协同作战的技术研发能力。2018年,美国国防部发布《无人系统综合路线图(2017—2042)》^[7],以促进军用无人水面艇、无人机、无人潜航器等无人系统的全面发展,确定了无人系统未来发展的4个关键技术,即互操作性、自主性、网络安全以及人机协同。同年,我国工业和信息化部等三部门联合印发了《智能船舶发展行动计划(2019—2021年)》^[8],明确提出突破智能航行等关键智能技术的重点任务。2020年,中国船级社发布《智能船舶规范(2020)》^[9]。2021年,国家海事局公布了《海事系统“十四五”发展规划》^[10],明确提出以推动“陆海天空”一体化水上交通运输安全保障体系建设为发展目标,扩大典型智能船舶“一个平台+N个智能应用”的示范推广。

近年来,水域无人系统平台理论技术工作得到了广泛的关注,进展显著。如图1所示,2014年,哈尔滨工程大学研制的天行I号多任务高速无人艇,可用于执行全自主海洋环境监测、地形探测等任务^[11]。2015年,DARPA启动了跨域海上监视和追踪(CDMaST)项目^[12],明确制定了“实现面向海洋的跨域协同体系集成”的目标。2016年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司开发了跨域异构无人系统协同作战控制架构“先进任务管理与控制系统”(AMMCS);英国奎奈蒂克公司开

发 ACER 系统, 实现单系统对多个无人船艇、无人机和自主水下机器人的指挥控制; 中国首款海洋测量专业无人船艇 M80 实现了智能吊放的过程^[13]。2017 年, 以色列成功测试全球首艘可发射导弹无人艇^[14], 以执行海域巡逻、侦察、辨别、拦截敌舰、反恐、水雷战、电子战和精确打击等任务。同年, 武汉理工大学严新平及其团队创立“航行脑”架构^[15], 并研发了“船岸协同安全辅助驾驶系统”。2018 年, 由欧盟 15 个国家联合开展的首个跨欧洲军事研究项目——海洋 2020 (OCEAN 2020)^[16]在欧洲防务局启动, 以支持

海上监视和拦截, 重点把无人船艇在内的各类无人系统整合到舰队中。同年, 美国、英国等 13 个北约成员国签署了合作意向, 在水面无人系统和水下无人系统的开发和部署方面密切合作^[17]。2019 年, 美国通用动力公司开展无人船艇、自主水下机器人、濒海战斗舰以及核潜艇等无人作战平台的跨域协同通信、探测信息传输验证工作。同年, 武汉理工大学马勇等^[18]提出一种船舶智慧航行平台框架及航行方法。2020 年, 英国 BMT 公司研制的新一代五体无人水面艇可为国防和商用客户执行军事、巡逻、情报监视侦察、反潜



图 1 水域无人系统平台研究进展

Fig. 1 Research progress of the water area unmanned system platform

战和水文测量任务。2021 年，由哈尔滨工程大学牵头的海洋机器人集群智能协同项目完成海试^[19]。Liu 等^[20]综述了无人船艇开发的新进展。针对无人机-无人船艇-自主水下机器人系统编队避障问题，Yang 等^[21]提出了一种分布式最优控制的方法。

由上可知，国内外大力发展水域无人系统平台理论技术研究工作，初步解决了同水域无人系统平台自主航行、协同控制密切相关的关键技术问题。水域无人系统平台将会切实提升航运和船

舶工业等行业的无人技术水平，成为行业高质量发展的新引擎。

3 水域无人系统平台关键技术

如图 2 所示，水域无人系统平台以无人船艇等航行器为载体，以涵盖智能感知、智能航行、协同控制、网络安全等关键内容的技术体系为支撑，可以实现自主航行、协同编队等各项作业任务。

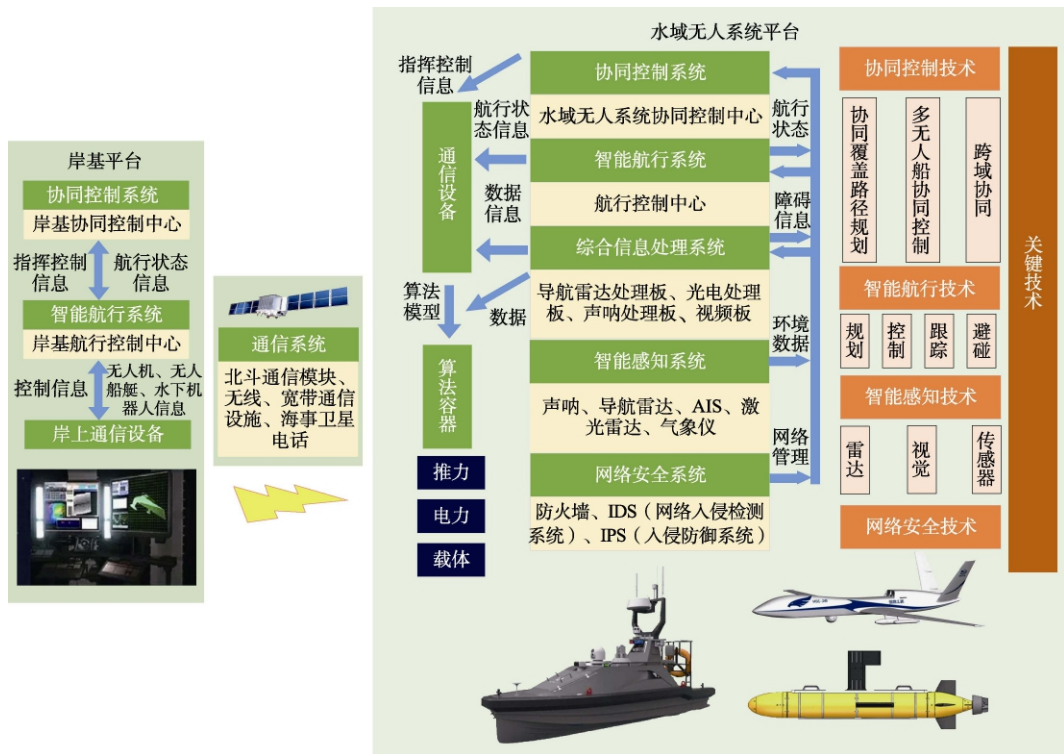


图 2 水域无人系统平台结构及关键技术

Fig. 2 Structure and key technologies of the water area unmanned system platform

3.1 水域无人系统平台智能感知技术

智能感知技术是指通过雷达、摄像头、AIS (Automatic Identification System) 等各类传感器、传感网络以及信息处理设备，获取航行器自身信息以及周围海洋环境信息，为航行器安全、可靠地航行提供信息支持。水域无人系统平台智能感知框架如图 3 所示。

水域无人系统平台的感知系统主要利用搭载传感器设备以及信息处理技术设备，获取其自身

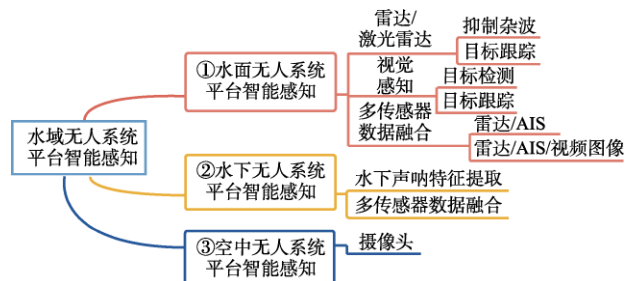


图 3 水域无人系统平台智能感知框架

Fig. 3 Intelligent perception framework of the water area unmanned system platform

状态信息和运动环境周围各种信息, 为平台自主避碰、路径规划及跟踪、水上作业提供信息支持。以无人船艇为例, 其状态信息主要包括船载设备信息, 以及航行位置、速度和方向等信息; 周围环境信息包括周围其他船只以及障碍物的状态信息、潮汐、水流等海洋状态信息以及天气状态。无人船艇感知技术主要分为以下几类。

3.1.1 基于雷达/激光雷达的环境感知技术

雷达有远、中、近三挡量程, 测量范围涵盖 1~48 海里, 其应用有一定的局限性, 例如: 障碍物的视线必须远离其他障碍物才能够被检测到; 一个物体只有在雷达的最小和最大探测范围内才能被探测到; 受雨雪等天气状况和桥梁等水上建筑物的影响, 其适用范围受限。激光雷达的工作原理与雷达类似, 但其测量范围较小、精度更高, 易受到直接视线、探测范围、扫描速度、天气条件和物体横截面等方面的限制。总体而言, 基于雷达/激光雷达的环境感知技术研究一般聚焦于抑制杂波和各类目标的识别与定位^[22]。

3.1.2 基于视觉的环境感知技术

视觉传感器是基于机器视觉获取周围环境的图像信息, 通过对相机采集到的图像进行处理, 从而达到对环境感知的作用, 以获取广泛的信息。随着各类摄像头的研发, 视觉传感器几乎可以应用于各种复杂条件下的环境感知, 如红外摄像头和微光全彩摄像头可在夜间提供较清晰的视觉图像; 热成像摄像头和超长高清透雾镜头能够有效透雾, 服务于船舶雾航。基于视觉的环境感知技

术在水上目标识别检测与跟踪研究中得到有效应用, 属于图像处理范畴。Qi 等^[23]提出了一种改进的舰船目标检测 Faster R-CNN 算法, 通过减小目标检测搜索规模, 以缩短算法的检测时间, 同时提高 Faster R-CNN 算法的检测精度。Zhang 等^[24]针对复杂海洋环境目标跟踪, 提出了一种基于置信度机制的并行三分支相关滤波器来检测目标的外观变化和位置变化, 提高了目标跟踪的鲁棒性。Lee 等^[25]使用基于深度学习的检测模型 YOLO (You Only Look Once) v3 构建船舶检测模型, 利用 Unity 构建了虚拟图像数据集, 可实现各种尺寸船艇获取摄像头图像, 提高了检测性能。

3.1.3 基于多传感器数据融合的环境感知技术

如表 1 所示, 各类船用传感器都有其优缺点, 雷达感知受杂波影响较大; 视觉感知缺少深层次的船舶航行数据; AIS 属于被动感知, 一旦周围船舶关闭 AIS, 或者发出错误信息, AIS 的感知能力就不复存在。为实现优势互补, 现有研究将多种传感器数据融合应用。Habtemariam 等^[26]使用联合概率数据关联 (JPDA) 框架提出了一种新的测量级融合算法, 实现了雷达和 AIS 数据的融合, 能够有效处理船只之间的 MMSI 交换及丢失事宜。Mostafa 等^[27]使用模糊函数依赖方法 (FFDs) 将来自 AIS 和甚高频 OTH 雷达的数据进行融合, 证实了此方法可有效应对来自不同传感器的数据不确定性问题。Kim 等^[28]提出了一种数据关联方法, 用于融合视频图像信息和雷达信息, 以便自动检测船舶并确定其相对于观测船的位置。

表 1 船用感知传感器比较
Table 1 Comparisons of ship sensors

传感器	优势/特征	缺点
雷达	①检测范围长 (1~48 海里) ②良好的速度估计 ③全天候和宽阔区域的检测 ④高分辨率和精度	①有限的小型和动态目标检测 ②受杂波影响较大 ③因快速旋转动作而扭曲数据
激光雷达	①擅长近距离障碍检测 ②高分辨率和精度 ③直接获取环境的三维信息	①数据噪声大 ②受环境影响大 ③距离成像速度慢
AIS	①通信可靠性高, 受气象海况影响小 ②AIS 不存在盲区 ③发现远距离物标能力强	①会产生目标丢失等现象 ②除船只外的海上其他目标无法探测
视觉	①探测范围广, 监测信息量大 ②安装方便且操作简单	①计算量大 ②缺乏多维度, 深层次目标信息

由于水域无人系统平台作业环境处于水下与空中的交界处,为进一步提升平台作业范围和作业效率,平台上可配备水下潜航器和无人机等水下及空中无人作业装备。水域无人系统平台的感知能力可通过水下潜航器和无人机得以有效延伸。水下潜航器的感知主要通过水下声呐实现,目前的研究多集中在特征信号提取,少部分研究关注声呐同其他传感器数据的融合。Remmas 等^[29]为无人潜航器提出了一种基于视觉和听觉信号数据融合的环境感知方法。无人机的感知主要通过摄像头实现,业内较多关注各类摄像头的充分利用。Falanga 等^[30]通过事件相机实现了四旋翼无人机的障碍物快速检测和避碰。Leira 等^[31]利用热像仪,实现了无人机对海上物标进行检测、识别和跟踪。

3.2 水域无人系统平台智能航行技术

无人船艇智能航行技术的发展为水域无系统平台在水上交通中的应用奠定了基础。中国船级社发布的《智能船舶规范》^[32]指出,智能航行是通过计算机技术、控制技术等各类智能船舶的航路和航速进行设计和优化。水域无系统平台智能航行技术主要包括路径规划、运动控制、目标/轨迹/路径跟踪、自主避碰等关键技术。

3.2.1 水域无人系统平台路径规划技术

水域无人系统平台路径规划主要指在复杂海洋环境下,为以无人船艇为基础的水域无人系统平台规划一条或者多条连接起止点的安全经济、无碰撞的高质量路径,其技术原理如图 4 所示。

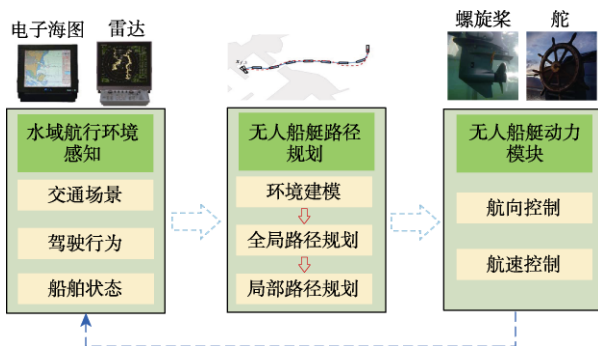


图 4 无人船艇路径规划技术框图

Fig. 4 Technical block diagram of path planning for unmanned surface vehicle

根据对环境信息掌握的程度不同,路径规划分为全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划是在环境信息已知前提下,建立海洋环境空间模型,在运动空间中为其在起止点间规划路径。局部路径规划通过传感器实现水域环境信息感知,为水域无人系统平台规划有障碍物场景的路径。如图 5 所示,路径规划算法主要有经典算法、启发式算法和混合算法等。

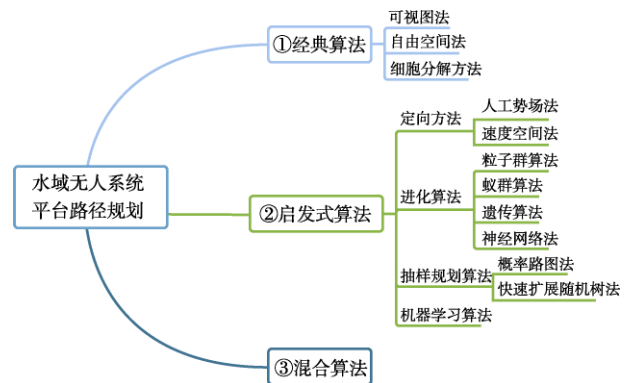


图 5 水域无人系统平台路径规划算法分类

Fig. 5 Classification of path planning algorithms for the water area unmanned system platform

(1) 经典算法

经典算法通常计算所有可能遵循的路径来产生全局最优路径,常用于具有静态障碍物的全局离线路径规划。Niu 等^[33]针对无人船艇路径规划问题,提出了一种基于 Voronoi 图和可视图的 Voronoi-Visibility (VV) 路径规划算法。考虑到海流状态对无人船艇的能量消耗有显著影响,为增进无人船艇的续航能力,Niu 等^[34]将 Voronoi 图、可视图、Dijkstra 搜索函数和能量消耗函数相结合,提出了一种基于海流数据的考虑能量消耗的无人船艇可行路径规划方法,确保无人船艇能够以最小的能量避开障碍物。

(2) 启发式算法

启发式算法通过搜索所有可能解的子集来规划路径,用于实时处理动态障碍物、路径重规划和局部避碰,常见的有机器学习算法、定向方法、进化算法和抽样规划算法。针对一种多用途无人船艇系统的多任务分配和路径规划问题,Xia 等^[35]提出一种具有最短路径的改进遗传算法。针对不

确定环境下无人船艇的路径规划问题, Li 等^[36]提出了一种基于深度强化学习和融合避碰函数的路径规划策略。针对水流和波浪扰动下的无人船艇路径规划问题, Wen 等^[37]提出了一种改进的渐近最优快速扩展随机树方法。

(3) 混合算法

为增进算法的路径规划能力, 实现优势互补, 混合算法应运而生。Sang 等^[38]为了保证编队轨迹的最优性、合理性和路径连续性, 提出一种改进的 A*和人工势场混合算法。Chen 等^[39]提出了一种有效结合全局和局部路径规划的混合算法来实现动态障碍环境下的路径规划, 首先由 A*算法生成无人船艇到达目标点的全局路径, 然后在局部路径规划中采用动态窗口算法, 最后通过跟踪局部目标点来避开动态障碍。

3.2.2 水域无人系统平台运动控制理论

如图 6 所示, 水域无人系统平台运动控制问题通常分为镇定控制、轨迹跟踪控制和路径跟踪控制三类^[40-41]。

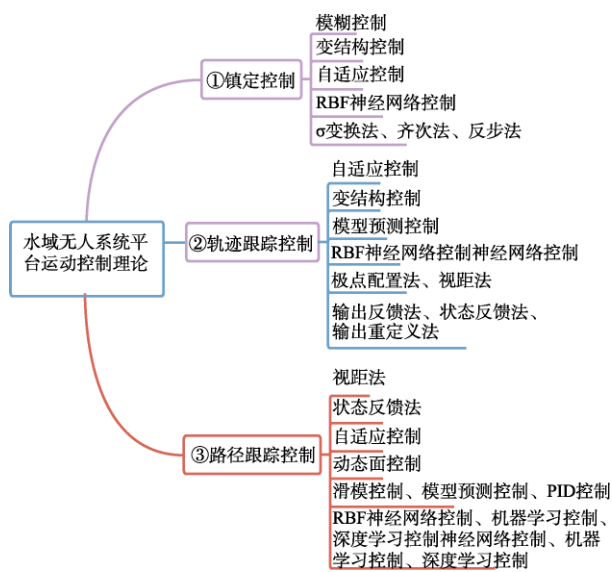


图 6 水域无人系统平台运动控制理论分类

Fig. 6 Classification of motion control theory for the water area unmanned system platform

(1) 镇定控制

镇定控制通过寻求合适的控制器, 实现航行器速度、航向和位置等镇定到某一个平衡点上。在无人船艇镇定控制领域, 常见的方法有 δ 变换

法、齐次法、反步法、滑模控制以及模糊控制等。Xie 等^[42]提出了一个独立于速度信号并且对模型参数具有鲁棒性的控制律, 可渐近地将无人船艇的位置稳定到所需的恒定位置, 并将其速度稳定为零。Wang 等^[43]提出了一种用于欠驱动无人船艇全局全状态稳定的事件触发控制器 (ETC), 通过选择适当的控制参数来保证稳定误差的全局渐近收敛。He 等^[44]提出一种基于李群对数图的点稳定控制器, 将欠驱动无人船艇全局渐近地稳定到所需的配置。

(2) 轨迹跟踪控制

轨迹跟踪控制的速度、航向和位置等状态与时间关系密切, 且要求航行器在规定的时间内到达指定位置。对于浅水域乘潮、海上侦查与监测、动态目标跟踪等水上作业, 其控制问题属于航迹跟踪控制问题的范畴。Deng 等^[45]研究了基于事件触发机制的无人船艇自适应模糊输出反馈路径跟踪控制, 通过对估计误差的转换, 建立了自适应模糊观测器来估计无人船艇的运动状态, 进而建立了一种串并联估计模型。Elhaki 等^[46]提出了一种饱和轨迹跟踪控制器, 将双曲正切函数用作稳定器项, 通过动态表面控制方法设计跟踪控制器, 以提高控制器性能。针对预设性能控制方法和鲁棒控制方法存在奇异性问题或控制信号不连续等问题, Zhang 等^[47]设计了一种自适应预设性能控制策略, 通过对位置误差和辅助变量施加约束, 实现船舶的预设性能。当前研究较多关注轨迹跟踪控制^[48-51]。针对速度不可测、动态不确定性和未知外部扰动对无人船艇轨迹跟踪控制问题, Zhu 等^[51]提出了一种具有预定义性能的自适应神经输出反馈轨迹跟踪控制方案。Du 等^[52]提出一种自适应鲁棒输出反馈控制器, 通过引入高增益观测器估测无人船艇航向和速度, 建立 RBF 神经网络对无人船艇模型不确定性进行估计补偿。

(3) 路径跟踪控制

路径跟踪控制过程与时间变量无关, 通过设计不同的高鲁棒性控制器使航行器能够跟踪并稳定在预设的路径上。针对无人船艇存在输入饱和、非对角质量矩阵、模型不确定性和未知时变

外部扰动的问题, Xia 等^[53]提出了一种基于浪涌航向视距制导律的自适应神经网络路径跟随控制策略。针对欠驱动无人船艇遭遇时变洋流和侧滑角的问题, Nie 等^[54]提出了一种基于改进的自适应积分视线 (IAILOS) 制导律的自适应模糊路径跟随控制律, 并结合反步法解决了无人船艇姿态跟踪控制和速度跟踪控制问题。

3.2.3 目标/轨迹/路径跟踪技术

以无人船艇为基础的水域无人系统平台在执行各类任务时需要有效跟踪预定路径, 抵御风浪流等环境干扰, 进而顺利完成任务目标。Fossen 将跟踪问题分为目标跟踪、轨迹跟踪和路径跟踪。

如图 7 所示, 目标跟踪的第一类引导律为 Line-of-sight (LOS) 引导律^[55]及其变体。Zheng 等^[56]在改进了自适应积分制导方法的基础上, 提出了一种具有不确定性的无人船艇的非线性跟踪控制方法。Walter 等^[57]在比例 LOS 制导方法上提出了 ILOS (Integral Line-of-sight) 制导方法, 并根据李雅普诺夫函数得出了制导控制律的明确界限, 保证了一致全局渐进稳定性和一致局部指数稳定性。Fossen 等^[58]利用自适应律主导漂角的补偿速率, 提出了 ALOS (Adaptive Line-of-Sight) 制导方法, 该方法计算量小, 是 ILOS 的一种特殊形式。第二类为 pure pursuit 方法^[59], 无人船艇需以目标的位置为目标点实时跟踪。第三类为 constant bearing 方法, 在已知目标的位置及航速等信息下进行拦截跟踪。为了保证拦截任务的效率和有效性, Du 等^[60]开发了一种无人船艇拦截任务的安全学习方案, 提出适用于无人船艇拦截任务的安全 Lyapunov 边界深度确定性策略梯度 (SLDDPG) 算法。Fan 等^[61]提出了一种重新定义

Dubins 路径的方法, 更快地匹配出符合出发地航向角和目的地航向角的最优路径, 进行水域目标拦截。

面向多无人船艇的轨迹跟踪与镇定问题, Liu 等^[62]提出了自适应鲁棒控制器。针对多无人船艇的轨迹跟踪控制问题, Jia 等^[63]通过结合高增益观测器、参数压缩算法和性能函数, 提出了一种具有指定性能的自适应控制方案。

通过改进无人船艇路径跟踪控制系统, Wan 等^[64]提出了一种降阶状态观测器, 用于在线估计风、浪、流等外部扰动引起的时变侧滑角, 在不同的巡航速度下都能快速平稳地跟踪在期望的曲线和直线路径上。结合 LOS 制导律和基于零空间的行为控制框架, Eek 等^[65]提出一种欠驱动无人船艇在洋流作用下沿曲线路径行进的编队控制方法, 实现了曲线路径跟踪。深度强化学习方法在无人船艇路径跟踪中得到有效的应用^[66-68]。Zhao 等^[66]建立了基于深度强化学习的编队控制模型, 以促使无人船艇形成预先设定的编队。

3.2.4 自主避碰技术

自主避碰技术对于保证水域无人系统平台航行安全至关重要。随着航行信息获取智能化、信息多元化的发展, 面向航行器的操纵性能以及操纵者的思维过程, 结合控制论、信息论、决策论等理论, 综合研究自主避碰技术已成为水域无人系统平台关注的焦点。

Ma 等^[69]通过设计一种广播协议, 实现复杂场景下的群无人船艇自主避碰。Xu 等^[70]提出了一种基于深度强化学习的智能避碰算法, 利用强大的深度神经网络自动提取状态特征, 确保无人船艇避开动态障碍物。Xu 等^[71]为实现无人船艇自主避碰, 设计了无人船艇的航行态势模型, 提出了混合风险评估和避碰模型, 设计了基于强化学习避碰模型的状态、行为、奖励功能和网络结构, 实现复杂环境下的有效避碰。

国际海上避碰规则 (COLREGS) 对指导自主避碰具有重要现实意义。Tor 等^[72]开发了一套基于条件规则的决策过程和模糊推理智能决策系统, 将 COLREGS 中的避让动作融入上述系统

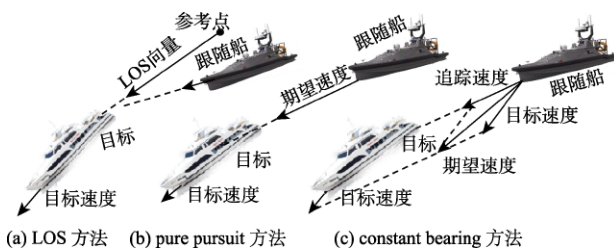


图 7 无人船艇目标跟踪分类

Fig. 7 Target tracking classification of the unmanned surface vehicle

中,实现了遵守 COLREGS 的船舶避让。Zhao 等^[73]对船舶会遇态势划分以及安全距离的制定做了详细分析和验证研究,可根据船舶危险度计算出避碰时机和避碰幅度。Wang 等^[74]设计了基于 COLREGS 的自主避碰算法以确保无人船艇安全航行。轨迹预测是实现水域无人系统平台自主避碰的基础,为了解无人船艇等运动状态趋势提供了有益参考。Lyu 等^[75]研究了具有避碰特性的分布式编队跟踪控制问题,首先利用扩展状态观测器估计每个子系统的未知模型不确定性和外部干扰,然后考虑物理约束和避碰要求,设计了分布式模型预测位置跟踪控制器和模型预测角运动控制器用于编队避碰控制。

3.3 水域无人系统平台协同控制技术

相对单个航行器而言,水域无人系统平台具有空间分布性、功能分布性以及更高可靠性等优点。水域无人系统平台协同控制旨在通过组合具有简单功能的无人船艇、无人机以及自主水下机器人成为一个有机整体,在协同控制技术支持下,使团队中的每个成员各司其职、协同合作,完成水域扫测、围追拦截、水面清污等各类既定任务。

3.3.1 协同覆盖路径规划技术

区域全覆盖路径规划 (Area Coverage Path Planning, ACPP) 是根据任务需求,为航行器/运动物体规划一条覆盖给定区域或空间的最短路径。如图 8 所示,无人船艇及自主水下机器人等多个协同作业单元已被广泛用于搜索和救援行动中。多个协同单元联合作业,可显著提高区域覆盖作业效率、缩短完成任务的时间。如在发生海

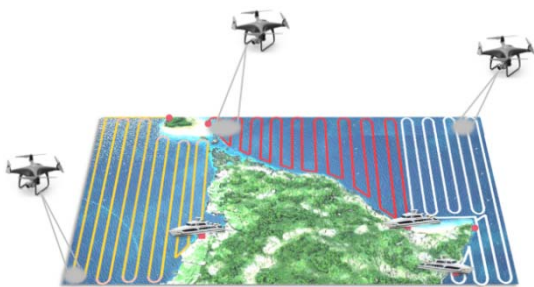


图 8 水域无人系统平台协同扫测效果图

Fig. 8 Collaborative scanning rendering of the water area unmanned system platform

上事故时,能够在最短的时间内有效地扫测事故区域,赢得救援时间。

针对多无人船艇协同覆盖路径规划问题,毕华雄^[76]设计了 CCIBA*算法,提出了区域分割、回溯转移、区域交换和障碍物联合识别等协同行为策略,以增进复杂场景下多无人船艇协同扫测效果。Liu 等^[77]提出了一种基于强化学习和概率映射的协同搜索算法(CSBDRL),使多无人船艇系统具有更高的搜索效率,保证无人船艇在任务过程中及时避开障碍物,能够及时地找到目标。Carisza 等^[78]考虑在有限的运行时间内最大限度地完成多目标水域搜索,使用多层次时间-空间网络来描述无人船艇和母船随时间的运动,进而将覆盖路径规划问题表述成一个整数规划模型。Xie 等^[79]考虑了协同巡逻任务的特点和无人船艇的限制条件,提出了一种基于混合分区的多无人船艇系统巡逻方案,以实现具有重要级别差异的海域目标巡逻。

Zhu 等^[80]建立了无人船艇-自主水下机器人协同巡航模型,为协同巡航提供更准确、实时的导航信息,增进了海事监管效率。针对海上搜救问题, Yang 等^[81]首先采用网格法对搜救区域建模,然后利用 RL (Reinforcement Learning) 规划搜索路径,最后由无人机和无人船艇组成认知移动计算网络来协同搜救,提高通信吞吐量。

3.3.2 多无人船艇协同控制技术

单艘无人船艇往往难以有效地完成水面清污、围堵拦截、护航转运等较为复杂的作业任务,而多艘无人船艇通过协同的方式可以有效承担上述工作。为此,开展多无人船艇协同控制技术的研究具有重要现实意义。

如图 9 所示,多无人船艇协同控制体系可分为集中式、分布式和混合式三种。集中式控制是将一艘综合性能较高的无人船艇作为主控单元,进行任务部署,并将部署信息广播给其他各协同单元,这种体系虽然协调效率较高,但主控单元一旦产生故障将直接导致整个系统的瘫痪,故自主性和鲁棒性较差^[82];分布式控制是每艘无人船艇都具备独立接收命令与分析的能力,可以相互

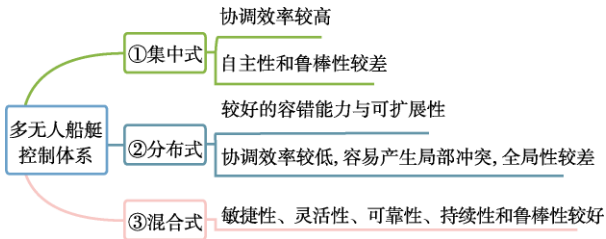


图 9 多无人船艇协同控制体系结构

Fig. 9 Multi unmanned vehicles collaborative control architecture

通信，具有较好的容错性与可扩展性，但多艘无人船艇因地位均等，其协调效率低、全局性较差，易产生局部冲突^[83]。混合式控制兼顾集中式与分布式的优点，具备较好的敏捷性、灵活性、可靠性、持续性和鲁棒性，可满足多无人船艇协同作业需要。

针对多无人船艇协同控制的问题，Arrichiello 等^[84]开展了由浮绳联结两艘水面无人船艇构成的双无人船艇系统控制策略研究，提出基于零空间行为的协同控制方法，即每艘无人船艇的行为由一个主管软件模块控制，处理同另一艘无人船艇的通信以及控制所有基本任务。如图 10 所示，每艘无人船艇执行基本任务，各类任务按优先级排列，并使用基于行为的方法进行合并，最终协同完成所有任务。Giron-Sierra 等^[85]深入开展多无人船艇航行系统研究，分析系统船端、岸端及船-岸通信模块功能需求，构建多无人船艇航行系统，实现岸基-船舶有效协同，最终使用两艘无人船艇搭载溢油清除设备完成溢油围捕任务。Peng 等^[86]提出一种受不确定性和干扰影响的多无人船艇协调动态定位的分布式优化方法，将最

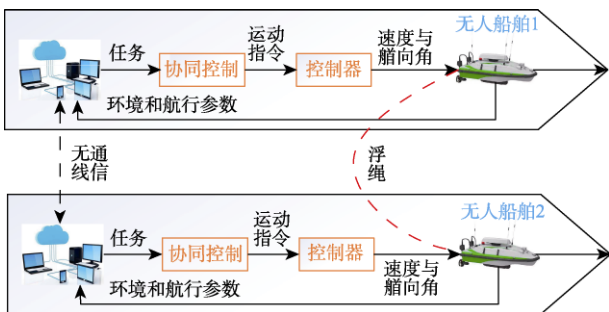


图 10 双无人船艇航行系统分层控制架构

Fig. 10 Hierarchical control architecture of a dual unmanned surface vehicle navigation system

优位置编码在局部函数和中，实现多无人船艇的相对动态定位。

3.3.3 无人机-无人船艇-水下机器人跨域协同技术

无人机/无人船艇/水下机器人等异构无人航行器的跨域协同是当今国际的前沿技术，引起了世界各发达国家和地区的广泛重视，并被列为无人系统发展路线图的战略核心技术。无人机-无人船-水下机器人协同技术及装备对维护我国海洋权益、保障水域资源安全起着至关重要的作用。

水域无人系统跨域协同是指通过智能化的指挥、协同控制和信息交互，将无人船艇、无人机和水下机器人进行有机集成。无人机作为一种空中无人飞行器，具有速度快、视野广等优势，能高效执行各类探测侦查任务；水下机器人作为深水探测和追踪的有效工具，具有隐蔽性强的优点，在海洋探测领域有着不可替代的优势。然而，无人机和水下机器人存在续航能力短、负载能力弱的缺陷，极大地制约了其作业效能。水面无人船艇作为未来水上新型智能装备，具有自主航行、智能避障、续航能力长、载荷能力强等优势，如图 11 所示，可同无人机、水下机器人协同构成立体跨域的水域无人系统平台，以显著增强完成复杂作业任务的能力。

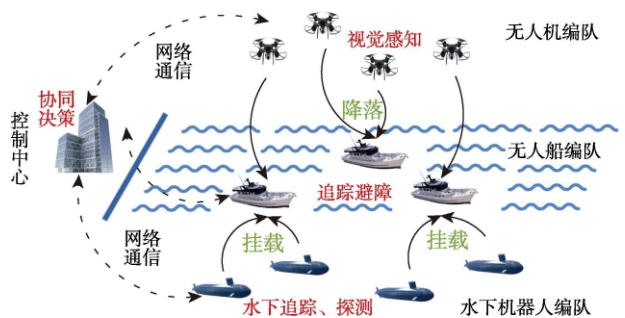


图 11 水域无人系统平台跨域立体协同示意图

Fig. 11 Cross-domain three-dimensional collaboration diagram of the water area unmanned system platform

随着水域无人系统平台对自动化、数字化、集群化和智能化能力要求的深入，相比于同构无人平台，异构无人平台可利用不同个体的优势形成更强的多维空间信息感知能力，完成更为复杂的任务。

如图 12 所示, 可将无人机-无人船艇-水下机器人协同作业类型分为三种: 无人机-无人船艇跨域协同、无人船艇-水下机器人跨域协同以及无人机-无人船艇-水下机器人跨域协同。

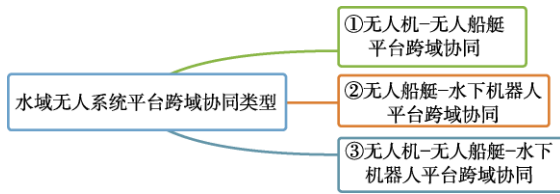


图 12 水域无人系统平台跨域协同类型

Fig. 12 Type of the water area unmanned system platform with cross-domain cooperation

(1) 无人机-无人船艇平台跨域协同

无人机-无人船艇跨域协同平台是以水面无人船艇为载体, 通过自由释放和回收无人机实现协同作业。Ma 等^[87]设计了一种用于无人机-无人船艇的集群协同通信框架。Shao 等^[88]设计了一种分层着陆引导点生成算法, 通过引导点序列实现了无人机在无人船艇甲板上的稳定着陆。Zhang 等^[89]为无人机-无人船艇平台提出了一种新型的全自主回收系统, 该系统覆盖了无人船艇上小型固定翼无人机的回收全过程, 实现了高动态下的相对运动。

(2) 无人船艇-水下机器人平台跨域协同

无人船艇-水下机器人跨域平台协同主要面向水面和水下作业场景, 以无人船艇为载体, 搭载和回收水下机器人, 以胜任同构无人航行器难以承担的复杂水面和水下场景下的作业任务, 具有较高的研究和应用价值。Agra^[90]开发和实现了

一种无人操作的水下检测系统, 由水下机器人与无人船艇来协同完成任务。Sarda 等^[91]进行了水下机器人从无人船艇水下自动发射和回收的测试。Sarda 等^[92]设计和开发无人船艇的高级模糊逻辑制导控制器, 以实现水下机器人的自主发射和回收。

(3) 无人机-无人船艇-水下机器人平台跨域协同

无人机-无人船艇-水下机器人跨域协同为水域无人系统平台的发展奠定了基础, 相关技术可用于水域无人系统平台的协同侦察、快速强力突击、全域集群濒海对抗、精准高效保障等任务。Wigley 等^[93]设计了基于无人船艇-水下机器人组合方法的水下机器人发射、回收新方法。Wu 等^[94]以无人机、无人船艇和 underwater 机器人相结合的水下目标搜索跟踪任务为研究对象, 设计了一种包括搜索阶段和航行阶段的分步动态目标追踪方法, 并使用 IPSO 算法来生成航行器路径。

3.4 水域无人系统平台网络安全技术

随着航运业向自动化、智能化趋势进行部署和发展, 越来越多的网络安全问题及风险也显现出来。如图 13 所示, 水域无人系统平台网络可分为两类: 第一类是用于信息收集和信息管理服务的网络, 如用于海事卫星电话及岸基通信系统, 此类网络通常称为信息网络 (IT 网络); 第二类是负责采集、监视和控制航行器的运行状态, 服务于水域无人系统平台中协同控制系统的网络, 称为控制网络 (OT 网络)。

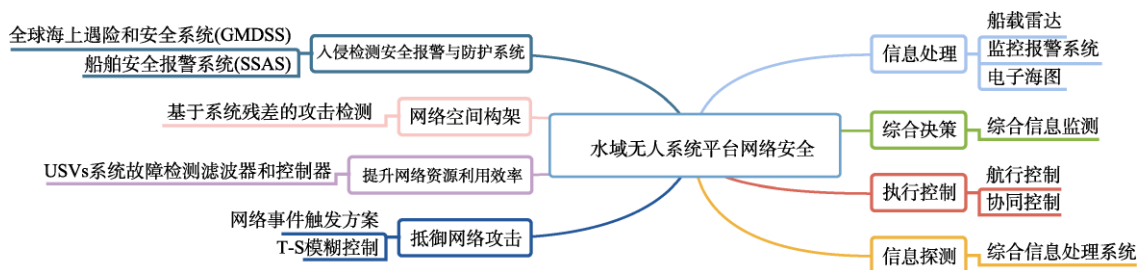


图 13 水域无人系统平台网络安全分类

Fig. 13 Network security classification of autonomous navigation system of the water area unmanned system platform

水域无人系统平台网络结构如图 14 所示。岸基平台的威胁包括软件漏洞、病毒、恶意软件、

木马、键盘记录程序等; 各航行器之间的通信链路的安全威胁包括口令破解、身份欺骗、跨层攻

击和多协议攻击；无人机的传感器、通信、软件和网络等方面易受网络风险攻击；无人船艇易受网络风险攻击的系统包括 GPS、ECDIS、AIS^[95]等。随着网络技术的深入应用，水域无人系统平台网络风险来自更多的方面，如程序中的操作错误、软件缺陷、未经授权访问的系统入侵等问题，当平台的传感器测量和控制命令通过网络通道传输时，会存在通信延迟、数据包丢失现象^[96]。

目前，在水域无人系统平台网络安全研究中，网络安全防护措施是针对各航行器的网络特点来开展的。在网络层与网络层连接处设置网络防火墙，尤其是在与卫星通信的接口处设计严格的进出规则，对出入口流量进行监控与限制，使攻击者接触不到水域无人系统平台核心的控制网络，从而保证水域无人系统平台网络安全。

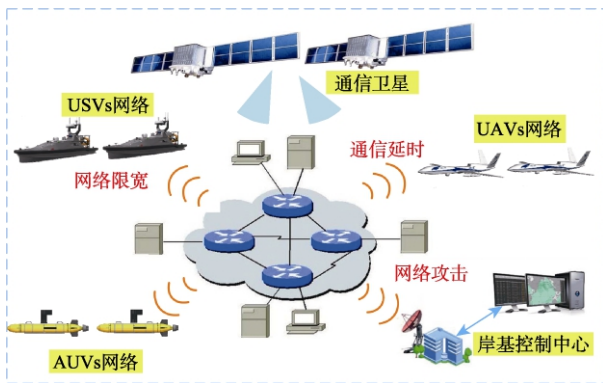


图 14 水域无人系统平台网络结构

Fig. 14 Network structure diagram of the water area unmanned system platform

对于绕过卫星通信，直接针对航行器实体进行的局域网攻击，目前的防御手段通常是建立入侵检测与安全报警与防护体系。例如，全球海上遇险和安全系统（GMDSS）及船舶安全报警系统（SSAS）针对已知威胁进行的局域网攻击可以起到良好的报警与防护措施。

在提升网络资源利用率和抵御网络攻击方面，Ma 等^[97]基于网络通信延迟、外部干扰、故障和非周期拒绝服务协同设计了一种无人船艇系统故障检测滤波器和控制器，有效提高了网络资源利用效率，抵御网络攻击，保障无人船艇通信安全。Ma 等^[98]设计了一种基于网络事件触发方

案船舶 T-S 模糊控制器，抵消了通信延迟对无人船艇控制系统性能的不利影响，保证了无人船艇正常通信。

网络和信息化技术的迅猛发展促进了水域无人系统平台应用技术水平的提升，同时也带来了许多网络安全风险。如何有效提升网络安全水平，保障智能航行和安全通信，将是水域无人系统平台发展亟需解决的一个重要问题。

4 水域无人系统平台面临的机遇与挑战

水域无人系统平台呈现出作业单元由个体向集群协同、作业环境由单一环境向复杂立体环境、作业能力由简单功能向复杂功能的发展趋势。面向水域无人系统平台自主航行及协同控制问题，需持续突破智能感知、智能航行、协同控制、网络安全等关键技术，以推动水域无人系统平台发展到一个新的阶段。

（1）智能感知技术

为实现水域无人系统平台远程控制，需配备各类大量的传感器，感知各类信息，进而实现平台有效感知航行环境信息和平台航行状态信息，为智能航行提供基础信息支持。为此，有必要建立端-岸-云协同通信系统，实现采集信息的多样化和立体化。为有效应对多源异构数据融合以及海量数据传输，应发展适用于处理海量数据的硬件和软件系统，提升数据处理和传输的效率，实现水域无人系统平台的智能感知。

（2）智能航行技术

以无人船艇为基础的水域无人系统平台，对算法的鲁棒性和自适应性要求较高，需要研究更为稳定、可靠、高效的智能航行算法，以有效应对海洋复杂环境扰动。为实现恶劣环境下的高精度路径/轨迹跟踪，需要为水域无人系统平台设计和实现复杂环境的欠驱动智能航行控制器。同时，为增进水域无人系统平台的作业能力，应在智能航行技术中进一步体现出航行经济性的需求。

（3）协同控制技术

跨域协同是水域无人系统平台发展的高级阶

段,也是应对日益复杂的环境和使命的重要技术途径与应用手段。随着智能技术的高速发展,跨域协同势必将为水域无人系统的发展带来更多契机,在未来侦察巡逻、深远海作业、海上救援、地理测绘、环境监测、海洋探索等军用和民用领域发挥重要的作用。

因水域无人系统平台的应用场景多变,其功能节点和应用要素极为复杂,需进一步关注协同控制技术的接口标准化问题,进而加快推动平台实用化进程。

(4) 网络安全技术

水域无人系统平台在构建和实现过程中,充分应用了无线局域网、WIFI、LTE/4G、5G 等多种通信手段,使得通信系统暴露于网络安全风险的可能性显著提升。网络攻击不仅难以循迹且持续时间难以估量,而且造成的损失更加惨重。随着水域无人系统平台自主化水平的持续发展,平台自主航行及协同控制方面对信息感知、交互、融合的需求日益增加,黑客们就越容易发现并利用漏洞,实施攻击。同时网络安全领域可能会涉及更多的动态风险,为保障水域无人系统平台的网络安全保障带来了新的挑战。

5 结 语

本文介绍了水域无人系统平台自主航行及协同控制的研究现状,分析了平台智能感知、智能航行、协同控制、网络安全等关键技术研究进展,提出了水域无人系统平台面临的挑战与机遇。人工智能、信息通信等领域前沿技术的深入发展,将为持续突破自主路径规划及跟踪、自主航行及协同控制、网络安全等关键技术提供有力支持,必将推动水域无人系统平台向着实用化、自主化和智能化方向迈进。

参 考 文 献

- [1] Young S, Kim, Hyungbae, et al. Coordinated weathervaning control of two surface vessels in a tandem configuration[J]. Ocean Engineering, 2017, 130(15): 142-155.
- [2] Ssa B, Bsb C, Peng W, et al. An adaptive bi-level task planning strategy for multi-USVs target visitation[J]. Applied Soft Computing, 2021, 115: 108086.
- [3] Sutton R, Singh Y, Bibuli M, et al. A novel double layered hybrid multi-robot framework for guidance and navigation of unmanned surface vehicles in a practical maritime environment[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(9): 624.
- [4] Shi B, Su Y, 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(6): 489-498.
- [5] Nikolakopoulos K, Lampropoulou P, Fakiris E, et al. Synergistic use of UAV and USV data and petrographic analyses for the investigation of beachrock formations: A case study from Syros Island, Aegean Sea, Greece[J]. Minerals, 2018, 8(11): 534.
- [6] 国务院. 关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. [2015]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [7] Unmanned systems integrated roadmap 2017-2042[EB/OL]. [2018]. <http://cdn.defensedaily.com/wp-content/uploads/post-attachment/206477.pdf>.
- [8] 工业和信息化部, 交通运输部, 国防科工局. 《智能船舶发展行动计划(2019-2021年)》[EB/OL]. [2018]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n3757018/c6567958/content.html>.
- [9] 孙武. 中国船级社发布《智能船舶规范(2020)》[J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 3-5.
- [10] 中国海事局. 关于印发《海事系统“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. [2018]. <https://www.msa.gov.cn/html/xxgk/cwgh/20210527/5DDAEE82-2822-45E3-A860-338626B763C5.html>.
- [11] 廖静. 水上机器人惊艳面世全球最快无人艇“天行一号”[J]. 海洋与渔业, 2018(8): 46-47.
- [12] Keller J. Get ready for a new era in naval warfare[J]. Military & Aerospace Electronics, 2017, 28(10): 2.
- [13] 央广网. 国内首款海洋测量专用无人船平台发布[EB/OL]. [2016]. http://news.cnr.cn/native/city/20160428/t20160428_522016560.shtml.
- [14] 杨松. “海上捕食者”以色列海军“海上骑士”无人导弹艇[J]. 环球军事, 2017(7): 42-43.
- [15] 严新平, 吴超, 马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计[J]. 中国航海, 2017, 40(4): 5.
- [16] ECA GROUP. OCEAN 2020: European defence agency meets partnering consortiums[EB/OL]. [2018]. <https://www.ecagroup.com/en/business/ocean-2020-european-defence-agency-meets-partnering-consortiums>.
- [17] DEFENCE NEWS. To combat Russian subs, NATO allies are teaming up to develop unmanned systems at sea[EB/OL]. [2018]. <https://www.defensenews.com/naval/2018/10/21/to-combat-russian-subs-nato-allies-are-teaming-up-to-develop-unmanned-systems-at-sea/>.
- [18] 马勇, 朱鹏祥. 一种智慧航行平台和航行方法: 中国, 202111101261.9[P]. 2021-09-18.
- [19] 央视新闻. 全国首个! 哈尔滨工程大学海洋机器人集群实现全自主作业[EB/OL]. [2021]. <http://m.news.cctv.com/2021/02/27/>

- ARTInuSattenRUKMRjykefD210227.shtml.
- [20] Liu Z, Zhang Y, Yu X, et al. Unmanned surface vehicles: an overview of developments and challenges[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 41: 71-93.
- [21] Yang X, Wang W, Huang P. Distributed optimal consensus with obstacle avoidance algorithm of mixed-order UAVs-USVs-UUVs systems[J]. *ISA Transactions*, 2020, 107: 270-286.
- [22] Mou X, Chen X, Guan J, et al. Sea clutter suppression for radar PPI images based on SCS-GAN[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(10): 1886-1890.
- [23] Qi L, Li B, Chen L, et al. Ship target detection algorithm based on improved faster R-CNN[J]. *Electronics*, 2019, 8(9): 1-19.
- [24] Zhang Y, Li S, Li D, et al. Parallel three-branch correlation filters for complex marine environmental object tracking based on a confidence mechanism[J]. *Sensors*. 2020, 20(18): 5210.
- [25] Lee W J S, Roh M I, Lee H W, et al. Detection and tracking for the awareness of surroundings of a ship based on deep learning[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2021, 8(5): 1407-1430.
- [26] Habtemariam B, Tharmarasa R, McDonald M, et al. Measurement level AIS/radar fusion[J]. *Signal Processing*, 2015, (106): 348-357.
- [27] Mostafa M, Vucetic M, Stojkovic N, et al. Fuzzy functional dependencies as a method of choice for fusion of AIS and OTHR Data[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): 5166.
- [28] 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): 5868-5872.
- [29] Remmas W, Chemori A, Kruusmaa M. Diver tracking in open waters: a low-cost approach based on visual and acoustic sensor fusion[J]. *Journal of Field Robotics*. 2021, 38: 494-508.
- [30] Falanga D, Kleber K, Scaramuzza D. Dynamic obstacle avoidance for quadrotors with event cameras[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(40): 9712.
- [31] Leira F S, Helgesen H H, Johansen T A, et al. Object detection, recognition, and tracking from UAVs using a thermal camera[J]. *Journal of Field Robotics*. 2021, 38: 242-267.
- [32] 中国船级社. 《智能船舶规范》(2020)[EB/OL].[2019]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=201900001000009739>.
- [33] Niu H, Savvaris A, Tsourdos A, et al. Voronoi-visibility road-map-based path planning algorithm for unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(4): 1-25.
- [34] Niu H, Lu Y, Savvaris A, et al. An energy-efficient path planning algorithm for unmanned surface vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 161(8): 308-321.
- [35] Xia G, Sun X, Xia X. Multiple task assignment and path planning of a multiple unmanned surface vehicles system based on improved self-organizing mapping and improved genetic algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021 9(6): 556.
- [36] Li L, Wu D, Huang Y, et al. A path planning strategy unified with a COLREGS collision avoidance function based on deep reinforcement learning and artificial potential field[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 113: 102759.
- [37] Wen N, Zhang R, Liu G, et al. Online heuristically planning for relative optimal paths using a stochastic algorithm for USVs[J]. *Journal of Navigation*, 2019, 73(2): 1-24.
- [38] Sang H, You Y, Sun X, et al. The hybrid path planning algorithm based on improved A* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 223(3): 108709.
- [39] Chen Z, Zhang Y, Zhang Y, et al. A hybrid path planning algorithm for unmanned surface vehicles in complex environment with dynamic obstacles[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 126439-126449.
- [40] Berkel F, Watkins B, Liu S, et al. Output-based event-triggered model predictive control for networked control systems[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 8951-8956.
- [41] Zheng Z, Feroskhan M. Path following of a surface vessel with prescribed performance in the presence of input saturation and external disturbances[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(6): 2564-2575.
- [42] Xie W, Ma B, Fernando T, et al. A simple robust control for global asymptotic position stabilization of underactuated surface vessels[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, 27(18): 5028-5043.
- [43] Wang R, Si C, Ma H, et al. Global event-triggered inner-outer loop stabilization of under-actuated surface vessels [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 218: 108228.
- [44] He X, Geng Z. Point stabilization and trajectory tracking of underactuated surface vessels: a geometric control approach[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(14): 7119-7141.
- [45] Deng Y, Zhang X. Event-triggered composite adaptive fuzzy output-feedback control for path following of autonomous surface vessels[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(9): 2701-2713.
- [46] Elhaki O, Shojaei K. Robust saturated dynamic surface controller design for underactuated fast surface vessels including actuator dynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 229.
- [47] Zhang J X, Chai T. Singularity-free continuous adaptive control of uncertain underactuated surface vessels with prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics-Systems*, 2021: 1-10.
- [48] Ma Y, Zhu G B, Li Z. Error-driven-based nonlinear feedback recursive design for adaptive NN trajectory tracking control of surface ships with input saturation[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2019, 11(2): 17-28.
- [49] Zhu G B, Du J. Global robust adaptive trajectory tracking control for surface ships under input saturation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, 45(2): 442-50.
- [50] Zhu G B, Ma Y, Hu S L. Single-parameter-learning-based finite-time tracking control of underactuated MSVs under input saturation[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 105: 104652.
- [51] Zhu G B, Ma Y, Li Z, et al. Adaptive neural output feedback control for MSVs with predefined performance[J]. *IEEE Trans-*

- actions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 2994-3006.
- [52] Du J, Hu X, Liu H, et al. Adaptive robust output feedback control for a marine dynamic positioning system based on a high-gain observer[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2015, 26(11): 2775-2786.
- [53] Xia G, Wang X, Zhao B, et al. Adaptive neural path following control of underactuated surface vessels with input saturation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 92529-92540.
- [54] Nie J, Lin X. Improved adaptive integral line-of-sight guidance law and adaptive fuzzy path following control for underactuated MSV[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 151-163.
- [55] Qiu B, Wang G, Fan Y. Predictor LOS-based trajectory linearization control for path following of underactuated unmanned surface vehicle with input saturation[J]. Ocean Engineering, 2020, 214: 107874.
- [56] Zheng Z, Zou Y. Adaptive integral LOS path following for an unmanned airship with uncertainties based on robust RBFNN backstepping[J]. Isa Transactions, 2016, 65: 210-219.
- [57] Walter C, Pettersen K Y, Marco B, et al. Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: theory, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1623-1642.
- [58] Fossen T I, Pettersen K Y, Galeazzi R. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 820-827.
- [59] Jhanani S, Efstathios B. Min-max Q-learning for multi-player pursuit-evasion games[J]. Neurocomputing, 2022, 475: 1-14.
- [60] Du B, Lin B, Zhang C M, et al. Safe deep reinforcement learning-based adaptive control for USV interception mission[J]. Ocean Engineering, 2022, 246: 110477.
- [61] Fan J, Li Y, Liao Y, et al. A formation reconfiguration method for multiple unmanned surface vehicles executing target interception missions[J]. Applied Ocean Research, 2020, 104(2): 102359.
- [62] Liu C, Zou Z, Yin J. Trajectory tracking of underactuated surface vessels based on neural network and hierarchical sliding mode[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2015, 20(2): 322-330.
- [63] Jia Z, Hu Z, Zhang W. Adaptive output-feedback control with prescribed performance for trajectory tracking of underactuated surface vessels[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 18-26.
- [64] Wan L, Su Y, Zhang H, et al. An improved integral light-of-sight guidance law for path following of unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107302.
- [65] Eek Åsmund, Pettersen K Y, Ruud E M, et al. Formation path following control of underactuated USVs[J]. European Journal of Control, 2021, 62: 171-184.
- [66] Zhao Y J, Ma Y, Hu S L. USV formation and path-following control via deep reinforcement learning with random braking[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 12: 5468-5478.
- [67] Zhao Y J, Qi X, Incecik A, et al. Broken lines path following algorithm for a water-jet propulsion USV with disturbance uncertainties-ScienceDirect[J]. Ocean Engineering, 2019, 201: 107118.
- [68] Zhao Y J, Qi X, Ma Y, et al. Path following optimization for an underactuated USV using smoothly-convergent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(10): 6208-6220.
- [69] Ma Y, Zhao Y J, Incecik A, et al. A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs[J]. Ocean Engineering, 2021, 224(5): 108713.
- [70] Xu X L, Lu Y, Liu X, et al. Intelligent collision avoidance algorithms for USVs via deep reinforcement learning under COLREGs[J]. Ocean Engineering, 2020, 217(3): 107704.
- [71] Xu X L, Lu Y, Liu G, et al. COLREGs-abiding hybrid collision avoidance algorithm based on deep reinforcement learning for USVs[J]. Ocean Engineering, 2022, 247: 110749.
- [72] Tor A J, Tristan P, Andrea C. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(12): 3407-3422.
- [73] Zhao L, Roh M I. COLREGs-compliant multiship collision avoidance based on deep reinforcement learning[J]. Ocean Engineering, 2019, 191(1): 1-15.
- [74] Wang Y L, Yu X M, Liang X, et al. A COLREGs-based obstacle avoidance approach for unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 110-124.
- [75] Lyu G H, Peng Z H, Wang H L, et al. Extended-state-observer-based distributed model predictive formation control of under-actuated unmanned surface vehicles with collision avoidance[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109587.
- [76] 毕华雄. 多无人测量船艇协同覆盖路径规划研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [77] Liu Y, Peng Y, Wang M, et al. Multi-USV system cooperative underwater target search based on reinforcement learning and probability map[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 4: 1-12.
- [78] Carisza A, Wang I L, Gunawan A. Optimal collaborative path planning for unmanned surface vehicles carried by a parent boat along a planned route[J]. International Journal of Operations Research, 2020, 17(4): 101-116.
- [79] Xie J, Zhou R, Luo J, et al. Hybrid partition-based patrolling scheme for maritime area patrol with multiple cooperative unmanned surface vehicles[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 936-950.
- [80] Zhu M, Wen Y Q. Design and analysis of collaborative unmanned surface-aerial vehicle cruise systems[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 1: 107-116.
- [81] Yang T, Jiang Z, Sun R, et al. Maritime search and rescue based on group mobile computing for UAVs and USVs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7700-7708.
- [82] Peng Z, Wang J, Wang D, et al. An overview of recent advances in coordinated control of multiple autonomous surface vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020,

- 17(2): 732-745.
- [83] Li S, Liu J, Negenborn R R. Distributed coordination for collision avoidance of multiple ships considering ship maneuverability[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 212-226.
- [84] Arrichiello F, Heidarsson H, Chiaverini S, et al. Cooperative caging using autonomous aquatic surface vehicles[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2010: 4763-4769.
- [85] Giron-Sierra J M, Gheorghita A T, Angulo G, et al. Preparing the automatic spill recovery by two unmanned boats towing a boom: development with scale experiments[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 95: 23-33.
- [86] Peng Z H, Jiang Y, Liu L, et al. Distributed optimization for coordinated dynamic positioning of multiple surface vessels based on asymptotically stable ESOs[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 246: 110507.
- [87] Ma Y, Zhao Y J, Xin Q, et al. Cooperative communication framework design for the unmanned aerial vehicles-unmanned surface vehicles formation[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 1-9.
- [88] Shao G M, Ma Y, Malekian R, et al. A novel cooperative platform design for coupled USV-UAV systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(9): 4913-4922.
- [89] Zhang H, He Y, Li D, et al. Marine UAV-USV marsupial platform: system and recovery technic verification[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1583.
- [90] Agra B. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines-ScienceDirect[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109214.
- [91] Sarda E I, Dhanak M R. Launch and recovery of an autonomous underwater vehicle from a station-keeping unmanned surface vehicle[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2019, 44(2): 290-299.
- [92] Sarda E I, Dhanak M R. A USV-based automated launch and recovery system for AUVs[J]. *Oceanic Engineering*, 2017, 42(1): 37-55.
- [93] Wigley R, Proctor A, Simpson B. Novel AUV launch, recovery new approaches using combined USV-AUV method[J]. *Sea Technology: Worldwide Information Leader for Marine Business, Science & Engineering*, 2018, 59(6): 24-27.
- [94] Wu Y, Low K H, Chen L. Cooperative path planning for heterogeneous unmanned vehicles in a search-and-track mission aiming at an underwater target[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6782-6787.
- [95] Tu E, Zhang G, Rachmawati L, et al. Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: a comprehensive survey from data to methodology[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018,19: 1559-1582.
- [96] Zou Y, Liu H, Wan Q. Joint synchronization and localization in wireless sensor networks using semidefinite programming[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1): 199-205.
- [97] Ma Y, Nie Z Q, Hu S L, et al. Fault detection filter and controller co-design for unmanned surface vehicles under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(3): 1422-1434.
- [98] Ma Y, Nie Z Q, Yu Y S, et al. Event-triggered fuzzy control of networked nonlinear underactuated unmanned surface vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107540.

作者简介:



马 勇 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶智能航行理论与技术、智能海事保障技术。



王雯琦 (1997-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水域无人系统平台智能航行理论与技术。



严新平 (1959-), 男, 博士, 首席教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为交通系统的安全性、智能化与绿色技术。本文通信作者。

[引用格式] 徐 博, 王朝阳. 规则空间下基于 MRFC-Vicsek 模型的集群控制[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 17–25.

规则空间下基于 MRFC-Vicsek 模型的集群控制

徐 博¹, 王朝阳²

(哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对规则空间下集群运动问题, 开展了基于多区域模糊控制 (MRFC) -Vicsek 模型的集群控制方法的研究。考虑到仿生集群在运动时的行为准则, 首先建立了包括避碰层、一致层、内聚层、连通层在内的多区域 Vicsek 模型。其次, 通过模糊规则将不同区域个体数量和集群拥挤程度转化为对中心个体的影响权重, 再结合规则空间内边界对个体的影响范围提出了初始状态随机的规则空间内集群控制方法。最后, 进行了集群成员不同数量的仿真实验, 并通过邻域指数、个体认可度、速度序参量等指标证明了方法的有效性, 在规则空间下集群状态具有良好的收敛性和集群稳定性。

关键词: 多区域; 模糊控制; 生物行为准则; 规则空间; 邻域指数

中图分类号: U664.82 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2022)01-17-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.002

Cluster Control Based on MRFC-Vicsek Model in Rule Space

XU Bo¹, WANG Zhaoyang²

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problem of cluster motion in regular space, a cluster control method based on MRFC-VICSEK model is studied in this paper. Considering the behavior rules of the bionic cluster in motion, the Vicsek model of multi-region fuzzy control, including collision avoidance layer, consistent layer, cohesive layer and connected layer, is firstly established. Secondly, the number of individuals in different regions and the degree of cluster crowding were transformed into the influence weight of central individuals through fuzzy rules. Then, combining with the influence range of individuals within the boundary of the rule space, the control method of the cluster in the rule space with random initial state was proposed. Finally, simulation experiments with different number of cluster members are carried out, and the effectiveness of the proposed method is proved by neighborhood index, individual recognition, velocity order parameter and other indicators, and the cluster state has good convergence and cluster stability in regular space.

Key words: Multi-regional; Fuzzy Control; Biological Code of Conduct; Rule Space; Local Neighborhood Index

1 引 言

近年来, 随着传感器、控制算法理论等关键

技术的发展, 无人系统在长航时、小型化等多个方向取得了突破性进展。微小型无人智能体组成的无人集群系统已经成为国内外专家学者共同关

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国防科技创新特区项目 (19-163-16-ZD-020-002-01); 国防科技卓越青年科学基金项目 (2020-JCJQ-ZQ-071); 国防基础科研计划项目 (JCKY2019604D003)

注的热点课题^[1-2]。

微小型无人智能体组成的无人集群在执行任务过程中具有高度动态性、不确定性、强对抗性等特点,因此如何提高无人集群的自主性和适应性是无人集群技术面临的关键问题^[3]。针对无人集群控制问题,目前常用的方式主要包括集中式和分布式。集中式控制是指通过一个中央控制器对整个集群进行统一调配与控制。这种方式可以获得全局最优状态,但这种控制方法不仅计算量大,而且对大型无人集群计算资源要求苛刻,当一个环节出现延迟,编队容错率便会降低^[4-5]。分布式控制不存在中心控制器,集群内的个体都是独立的,通过信息之间的交互可以达到控制目的。与集中式控制相比,分布式控制尽管很难保证全局的最优,但它具有模块化、可扩展等优点^[6-9]。针对集群避障、保持、路径规划等问题,国内外学者针对人工势场法、虚拟结构法、图论法等进行了深入研究,但这些方法控制器分析大多依赖于现代控制理论,通过微分方程和差分方程描述数学模型,对参数的依赖性过大。当其应用于超过一定数量的无人集群时,参数所造成的复杂程度也随之增加。

针对集群编队保持问题,文献[10]通过跟随者与领航者的预定队形跟踪参考轨迹,实现了集群弱通信条件下的队形保持。文献[11-12]结合模糊逻辑系统和滑模控制,保持水下无人集群的编队形状。针对集群避障的问题,文献[13]提出了一种预测制导避障算法,研究了当只有一部分智能体具有障碍物动态信息或每个智能体具有局部交互时多智能体系统的协调避障算法,实现了交互弱条件下的协调避障。此外,国内外研究人员在自组织协同控制方面也开展了一些研究。这种方式没有固定的通信路线,个体与个体之间的相对运动可以使得通信发生改变。文献[14]针对无人集群编队系统,提出了一种基于个体间相对行为的路径规划方法。

自然界中生物可以通过单体简单的个体行为表现出集群的复杂行为,如鸟群、鱼群、蚁群躲避敌害,共同觅食^[15]。通过简单行为得到的集群

控制效果可以使得系统稳定性提高和算法计算量降低。因此,仿生集群的研究引起了世界范围内的广泛关注。生物集群的研究最早开始于 20 世纪 80 年代,Reynolds 提出了分离、聚集、速度一致 3 个基本法则。

Vicsek 等^[16]在研究过程中,发现生物群体具有聚集行为和磁铁特性,即鸟的飞行速度向量如同磁聚一样具有自适应性。但简单的模型模仿生物集群的思维模式与实际生物集群的行为相差很多。因此,针对基础 Vicsek 模型,众多学者相继进行了改进。吴渝等^[17]在模型基础上引入了速度加权均值调整集群运动过程中的问题。但上述模型没有考虑到个体之间距离所带来影响,因此文献[18]提出了 WAR-Vicsek 模型,重点考虑了相邻个体之间距离所带来的影响,降低了系统收敛效率。文献[19]在此基础上考虑到集群中个体的体积,提出了 IV-Vicsek 模型,降低了集群成员在运动过程中碰撞概率。文献[20]引入了集群内个体体力模型,并且个体体积越大,相对影响力越高,使得模型更加贴近复杂网络模型,提升整体收敛速度。

考虑到个体组成的集群拥挤程度对状态的影响以及无人集群运动过程中遇到的边界问题,本文在上述基础上,提出了 MRF-Vicsek 模型。首先,建立多域感知范围模型并通过改进后的生物行为法则使得集群运动更贴近生物集群行为,并得到自由空间初速度相同条件下的状态更新函数。再通过集群拥挤程度和集群规模建立模糊规则,对上述状态更新进行优化,得到初速度随机条件下自由空间状态更新算法。最后,通过对规则空间的区域划分以及生物行为准则,得到在规则空间条件下初始状态随机的状态更新方程,达到集群收敛更类似复杂网络模型的目的。

2 MRFC-Vicsek 集群控制方法

2.1 多智能体建模

传统 Vicsek 模型已经具备了仿生集群运动的部分特征,由 N 个运动体组成的离散系统用集合

$K=\{1,2,\dots, N\}$ 表示, 每个个体的初始位置 (x_i, y_i, θ_i) 和速度 v_i 都是随机的, 在状态更新时受到一个高斯白噪声干扰。IV-Vicsek 模型在传统的 Vicsek 模型中增加了避碰区域, 其系统权重大小受到个体之间的距离影响。

本文在 IV-Vicsek 模型基础上考虑了个体与个体之间是如何相互影响以及边界对集群运动的影响, 可以使得集群在随机初始速度状态下在规则空间内运动。本文将个体 i 的感知区域分为避碰层、保持层、内聚层和连通层。每层存在的其他个体的数量和距离对该个体状态的影响各不相同, 通过分配各区域权重, 使得模型更加贴近生物集群运动。

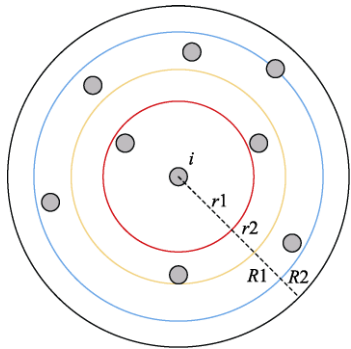


图 1 个体感知区域示意图
Fig. 1 Individual perception area

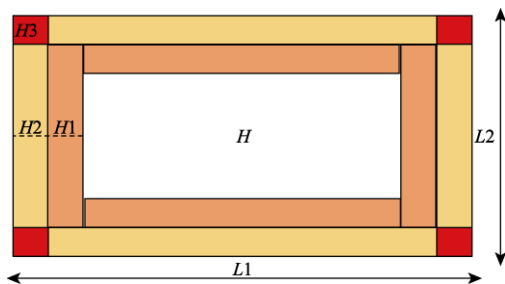


图 2 规则空间边界示意图
Fig. 2 Regular space boundary diagram

如图 1 所示, $(r1, r2, R1, R2)$ 分别为避碰层、保持层、内聚层和连通层的感知半径, 其他个体对中心个体的影响随着区域的不同而改变。为更加贴近生物集群在规则空间内运动行为, 在模型中加入了规则边界, 如图 2 所示, 在 $L1, L2$ 构成的规则边界 $(H, H1, H2, H3)$ 中, 边界对个体的影

响依次增加。当个体 i 处于不同的区域时, 通过不同的控制方法对其进行控制。

2.2 基于生物行为规则的状态更新

生物集群行为研究与大型无人集群的组网有很多相似之处, 生物集群的行为主要满足以下 3 个性质。

(1) 分离性。在生物集群中, 生物体之间存在安全距离, 使得生物体之间碰撞与冲突减少。

(2) 一致性。生物集群在稳定运动过程中, 生物体之间保持相对一致的状态, 使得集群的状态稳定。

(3) 聚集性。当存在生物体落单时, 通过吸引其他生物体形成一个紧密的生物集群。

本文在原有性质的基础上, 增加了 3 条状态约束规则。

(1) 在生物集群运动过程中, 生物体之间的距离越接近一定值, 生物体之间的状态一致性更高。

(2) 当生物集群运动过至边界时, 距离边界最近的生物体状态改变, 不受距离边界远的生物体影响。

(3) 当生物体之间的距离达到一定值时, 该生物体将适当扩大感知距离。

定义影响个体 i 的运动状态集合由个体自身当前时刻位置为中心的 4 个感知区域内所有个体组成。由 N 个运动体组成的仿生集群 K 中, 设 $x_i(t)$ 为当前时刻个体状态, $\| \cdot \|$ 为个体向量之间的欧氏距离, 因此 t 时刻个体 i 在避碰层、保持层、内聚层和连通层的相邻个体集合 $B_i(t), Y_i(t), N_i(t), L_i(t)$ 为:

$$B_i(t) = \{ \|x_j(t) - x_i(t)\| \leq r1, j = 1, 2, \dots, N \} \quad (1)$$

$$Y_i(t) = \{ \|x_j(t) - x_i(t)\| \leq r2, i, j = 1, 2, \dots, N \} \quad (2)$$

$$N_i(t) = \{ \|x_j(t) - x_i(t)\| \leq R1, i, j = 1, 2, \dots, N \} \quad (3)$$

$$L_i(t) = \{ \|x_j(t) - x_i(t)\| \leq R2, i, j = 1, 2, \dots, N \} \quad (4)$$

设无人集群所有个体初始速度为 V , 当集群在 H 范围内运动中未触及边界影响范围时, 个体 i 在 t 时刻的状态受避碰层、保持层、内聚层和连

通层的个体影响。因此,个体*i*在*t+1*时刻的位置更新为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v(t) \quad (5)$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \sigma(t) \quad (6)$$

式中, $\sigma(t)$ 为受到连通层个体数量影响的噪声。

$\theta_i(t+1)$ 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \theta_i(t+1) = & \frac{\alpha}{N_B} \sum_{j \in B_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \\ & + \frac{\beta}{N_Y} \sum_{j \in Y_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \\ & + \frac{\varepsilon}{N_N} \sum_{j \in N_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right), \alpha + \beta + \varepsilon = 1 \end{aligned} \quad (7)$$

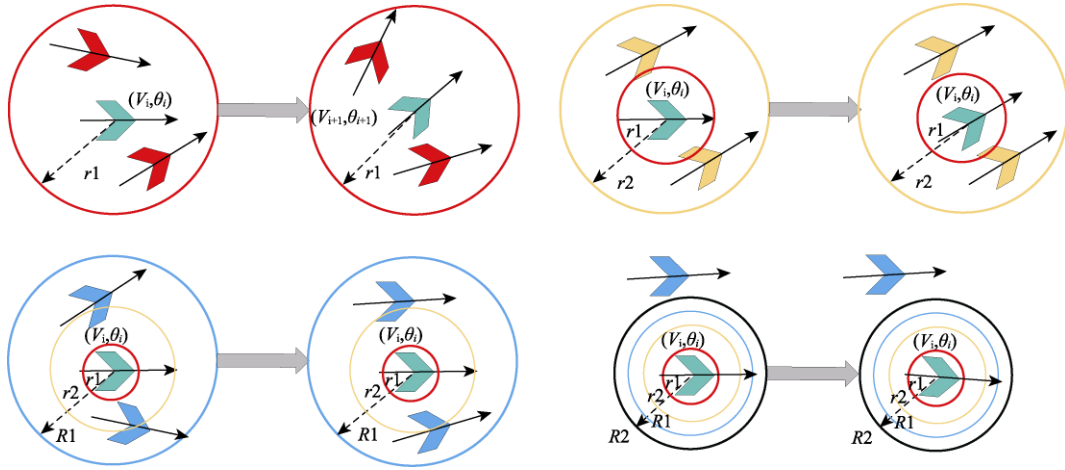


图3 集群简单行为示意图

Fig. 3 Cluster simple behavior

如图3所示,避碰层的个体倾向于散开,以保持个体之间距离;一致层是集群理想的运动状态层,处于该层的个体更倾向于状态保持;而内聚层的个体动作更倾向于向一致层靠拢。

当个体*i*远离集群时,即感知范围连通层内无其他个体,此时依据生物行为规则,该个体的速度将处于随机状态,其状态更新为:

$$V_i(t+1) = V_i(t) + \delta(t) \quad (8)$$

$$\theta_i(t+1) = \theta_i(t) + \delta(t) \quad (9)$$

当个体的初始状态为随机状态时,即集群内各成员初始速度在(*a*,*b*)上随机分布,初始角度在($0, 2\pi$)上随机分布。为使得集群内个体状态更贴

式中, $\alpha, \beta, \varepsilon$ 分别为避碰层因子、保持层因子、内聚层因子。 N_B, N_Y, N_N 分别为避碰层、保持层和内聚层的个体数量。为使得个体*i*与保持层状态更为一致,保持层因子应大于另外两个。

2.3 模糊多权重状态优化

在实际生物集群运动中,集群内各成员的初始位置和初始速度都是随机的。并且在运动过程中,当个体之间的距离小于一定值时,个体之间的相对状态会迅速改变。例如,速度降低或运动方向改变,这种状态的改变有一定范围。当个体*i*在*t*时刻感知范围内避碰层的个体对其造成影响时,该个体会改变其运动状态,以达到保持距离的目的。

近生物行为,本文将集群期望速度和个体邻域集合内个体加权后的速度之差作为当前时刻速度的误差,从而更好地调节集群速度。设集群的期望速度为 $V_e \in (a, b)$, 其状态更新为:

$$\begin{aligned} V_i(t+1) = & V_i(t) + k_1(V_e - V_i(t)) + k_2 \\ & \left[V_e - \frac{(\alpha \sum_{j \in B_i(t)} V_j(t) + \beta \sum_{j \in Y_i(t)} V_j(t) + \varepsilon \sum_{j \in N_i(t)} V_j(t))}{N_L} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \theta_i(t+1) = & \frac{\alpha}{N_B} \sum_{j \in B_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \\ & + \frac{\beta}{N_Y} \sum_{j \in Y_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \end{aligned}$$

$$+\frac{\varepsilon}{N_N} \sum_{j \in N_i(t)} \arctan\left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)}\right) \quad (11)$$

式中, k_1, k_2 为常数, 选择适当的参数可以使得速度收敛速度增加。当不同邻域个体数量发生改变时, 其邻域对个体的影响权重发生改变。

生物集群内个体之间的影响难以用公式准确表示, 本文通过引入模糊规则优化这种情况。模糊控制是基于模糊逻辑将人类经验转化为控制逻辑。其中, 包括模糊化、模糊集、模糊推理和解模糊 4 个模块。根据 MRFC-Vicsek 模型个体状态控制结构, $\theta_i(t+1)$ 为下一时刻输出, $\theta_i(t)$, $V_i(t)$ 为当前时刻输入, $\alpha, \beta, \varepsilon, u$ 为当前时刻控制器参数。则当前速度更新为式(10), 角度更新为:

$$\begin{aligned} \theta_i(t+1) &= \frac{\alpha}{N_B} \sum_{j \in B_i(t)} \arctan\left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)}\right) \\ &+ \frac{\beta}{N_Y} \sum_{j \in Y_i(t)} \arctan\left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)}\right) \\ &+ \frac{\varepsilon}{N_N} \sum_{j \in N_i(t)} \arctan\left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)}\right) + \mu\pi \end{aligned} \quad (12)$$

设模糊状态更新输入变量为集群大小 $M1$ 和拥挤程度 $M2$ (避碰层数量), 输出变量为感知范围避碰层、保持层和内聚层的因子 $\alpha, \beta, \varepsilon$ 。取值范围见表 1。

表 1 模糊输入输出论域

Table 1 Fuzzy input and output domain

序号	变量	论域
1	$M1$	$(0, N)$
2	$M2$	$(0, N)$
3	α	$(0, 1)$
4	β	$(0, 1)$
5	ε	$(0, 1)$
6	u	$(-1, 1)$

采用高斯隶属函数进行模糊化:

$$g(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

式中, x 为模糊变量, 另外是参数模糊语言变量集合为“拥挤 (C)”“正常 (N)”“稀疏 (S)”“较高 (G)”“稳定 (W)”和“较小 (X)”。

模糊规则依据如下:

(1) $\alpha, \beta, \varepsilon$ 的意义是个体感知范围内不同层所占权重, 参数越大, 该层的个体状态对其中心个体的影响作用越大。

(2) u 的意义是个体状态的改变意愿, 当感知范围内避碰成员增加时, 个体改变状态的意愿更为强烈。

通过模糊逻辑和模糊语言, 将上述依据转化为模糊控制规则, 见表 2~5。

表 2 α 模糊规则

Table 2 Fuzzy rule α

$M1/M2$	C	N	S
C	X	W	G
N	X	X	W
S	X	G	G

表 3 β 模糊规则

Table 3 Fuzzy rule β

$M1/M2$	C	N	S
C	G	G	W
N	W	W	X
S	W	W	X

表 4 ε 模糊规则

Table 4 Fuzzy rule ε

$M1/M2$	C	N	S
C	X	W	W
N	X	G	G
S	W	G	G

表 5 u 模糊规则

Table 5 Fuzzy rule u

$M1/M2$	C	N	S
C	G	W	X
N	W	W	W
S	W	X	X

最后, 通过重心法对其进行解模糊, 得到 $\alpha, \beta, \varepsilon, u$ 。

3 规则空间下状态更新

3.1 基于 MRFC-Vicsek 模型协同控制

一般生物集群在自由空间内运动时, 集群内

个体只需考虑自身感知范围内成员即可，不需要考虑外界环境条件。

在无人集群的实际应用场景中，许多集群无法在空间内自由运动，活动范围受限，类似池塘中的鱼群。但这些集群在运动过程中遇见边界时，距离边界最近的个体会率先进行减速和转弯，而处于集群距离较远的成员，会提前进行状态改变。边界对于集群的影响在 2.1 节已经阐述。因此，本文提出了 MRFC-Vicsek 模型实现规则空间下集群的控制，其框图如图 4 所示。

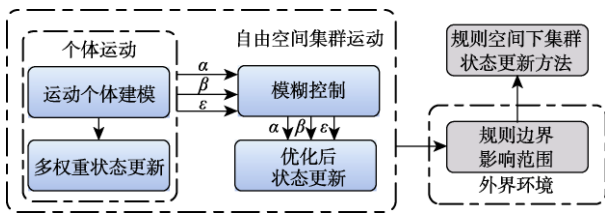


图 4 规则空间下集群状态更新整体框图

Fig. 4 Overall block diagram of cluster state update in rule space

如图 4 所示，运动个体通过模糊多权重状态优化将其感知范围不同区域内成员状态整合至下一刻的输入，得到自由空间集群运动状态更新方法。在此基础上，引入规则边界影响范围，当个体运动到一定范围时，将受到外界环境的影响。此刻的运动个体在速度和方向上受到边界影响的权重大于集群对其的影响。边界对该个体的影响是根据个体所在的集群时刻调整，进而影响该个体相邻个体，达到在规则空间下集群运动更贴近生物行为准则的目的。

通过这种方法，可以使得集群在规则空间内的运动行为与实际生物集群行为更加接近，在遇到外界突发情况时，可以通过降速与转向达到集群稳定的目的。

3.2 基于势场思想状态更新

本文将边界影响范围划分为 $H1, H2, H3$ ，其中 $H1$ 对集群影响最弱， $H3$ 受到横向边界和纵向边界影响，对集群影响最强。

当个体运动至 $H1H2H3$ 区域内，边界对个体的影响为：

$$F = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\min(d_x, d_y)} - \frac{1}{d_1} \right) (x, y) \in H1 \\ \eta \left(\frac{1}{\min(d_x, d_y)} - \frac{1}{d_2} \right) (x, y) \in H2 \\ \eta \left(\frac{1}{d_x} + \frac{1}{d_y} - \frac{2}{d_3} \right) (x, y) \in H3 \end{cases} \quad (14)$$

式中， d_1, d_2, d_3 分别为区域 $H1, H2, H3$ 的安全距离。因此，当个体运动至区域 Hn 时，其速度状态更新公式为：

$$V_i(t+1) = \frac{Q_n V_i(t)}{F} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \theta_i(t) = & \frac{\alpha}{N_B} \sum_{j \in B_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \\ & + \frac{\beta}{N_Y} \sum_{j \in Y_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) \\ & + \frac{\varepsilon}{N_N} \sum_{j \in N_i(t)} \arctan \left(\frac{\sin \theta_j(t)}{\cos \theta_j(t)} \right) + F Q_n \pi \end{aligned} \quad (16)$$

式中， Q_n 为不同区域的不同参数，不同的参数条件有着不同的效果。为描述规则空间下集群运动过程的程度，本节通过序参量、个体认可度、邻域分布指数等多个方面进行验证。其中序参量为：

$$V_a = \frac{1}{N v_e} \left\| \sum_{i=1}^N v_i(t) \right\| \quad (17)$$

式中， v_e 为集群期望速度，当 V_a 在一定时间内在 0.99~1.01 中浮动不大时，可以认为速度已达到稳定，认为是集群的速度收敛时间。

邻域个体分布指数为：

$$P = \sum_{k=0}^N \left(\frac{\log 2(k \times N_k + 1)}{k \times N_k + 1} \right) \quad (18)$$

式中， N_k 为连通层内相邻个体数量为 k 的个体数量。认可程度为：

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\log 2 \left(\frac{|N_i|}{N+1} \right) \right) \quad (19)$$

式中， N_i 为个体 i 感知范围内相邻个体的个数。个体邻域指数和个体认可度分别描述个体间的分布情况和集群的收敛程度。通过这些指标可以在一定程度上对集群的运动状态进行评估。

4 仿真试验

为验证本文所提出的 MRFC-Vicsek 模型对集群的控制性能, 本节进行了仿真实验。设置初始化参数, 迭代运动时间 $T=1000\text{s}$, 集群总数 N 为

200、400、800, 噪声大小 $\delta \in (-0.2, 0.2)$, 感知范围避碰层半径 $r_1=0.3\text{ m}, r_2=0.5\text{ m}, R_1=0.8\text{ m}, R_2=1.2\text{ m}$, 规则区域边界长度 $L_1=L_2=10\text{ m}$ 。速度的模值大小和方向分别在 $(-0.2, 0.2), (0, 2\pi)$ 上随机分布。如图 5 所示, 集群初始状态为随机状态。

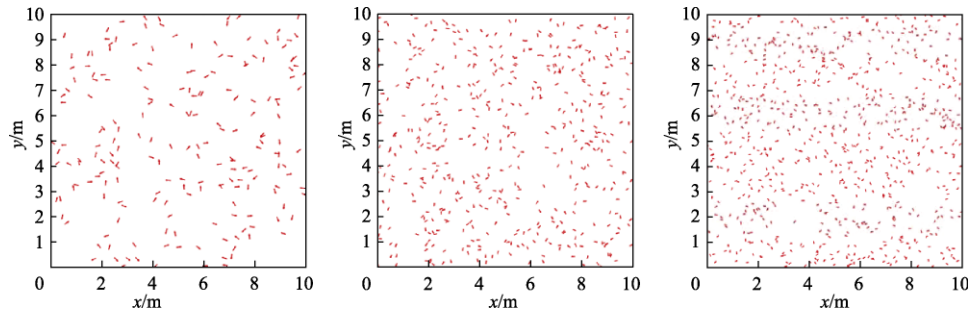


图 5 初始状态
Fig. 5 Initial state

通过仿真得到集群在 1000s 过程中的数据, 其过程如图 6~8 所示。

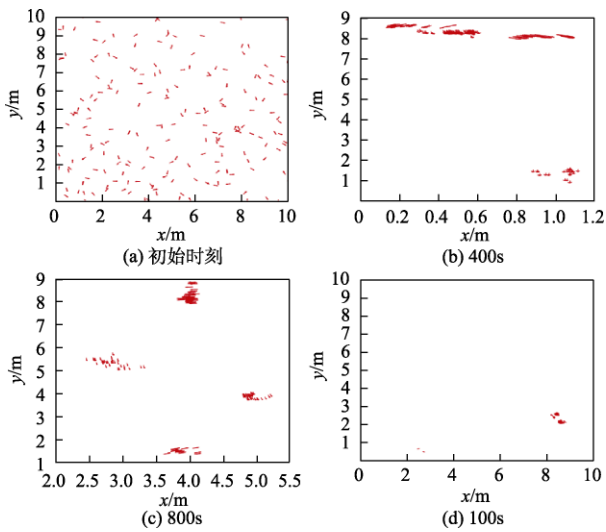


图 6 集群个数 200 过程图
Fig. 6 Number of clusters 200 processes

图 6~8 中, (a)、(b)、(c)、(d) 分别对应初始时刻、400s、800s、1000s 的集群分布情况。由于空间是规则的, 因此集群运动最终会收敛为一个或几个集群。当遇见边界后, 集群最外侧开始改变状态, 同时影响着集群内侧的个体有改变状态的趋势, 通过个体的简单的减速与转向, 使得整个集群完成稳定的避开边界, 达到了在规则空间下集群仿生运动的目的。通过图 6~8 的比较,

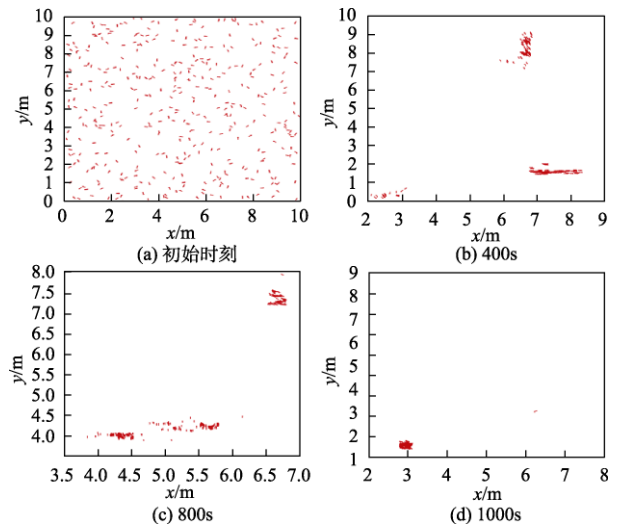


图 7 集群个数 400 过程图
Fig. 7 Number of clusters 400 processes

可以看出当集群的数量增多, 形成集群的时间节点越靠后。当集群在 200~400 时, 集群的收敛效果更好, 但还需进一步验证。其速度和速度序参量如图 9 和图 10 所示。

可以看出, 当集群的复杂度随着数量的增加而增加时, 遇见边界时速度更不稳定; 当数量达到 800 时, 速度很难稳定; 当集群数量为 200 时, 集群的速度收敛时间最短, 遇见边界时速度更稳定。

图 11、图 12 展示了规则空间下不同集群数量的个体认可度与个体邻域分布指数, 可以看出

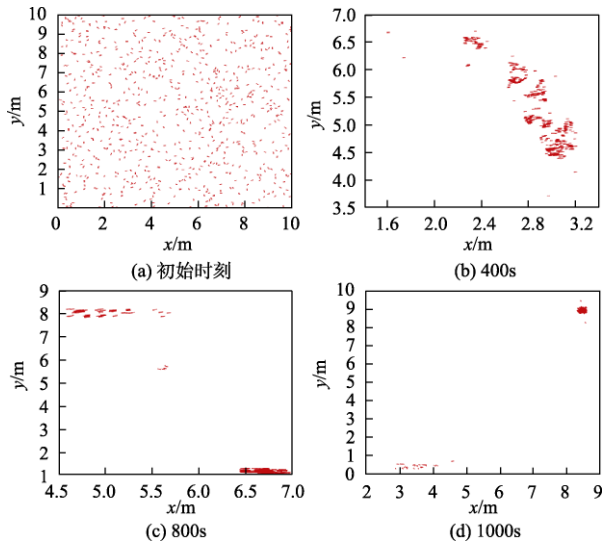


图 8 集群个数 800 过程图
Fig. 8 Number of clusters 800 processes

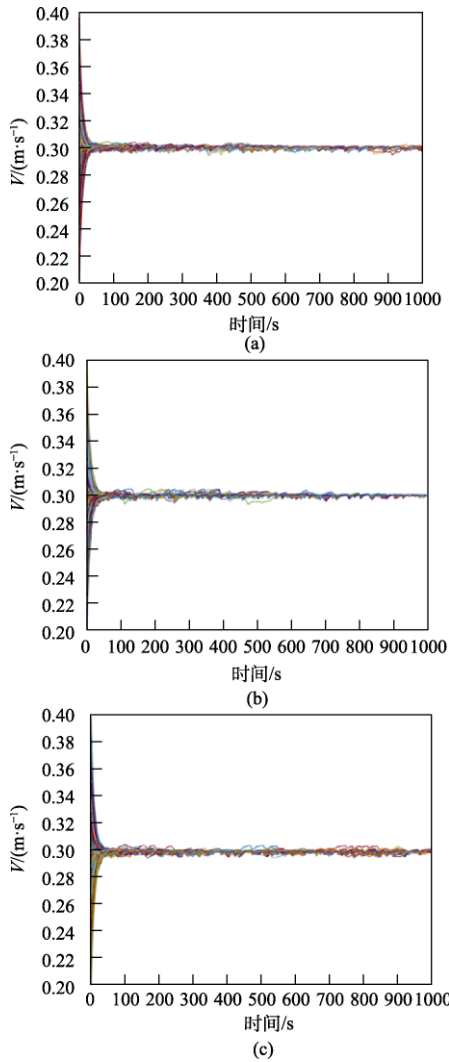


图 9 集群内所有个体速度
Fig. 9 Speed of all individuals in the cluster

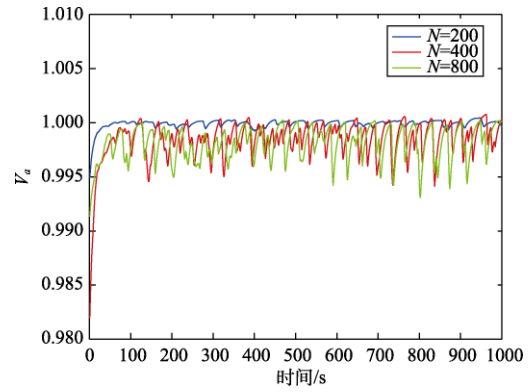


图 10 不同个数集群速度序参量
Fig. 10 Cluster speed order parameter

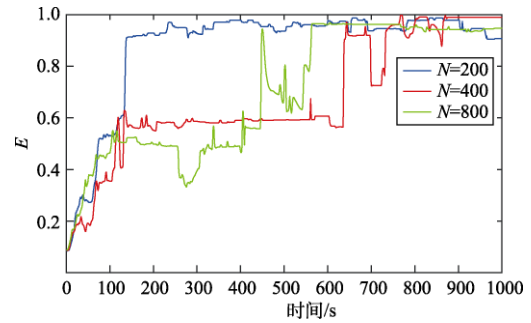


图 11 不同个数集群个体认可度
Fig. 11 Cluster individual recognition

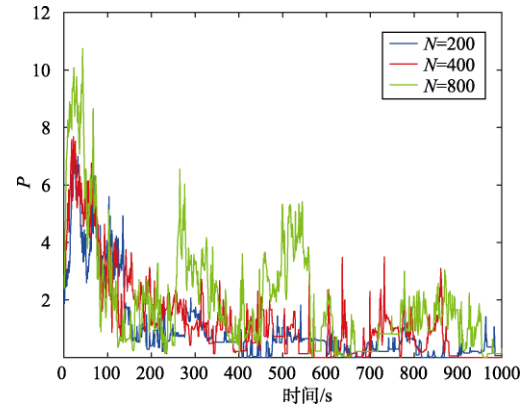


图 12 不同个数集群邻域分布指数
Fig. 12 Cluster neighborhood distribution index

集群在遇到边界时，集群的一致性与个体之间的稳定性受到比较大的影响。当集群数量较少时，集群的收敛性较快，可以很早期地达到相对稳定；当遇到边界时，可以很快调整至相对稳定状态；当集群数量增加时，集群遇到边界时，调整能力降低。

5 结 论

根据约束后仿生集群的行为准备，本文建立

了多智能体与规则空间的多区域模型, 再通过模糊规则解出不同区域所对应的权重, 同时将不同的权重与边界影响区域结合, 最后得到了规则空间集群控制方法。仿真结果表明, 该方法可以实现规则空间下的集群控制, 行为方式与生物集群相似, 这为自组织协同控制避障与执行任务提供了思路。但本文方法也存在不足, 当集群数量增加时, 集群更为拥挤, 该算法的收敛速度与稳定程度会下降, 如何在集群数量增加时保证控制算法的稳定性是一个值得继续深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 王雅琳, 刘都群, 杨依然. 2019 年水下无人系统发展综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1): 55-59.
- [2] 王雅琳, 杨依然, 王彤, 等. 2019 年无人系统领域发展综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 53-57.
- [3] Zerek E, Bibuli M, Mišković N, et al. Challenge and future trends in marine robotics[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46: 350-368.
- [4] Arrichiello F, Chiaverini S, Fossen T I. Formation control of marine surface vessels using the null-space-based behavioral control[J]. Lecture Notes in Control & Information Sciences, 2006, 336: 1-19.
- [5] 吕光颢, 彭周华, 王丹, 等. 无人船集群队形重构的目标任务分配[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 101-106.
- [6] Eitzlinger B, Meyer F, Hlawatsch F, et al. Cooperative simultaneous localization and synchronization in mobile agent networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, (99): 1.
- [7] Meyer F, Hlinka O, Wymeersch H, et al. Distributed localization and tracking of mobile networks including noncooperative objects[J]. IEEE Transactions on Signal & Information Processing Over Networks, 2014, 2(1): 57-71.
- [8] Garcia-Fernandez A F, Svensson L, Sarkka S. Cooperative localization using posterior linearization belief propagation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 832-836.
- [9] Youakim K, Ehab M, Hatem O, et al. Paramagnetic microparticles sliding on a surface: Characterization and closed-loop motion control[C]. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Washington, USA, 2015.
- [10] 王勃, 姚佩阳, 贾方超, 等. 多无人机任务集结合作博弈优化自组织协同控制[J]. 电光与控制, 2014, 21(11): 5-13.
- [11] Cui R, Ge SS, How BVE, et al. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2010, 37: 1491-1502.
- [12] Huang H, Zhang G, Li Y, et al. Fuzzy sliding-mode formation control for multiple-underactuated autonomous underwater vehicles[C]. International Conference in Swarm Intelligence, Bali India, Indonesia, 2016.
- [13] Quesada W O, Rodriguez J I, Murillo J C, et al. Leader-follower formation for UAV robot swarm based on fuzzy logic theory[J]. Artificial Intelligence and Soft Computing, 2018, 10842: 740-751.
- [14] Li J, Zhang W, Su H, et al. Coordinated obstacle avoidance with reduced interaction[J]. Neurocomputing, 2014, 139:233-245.
- [15] 段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 17-25.
- [16] Vicsek T, Zafeiris A. Collective motion[J]. Physics Reports, 2012, 517(3-4): 71-140.
- [17] 吴渝, 唐红, 刘洪涛. 网络群体智能与突显计算[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [18] Wu Y, Chen Y T, Wang L. The evaluation of emergent behaviors on an improved vicsek model[C]. 2011 International Conference of Soft Computing and pattern recognition Socpar, Dalian, China, 2011.
- [19] 刘云霞. 基于IV-Vicsek 模型的 MP2P 网络任务协同分配方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [20] 晏泽锦. 基于 Vicsek 模型的云负载均衡研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

作者简介:



徐 博 (1982-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为惯性导航、组合导航、初始对准及信息融合。



王朝阳 (1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人系统协同控制、协同导航。本文通信作者。

[引用格式] 殷翔, 李培正, 骆曹飞, 等. 基于 CPSO 算法的海空跨域无人飞行器集群协同作业路径规划[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 26–35.

基于 CPSO 算法的海空跨域无人飞行器 集群协同作业路径规划

殷翔^{1,2}, 李培正³, 骆曹飞³, 马赛男³, 马勇^{1,2}

(1. 武汉理工大学航运学院, 武汉 430063; 2. 内河航运技术湖北省重点实验室, 武汉 430063;
3. 浙江嘉蓝海洋电子有限公司, 舟山 316000)

摘要: 针对海空跨域无人飞行器集群在复杂水域环境下协同作业以追踪水下目标的任务, 提出一种基于协同粒子群 (CPSO) 的协同作业路径规划算法。考虑不同无人飞行器集群特性优势, 合理分解并分配远距离追踪水下目标任务过程, 并利用 CPSO 算法进行路径规划。在 CPSO 算法中, 首先为无人机 (UAVs) 集群规划飞行路径, UAV 飞行过程中探测水面航行区域障碍物, 进而为无人艇集群 (USVs) 生成完整的水面障碍分布图; 然后, 采用 CPSO 算法为 USVs 规划协同航行路径, 无人艇集群航行过程中为无人潜航器 (AUVs) 生成水下航行环境图; 最后, 由 CPSO 算法为 AUVs 规划水下航行路径, AUV 完成水下目标追踪任务。仿真结果表明, 以合理的任务分配分解为基础, CPSO 算法为海空跨域无人飞行器集群协同作业规划了有效路径, 实现了无人飞行器集群协同作业追踪水下目标功能。

关键词: 海空跨域协同; 无人飞行器集群; 协同粒子群算法; 协同作业路径规划

中图分类号: U675.7; TP242.6; TJ63 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2022)01-26-10
DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.003

A Cooperative Path Planning Strategy Based on CPSO Algorithm for Sea-air Cross-Domain Unmanned Vehicle Cluster

YIN Xiang^{1,2}, LI Peizheng³, LUO Caofei³, MA Sainan³, MA Yong^{1,2}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; 3. Zhejiang Jialan Ocean Electronics Company Limited, Zhoushan 316000, China)

Abstract: A cooperative path planning algorithm based on cooperative particle swarm Optimization (CPSO) was proposed to track underwater targets by sea-air cross-domain unmanned vehicle cluster in complex water environment. In the CPSO algorithm, firstly, the flight path is planned for the UAVs, and obstacles in the water navigation area are detected during the UAV flight. Then, a complete surface obstacle distribution map is generated for unmanned surface vehicles (USVs) cluster. Subsequently, CPSO algorithm was used to plan the cooperative navigation path for USVs, and the underwater navigation environment map was generated for autonomous underwater vehicles (AUVs) during the cluster navigation. Finally, CPSO algorithm plans the underwater navigation path for AUVs, and AUV completes the underwater target tracking task. The simulation results show that the CPSO algorithm plans a valid path for the sea-air cross-domain unmanned vehicle cluster, and realizes the function of unmanned vehicle cluster cooperative operation

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-10-28

基金项目: 国家自然科学基金 (62073251, 52022073); 湖北省自然科学基金 (2020CFA055)

tracking of underwater target.

Key words: Sea and Air Cross-domain Collaboration; Unmanned Aircraft Cluster; Cooperative Particle Swarm Optimization; Collaborative Operation Path Planning

1 引言

随着人工智能、信息技术的快速发展,无人飞行器自主航行能力得到显著提升,能够完成如环境勘测、应急救援等任务,被广泛地应用到相关行业并发挥了重要作用。随着应用场景的多元化,单个无人飞行器已不能满足复杂任务情形的需求,跨域无人飞行器集群可协同完成复杂场景下的任务需求。

文献[1]基于人工势场法设计了无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)与目标的动态博弈关系,设计了一种群 UAV 围捕方法。文献[2]提出一种融合粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)与改进蚁群算法的无人潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)路径规划算法 PSO-ACO,实现了 AUV 的三维路径规划。文献[3]提出了一种新型的 k 度平滑的协同 UAV 协调路径规划方法。文献[4]为无人艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)设计了基于非线性模型预测控制的轨迹跟踪控制器,实现了跟随者对领导者目标轨迹的实时估计。文献[5]提出了一种考虑避碰和同步打击时间的 UAV 集群多目标同时打击协同优化方法。文献[6]为 AUV 提出了一种基于 Octree 模型和改进蚁群算法的路径规划方法。文献[7]为 AUV 路径规划问题设计了一种基于四叉树的蚁群算法。文献[8]提出了一种基于 PSO 算法改进的蚁群优化算法,以寻找复杂海底环境中 AUV 到达指定目的地的最优路径。文献[9]设计了一种无人船艇协商协议来实现群无人艇避碰。文献[10]提出了一种基于深度强化学习的无人船艇编队路径跟踪方法。文献[11]设计了一种 UAV 和 USV 协作清污协作系统。文献[12]采用有限角度的 A* 算法为 USV 集群规划最优路径。文献[13]针对四旋翼水下飞行器协同包围控制问题,设计了自适应反步法控制器和鲁棒反步法控

制器分别处理飞行器受到的未知常值干扰和时变干扰。文献[14]建立声学通信和定位系统来提升 USV 和 AUV 导航和控制性能。文献[15]设计了一种包括搜索阶段和航行阶段的分步动态目标追踪方法,并使用 IPSO 算法来生成飞行器路径。文献[16]利用可变柔性机械臂配合拦阻索的机构辅助实现在狭小空间和恶劣条件下对微小型固定翼无人机平台的自主释放与回收,形成了一种全新的跨域异构协作的实现方式。文献[17]设计了一种用于 UAV-USV 集群的协作通信框架。文献[18]设计了一种分层着陆引导点生成算法,通过引导点序列实现了 UAV 在 USV 甲板上的稳定着陆。

分析可知,在同一类型无人飞行器集群协同路径规划方面已取得了大量成果,但在无人机协同无人艇、无人艇协同无人潜航器等跨域集群无人飞行器协同作业规划方面成果相对较少。文献[19]明确了跨域协同的基本内涵:在不同领域互补性地而不是简单叠加性运用多种能力,使各领域之间互补增效,从而在多领域建立优势,获得完成任务所需要的行动自由。不同的无人飞行器集群,如 UAV 集群、USV 集群、AUV 集群等,由于存在航行环境、结构性能、运动模型等差异,不同类型的无人飞行器集群胜任的任务场景不尽相同。为此,在跨域协同路径规划中,需要为各类无人飞行器集群设置独立的作业任务,从而多个领域互补增效,实现跨域无人飞行器集群协同作业路径规划的有机耦合。

UAV 集群在空中航行,以其机动灵活、空间障碍物少、探测视野开阔等特点,可为 USV 高效完成水面航行环境探测任务;AUV 在水下航行,隐蔽性强,但水下航行环境复杂,导致其环境探测效率较低,适合执行短距离水下目标探测任务;USV 在水面航行,具有小型轻量、操纵灵活、自主性强、无人驾驶等优点,在 UAV 协同下水面航行环境情况相对更容易获得,可搭载 AUV 等

可承担较远距离的作业任务。

为应对复杂作业任务需求,需要为 UAV、USV 和 AUV 集群协同规划高质量的路径。为此,本文提出一种基于协同粒子群优化 (Cooperative Particle Swarm Optimization, CPSO) 的路径规划算法,以增进海空跨域无人飞行器集群协同作业能力。

2 海空跨域无人飞行器集群协同作业路径规划模型

2.1 海空跨域无人飞行器集群协同系统描述

针对海空跨域无人飞行器集群协同作业路径规划问题,设计一个 UAV 集群、USV 集群、AUV 集群协同路径规划系统,在考虑避碰和转弯机动的基础上,区别不同 UAV 集群的特性,给定不同无人飞行器集群不同的航行任务,设计 CPSO 算法实现各无人飞行器分步路径规划,最终来协同完成整体的目标追踪任务。整个系统运行过程为分步的三个阶段,每个阶段都对相应的跨域无人集群进行与之能力相适应的任务规划。第一阶段,UAV 集群起飞至航行高度,基于已知的航道信息,使用 CPSO 算法规划 UAV 集群路径,航行过程中使用传感器来沿途探测 USV 航行区域障碍物,将障碍物的信息与已有的航道信息结合,生成完整的 USV 通航环境图;第二阶段,利用完整的障碍物位置信息,通过 CPSO 算法,规划 USV 集群的协同航行路径;第三阶段,USV 集群携带 AUV 到达规划位置后,利用传感器探测水下航行环境,生成可用的水下航行环境图。AUV 集群结合航行环境图利用 CPSO 算法规划集群协同水下路径,并从 USV 处释放来追踪到目标位置。

海空跨域无人飞行器集群的路径协同规划过程,实际上是分步的三次无人飞行器集群协同路径规划过程,每个集群的航行都为下一个集群的规划提供关键的航行信息。每个集群的路径规划过程中,飞行器的起始位置和终点位置已知,通过在两个已知信息点之间插入合适数量的路径点来形成一条完整的航行路径。航行场景的复杂程

度决定了航行路径点的数量。

2.2 惩罚函数设计

在三个阶段的无人飞行器集群路径规划的过程中,需要考虑航行中避碰因素、无人设备转弯性能因素^[18],同时协同航行的最终优化目标为整体航行时间最短。本文将障碍物碰撞约束、转弯性能约束、航行时间函数设计为惩罚函数。根据实际航行中无人飞行器性能的差异,对不同的飞行器设计不同的惩罚函数判断阈值和相关参数。为实现航线实际可行,将碰撞约束和转弯性能约束的惩罚函数设置较大的权重,使所有的规划航线不发生碰撞且同时满足无人飞行设备转弯能力。

2.2.1 转弯惩罚函数

无人飞行器在航行的过程中受到其结构和性能的约束,转弯过程的航迹通常较为平滑而且旋回半径有最小限制,因此需要加入独立的转弯性能的惩罚来使得每个飞行器的航行轨迹实际可行。具体的设计方法为,每三个相邻且距离较近的航行路径点会形成一个转弯的夹角,而飞行器的最小转弯半径需要小于规划路径的转弯夹角的最大内切圆半径,才能使得无人设备能够依照规划路径完成转向。

转弯惩罚函数的计算过程如下,三个相邻路径点构成的转弯夹角为:

$$\alpha = \arccos \frac{l_1 + l_2 - l_3}{2l_1 \cdot l_2} \quad (1)$$

取三个路径点的两段路径中最短的一段来设置内切圆,较短的路径为:

$$l = \min(l_1, l_2) \quad (2)$$

此时的最大内切圆半径计算为:

$$\rho = l \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

式中, α 为每三个相邻路径点确定的路径夹角, l_1 是前两个路径点的距离, l_2 是后两个路径点的距离, l_3 是第一个和第三个路径点的距离, ρ 是边 l 的最大内切圆半径,即极限转弯半径。

通过比较无人飞行器的最小转弯半径和规划的转弯角的最大内切圆半径得到惩罚函数值 tu 为:

$$tu(p_{k-1}, p_k, p_{k+1}) = \begin{cases} 1 & \rho \geq R \\ 0 & \rho < R \end{cases} \quad (4)$$

式中, 无人飞行器的最小转弯半径为 R , 且 p_{k-1} , p_k , p_{k+1} 为三个相邻的路径点, $\rho \geq R$ 即表示规划的路径满足了航行设备的转弯性能约束。一段完整路径中每相邻三个路径点都需要进行转弯惩罚函数计算, 从而得到完整路径的转弯惩罚函数值 Atu 为:

$$Atu = \begin{cases} 1 & \prod_{k=1}^{k_{\max}-1} tu = 1 \\ 0 & \prod_{k=1}^{k_{\max}-1} tu = 0 \end{cases} \quad (5)$$

对于一条完整的路径若至少有一组惩罚函数取值为 0, 即发生过至少一次碰撞, 则该路径的转弯惩罚函数值取 0。

2.2.2 碰撞惩罚函数

海空跨域无人飞行器集群规划航行的路径需要避免所有障碍物的碰撞。为简化避碰过程, 将障碍物膨化为不同轴长的椭球。具体的碰撞惩罚设计方法为: 首先根据飞行器航行的高度, 取得对应高度上障碍物切片信息, 然后对于每两个相邻路径点构成的路径段都需要判断本路径段是否与障碍物切片相交。判断方法是计算路径线段上选取的样本点与障碍物切片圆心的距离, 比较所有距离数值与障碍物切片半径的大小关系。

具体计算过程如下:

根据路径和障碍物的尺度确定飞行器第 k 个路径线段的采样点数量 n , 生成采样点矩阵 P :

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_n] \quad (6)$$

根据每个采样点 p_i 的位置生成其对应的 m 个障碍物切片圆心位置矩阵 ZP_i 和切片半径矩阵 RP_i :

$$ZP_i = [z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im}], \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$RP_i = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}], \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

第 i 个样本点与其对应的第 j 个障碍物切片圆心的距离为 DP_{ij} :

$$DP_{ij} = |p_i - z_{ij}|, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

对于第 i 个样本点和第 j 个障碍物的碰撞惩罚数为 $Pcoll_{ij}$:

$$Pcoll_{ij} = \begin{cases} 1 & DP_{ij} \geq r_{ij} \\ 0 & DP_{ij} < r_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

完整路径每个分段的碰撞惩罚函数值 $Rcoll_k$ 为:

$$Rcoll_k = \begin{cases} 1 & \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m Pcoll_{ij} = 1 \\ 0 & \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m Pcoll_{ij} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

飞行器完整路径的碰撞惩罚函数值 $Acoll$ 为:

$$Acoll = \begin{cases} 1 & \prod_{k=1}^{k_{\max}} Rcoll_k = 1 \\ 0 & \prod_{k=1}^{k_{\max}} Rcoll_k = 0 \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 时间惩罚函数

跨域无人飞行器集群由于航行环境和性能的差异, 实际航行速度有一定差异, 这就导致最短的规划路径方案并不一定是最有效的方案。因此将航行时间最优而不是航行距离最优作为规划路径的评价指标。具体的设计方法是: 对每个飞行器的速度进行设置, 根据规划的路径, 计算每个飞行器的航行时间, 作为惩罚数值。

第 i 个飞行器的近似航行距离为所有相邻的路径点的距离和, 表示为 l_i 如下:

$$l_i = \sum_{k=1}^{k_{\max}-1} |p_k - p_{k+1}| \quad (13)$$

则第 i 个飞行器的航行时间 $T(l_i)$ 为:

$$T(l_i) = \frac{l_i}{v_i} \quad (14)$$

对于每个飞行器, 航行时间越大, 即 $T(l_i)$ 越大, 惩罚值越大。

3 CPSO 协同作业路径规划算法

3.1 粒子群算法基本原理

粒子群优化算法是一种成熟的仿生算法, 来源于对鸟类捕食过程的研究。粒子群算法采用群体进化的方法, 需要建立 N 个维度的搜索区域, 其中每个粒子都具有位置和速度两个矢量信息。在迭代过程中, 会记录每个粒子的最佳位置和全局的最佳粒子位置, 并共享信息到全局, 根据每

次迭代结果的共享信息来决定下一次迭代优化的方向。

具体的粒子群算法过程如下：

(1) 首先建立维度 M 的初始粒子种群, $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 为第 i 个粒子的当前位置信息矩阵; $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ 为第 i 个粒子进化速度矩阵。

(2) 设置适应度函数 $f = f(X_i)$, 计算每个粒子当前位置下的适应度值。

(3) 根据问题需求, 确定适应度优劣评价标准, 保存当前全局最优适应度的粒子位置和每个粒子最优适应度的位置, 粒子个体最优历史确定如下式:

$$Xbest_i(t+1) = \begin{cases} Xbest_1(t) & f(Xbest_1(t)) \\ & \geq f(X_i(t+1)) \\ X_i(t+1) & f(Xbest_i(t)) \\ & < f(X_i(t+1)) \end{cases} \quad (15)$$

全局最优粒子确定如下式:

$$\begin{aligned} f(Xallbest(t)) &= \min \{ f(Xbest_1(t)), f(Xbest_2(t)), \\ &\quad \dots, f(Xbest_M(t)) \} \\ Xallbest(t) &\in \{ Xbest_1(t), Xbest_2(t), \\ &\quad \dots, Xbest_M(t) \} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $X_i(t)$ 为第 i 个粒子第 t 次迭代的位置信息; $Xbest_i(t)$ 为第 i 个粒子第 t 次迭代的最优位置; $Xallbest(t)$ 为第 t 次迭代全局最优粒子的位置。

(4) 根据已知的全局最优粒子和粒子个体最优历史, 来确定粒子群的进化方向, 具体进化方程包括速度更新和位置更新, 速度更新方程如下式:

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) &= \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 (Xbest_{ij} - x_{ij}(t)) \\ &\quad + c_2 r_2 (Xallbest_j - x_{ij}(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

位置更新方程如下式:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (18)$$

式中, c_1 、 c_2 为学习因子, 用来分配全局最优粒子和粒子个体最优历史对于进化步长影响的权重; r_1 、 r_2 为一对取值区间[0,1]的均匀分布随机数; $Xbest_{ij}$ 为第 i 个粒子个体最优历史的第 j 个数据值; $Xallbest_j$ 为全局最优粒子的第 j 个数据值。

(5) 重复步骤(2)~步骤(4), 直到迭代次数达到预设代数, 停止优化, 输出当前全局最优粒子。

3.2 CPSO 算法和求解过程

粒子群优化算法具有较快的收敛速度, 能高效处理简单的目标优化过程, 广泛适用于不同领域的优化问题。但是随着优化目标的复杂度不断提高, 普通的粒子群优化方法更加容易陷入局部最优解的情形。因此, 本文使用协同粒子群优化方法, 将复杂的优化目标分解为不同的粒子群的细化优化目标。协同粒子群算法基本思想为: 建立一个有多个粒子种群的复合粒子群, 每个独立粒子群代表了一个分解出来的细化优化目标, 每个粒子群都具有 M 个维度, 并在 M 个维度下进行优化, 每一次的迭代优化, 各个种群之间保持信息共享, 直到达到整体的优化目标。

基于协同粒子群算法的求解过程如下:

(1) 根据同类无人飞行器的数量建立 N 个协同进化的粒子群, 每个粒子群中包含 M 个粒子。建立每个粒子的位置矩阵和进化速度矩阵 $X_{ki} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 、 $V_{ki} = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ 为第 k 个粒子群, 第 i 个粒子的当前位置信息和当前进化速度。

(2) 构造全局问题解 C 以及全局适应度函数 $f(C)$:

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_N] \quad (19)$$

$$f(C) = \sum_{k=1}^N f_k(C_k) \quad (20)$$

式中, c_1, \dots, c_N 是各自分别为 N 个粒子群中各自的一个粒子。 $f_k(C_k)$ 为每个协同的粒子群适应度函数表示为:

$$f_k(C_k) = \alpha(1 - Atu) + \beta(1 - Acoll) + \gamma T \quad (21)$$

式中, α 、 β 、 γ 为不同惩罚函数的设计权重, 权重的设计考虑到避碰和转弯约束的必要性, 在平衡不同惩罚函数值量级的基础上, 将 α 、 β 设计为较大权值, γ 设计为较小权值。 Atu 、 $Acoll$ 、 γT 分别为本文第二部分设计的惩罚函数。

(3) 通过依次替换解中对应粒子群的粒子, 搜索并保存每个粒子群的全局最优适应度的粒子位置和每个粒子最优适应度的位置。

第 k 个粒子群每个粒子个体最优历史确定如下:

$$Xbest_i(t+1) = \begin{cases} Xbest_i(t) & f(C(c_k^{Xbest_i(t)})) \\ & \geq f(C(c_k^{i(t+1)})) \\ X_i(t+1) & f(C(c_k^{Xbest_i(t)})) \\ & < f(C(c_k^{i(t+1)})) \end{cases} \quad (22)$$

第 k 个粒子群粒全局最优粒子确定如下:

$$f(Xallbest_k(t)) = \min \{ f(Xbest_1(t)), f(Xbest_2(t)), \dots, f(Xbest_M(t)) \} \\ Xallbest_k(t) \in \{ Xbest_1(t), Xbest_2(t), \dots, Xbest_M(t) \} \quad (23)$$

式中, $X_i(t)$ 为第 i 个粒子第 t 次迭代的位置; $Xbest_i(t)$ 为第 i 个粒子第 t 次迭代的最优位置; $C(c_k^{Xbest_i(t)})$ 表示全局问题解 C 第 k 个解粒子被更新为最优粒子时的全局解, 这个最优粒子是第 k 个粒子群第 t 次迭代时第 i 个粒子历史最优位置; $C(c_k^{i(t+1)})$ 表示全局问题解 C 第 k 个解粒子被更新为最新粒子时的全局解, 这个最新粒子是第 k 个粒子群第 $t+1$ 次迭代时第 i 个粒子的最新位置; $Xallbest_k(t)$ 为第 k 个粒子群的第 t 次迭代全局最优粒子的位置。

(4) 重复步骤 (3), 直到得到 N 个粒子群的所有粒子个体最优历史和全局最优粒子, 全局问题解更新为:

$$C = [Xallbest_1(t), Xallbest_2(t), \dots, Xallbest_N(t)] \quad (24)$$

然后通过式(17)、(18)对整个种群所有粒子的进化速度和当前位置进行更新迭代。

(5) 重复步骤 (3)~步骤 (4), 直到迭代次数达到预设代数, 停止优化, 输出并保存当前最优粒子群, 即为此同类无人飞行器最优路径规划方案。

(6) 根据得到的同类飞行器航行最优规划方案执行航行任务, 并沿途更新其他集群飞行器航行必要环境信息数据, 完成之后, 重复步骤 (1)~步骤 (6) 来进行顺次的下一个同类无人飞行器集群路径规划。直至 3 次顺次的同类无人飞行器路径规划完成后, 得到并实现了最终的协同航行路径规划方案。

4 仿真结果及分析

4.1 海空跨域无人飞行器集群参数设置

为了验证所提出的群无人飞行器海空协同路径规划策略的有效性, 本文建立了一个多障碍物的航行场景模型, 并以其为任务区域进行模拟仿真实验。整个区域为一个水深 100 m、空域高度 100 m、长宽各为 1000 m 的长方体区域。整个区域中, 共设置大小、位置不同的 11 个椭球形障碍物。

海空跨域无人飞行器集群中包含 3 类无人飞行器集群, 每个集群根据任务需求来设置飞行器数量; 本文协同集群设计为: UAV 集群共两台, 记为 $a1$ 、 $a2$; USV 集群共 4 台, 记为 $s1$ 、 $s2$ 、 $s3$ 、 $s4$; AUV 集群共两台, 记为 $u1$ 、 $u2$ 。具体每台飞行器的参数和状态设置如表 1、表 2 所示。

表 1 UAV 和 AUV 基础参数
Table 1 General parameters of UAV and AUV

参数	UAV		AUV	
	$a1$	$a2$	$u1$	$u2$
航行速度/(m/s)	20	21	6	7
极限转弯半径/m	55	65	80	80
起点位置	(80, 0, 70)	(0, 110, 70)	(800, 700, 0)	(780, 800, 0)
目标位置	(900, 700, 70)	(800, 800, 70)	(900, 780, -60)	(900, 850, -60)

表 2 USV 基础参数
Table 2 Basic parameters of USV

参数	USV			
	s1	s2	s3	s4
航行速度/(m/s)	22	31	32	33
极限转弯半径/m	100	200	300	250
起点位置	(100, 40, 0)	(0, 80, 0)	(100, 0, 0)	(0, 100, 0)
目标位置	(800, 700, 0)	(780, 800, 0)	(900, 680, 0)	(780, 900, 0)

4.2 协同作业路径规划仿真

CPSO 算法需要预设最大迭代次数，迭代次数的设置不仅会影响优化过程探索全局解的能力，也会影响仿真规划的效率。较低次数的迭代虽然能快速得到可行解，但是收敛过早，对全局最优解的发现能力较差；较高次数的迭代虽然能够得到全局最优解，但是探索过程缓慢，效率低下。本文选择使用线性递减的惯性因子，来保证算法前期全局寻优能力强，后期局部寻优能力强。

仿真模拟过程中，进行多次仿真模拟过程，

对比不同仿真迭代次数下算法的有效性。每次仿真实验预设不同的最大迭代次数，包括：10 次、30 次、50 次、100 次、200 次、500 次、800 次、1000 次、2000 次最大迭代数。得到的适应度测试结果见表 3、图 1、图 2。同时，展示了 10 次、100 次、800 次的仿真规划方案，如图 3~图 5 所示。

由仿真结果可以看出：

(1) 如图 3 所示，在本次仿真场景实验的条件下，10 次迭代优化就可以得到可行的协同作业

表 3 不同迭代数下适应度
Table 3 Adaptation table under different iterations

最大迭代数	协同适应度								整体适应度
	a1	a2	s1	s2	s3	s4	u1	u2	
10	71.54	58.44	49.87	37.85	36.40	42.87	52.25	31.56	380.78
30	58.21	52.32	57.49	35.90	37.14	34.58	43.41	38.42	357.47
50	56.28	51.92	44.74	36.12	33.28	34.55	27.82	37.23	321.94
100	54.77	51.03	44.23	35.01	33.17	34.39	37.12	37.91	327.63
200	54.73	51.04	44.20	34.81	33.18	34.93	30.26	38.93	322.08
500	54.52	51.40	43.89	34.80	33.34	34.33	26.92	25.10	304.30
800	54.49	51.08	43.91	34.81	33.17	34.16	25.05	24.31	300.98
1000	54.48	51.03	43.91	34.65	33.19	34.33	24.99	24.31	300.89
2000	54.38	51.08	43.91	34.81	33.17	34.33	23.97	24.20	299.85

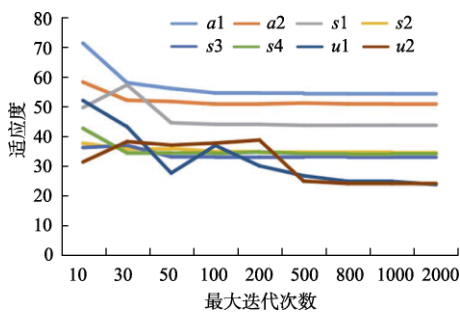


图 1 不同迭代次数下的最优适应度值折线图
Fig. 1 Line diagram of optimal fitness value under different iterations

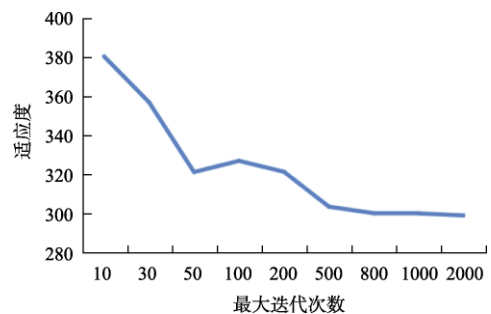


图 2 整体最优适应度值折线图
Fig. 2 Line diagram of the overall optimal fitness values

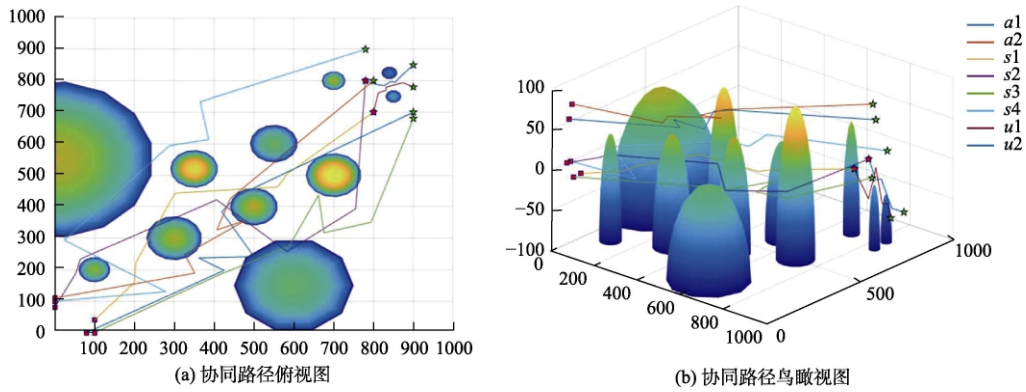


图 3 最大迭代次数为 10 次的协同路径

Fig. 3 Collaborative path graph with maximum number of iterations of 10

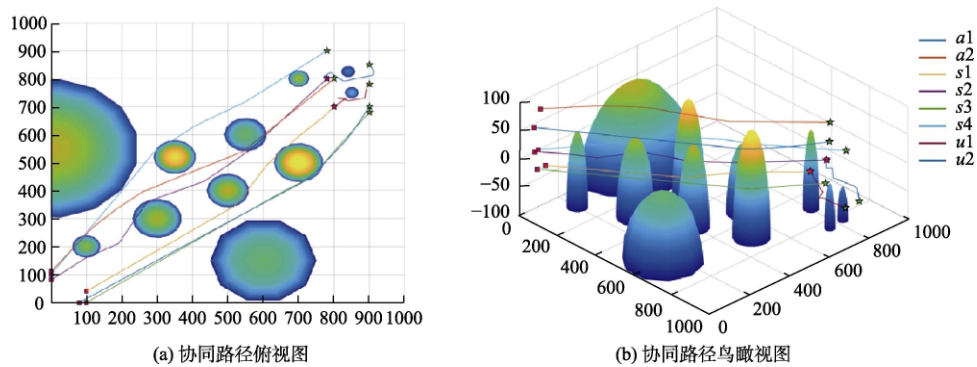


图 4 最大迭代次数为 100 次的协同路径

Fig. 4 Collaborative path graph with maximum number of iterations of 100

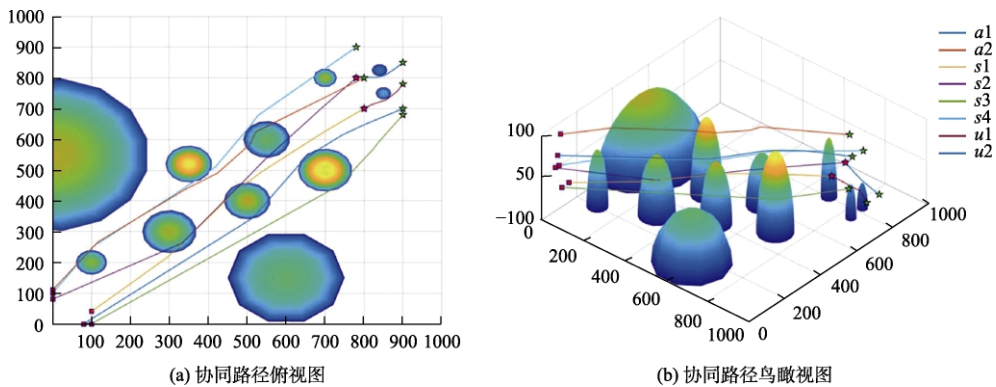


图 5 最大迭代次数为 800 次的协同路径

Fig. 5 Collaborative path graph with maximum number of iterations of 800

路径规划方案。但是由于迭代次数较小对于全局解的探索能力较小, 导致此时的协同作业规划方案适应度较差, 虽然完全满足了避碰约束, 但仅部分满足了转弯的约束, 同时航行路径有往复, 耗费了较多的航行时间。

(2) 如图 4 所示, 在 100 次的最大迭代次数

的条件下可以得到较优的协同作业路径规划方案, 尤其是 UAV 和 USV 集群协同航行路径, 完全满足了转弯和避碰的约束要求, 同时航迹平滑没有往复。此时的 UAV 集群和 USV 集群的协同适应度迭代结果也达到最优水平, 如图 1 所示。但是由于 AUV 集群的规划路径区别于其他集群,

需要考虑到航行深度的变化,导致路径规划更加复杂。从而,AUV 集群的规划路径依然有急转弯、往复的现象。相应的 AUV 集群的协同适应度迭代结果(见图 1)并未达到最优水平。

(3)如图 5 所示,在最大迭代次数设置为 800 次的条件下,得到了全局最优的协同作业路径规划方案。UAV 集群、USV 集群和 AUV 集群均得到了最优的协同路径,即完全满足了转弯、避碰的约束条件,同时航迹线十分平滑。此时,如表 3、图 1、图 2 所示,各跨域无人集群的协同适应度和全局适应度均达到了最优水平。

仿真结果表明,在 UAV 集群和 USV 集群的协同作业路径规划过程中,能在 50~100 次的最大迭代次数下较为稳定地收敛到最小适应度值,即得到这两个跨域协同集群作业方案的全局最优解;而 AUV 集群的协同作业路径规划过程,需要 500~800 次的迭代次数来收敛到较为稳定的最小适应度值。如图 5 所示的仿真结果,充分地体现出了本算法对于解决海空跨域无人航行器集群在复杂水域环境下协同作业以追踪水下目标问题的优越性和有效性。

5 结 论

本文面向海空跨域无人航行器集群协同作业任务提出了一种基于 CPSO 的路径规划算法。在 CPSO 算法设计过程中,将无人航行器转弯性能、航行时效和避碰等约束条件以惩罚函数形式体现出来,建立全局的适应度优化函数实现非线性迭代求解,为各个无人航行器建立独立的粒子群来优化,并行处理同类航行器的优化过程,共享优化信息,减少了迭代次数,提升了协同作业路径规划的效率。仿真结果表明,CPSO 算法为 UAV、USV、AUV 无人航行器集群规划了有效协同作业路径,实现了水下目标的有效跟踪。

参 考 文 献

- [1] 符小卫, 陈子浩. 基于一致性协议的多无人机协同围捕控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(9): 2501-2507.
- [2] 朱佳莹, 高茂庭. 融合粒子群与改进蚁群算法的 AUV 路径规划算法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(6): 267-273.
- [3] Huang L, Hong Q, Peng J, et al. A novel coordinated path planning method using k-degree smoothing for multi-UAVs[J]. Applied Soft Computing, 2016, 48: 182-192.
- [4] 刘彬. 多无人艇协同编队控制理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [5] Luitpold B. Coordinated target assignment and UAV path planning with timing constraints[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94: 857-869.
- [6] Zhang G, Jia H. 3D path planning of AUV based on improved ant colony optimization[C]. Control Conference. IEEE, 2013.
- [7] Zhang G, Jia H. Global path planning of AUV based on improved ant colony optimization algorithm[C]. IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL). IEEE, 2012.
- [8] Che G, Liu L, Yu Z. An improved ant colony optimization algorithm based on particle swarm optimization algorithm for path planning of autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(8): 3349-3354.
- [9] Ma Y, Zhao Y J, Atilla Incecik, et al. A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs[J]. Ocean Engineering, 2021, 224: 108713.
- [10] Zhao Y J, Ma Y, Hu S L. USV formation and path-following control via deep reinforcement learning with random braking[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021 (99): 1-11.
- [11] Bella S, Belbachir A, Belalem G. A Hybrid architecture for cooperative UAV and USV swarm vehicles[C]. Machine Learning for Networking (MLN 2018), Springer, 2018.
- [12] Yang J, Tseng C, Tseng P. Path planning on satellite images for unmanned surface vehicles[J]. International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering, 2015, 7(1): 87-99.
- [13] 寇立伟. 四旋翼水下航行器的轨迹跟踪和协同包围控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [14] Hu C, Li F, Yang Y. Cooperative navigation and control for surface-underwater autonomous marine vehicles[C]. 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2017, 589-592.
- [15] Wu Y, Low K H, Chen L. Cooperative path planning for heterogeneous unmanned vehicles in a search-and-track mission aiming at an underwater target[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6782-6787.
- [16] 张洛溪, 谷丰, 何玉庆, 等. 空中-水面子母无人平台系统设计与协同控制[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 85-96.
- [17] Ma Y, Zhao Y J, Qi X, et al. Cooperative communication framework design for the unmanned aerial vehicles-unmanned

surface vehicles formation[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 1-9.

[18] Shao G M, Ma Y, Reza Malekian, et al. A novel cooperative platform design for coupled USV-UAV systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(9): 4913-4922.

[19] 何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势[J]. *无人系统技术*, 2021, 4(4): 1-13.

作者简介:



殷 翔 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水空跨域无人飞行器协同路径规划。



李培正 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为船舶通信导航技术、无人艇技术。



骆曹飞 (1984-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为智能船舶/无人艇通信技术、航行控制技术。



马赛男 (1984-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子与信息工程/无人艇总体设计/智能航行控制。



马 勇 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶智能航行理论与技术、智能海事保障技术。本文通信作者。

[引用格式] 江海洋, 高超, 马勇. 基于 FP-TSDP 算法的船舶轨迹压缩[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 36-42.

基于 FP-TSDP 算法的船舶轨迹压缩

江海洋¹, 高超², 马勇¹

(1. 武汉理工大学航运学院, 武汉 430063; 2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430063)

摘要: 在船舶轨迹压缩方面, 通常存在难以有效剔除海量船舶自动识别系统 (AIS) 数据中无用数据点的问题。为改进船舶轨迹压缩质量, 提出基于道格拉斯-普克 (DP) 改进的特征点 (FP)-时空 (TS) 算法。在 FP-TSDP 算法中, 关注船舶行驶过程中加减速、转向、进出特殊区域等重要的动态行为点, 采用数值计算方法提取和保留 AIS 数据中上述动态行为 FP, 以 FP 为初始点使用 DP 算法对 AIS 数据进行压缩; 同时, 考虑 AIS 数据的 TS 特性, 以时空距离为标准进行取舍, 进而在 FP 和 TS 特性优化的基础上实现了船舶轨迹压缩。结果表明, 在保证压缩率的前提下, 经 FP-TSDP 算法压缩后的轨迹更接近原始轨迹, 同时其重要动态行为点留存率更高。

关键词: AIS; FP-TSDP 算法; 轨迹特征点; 时空特性; 船舶轨迹压缩

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2022)01-36-07

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.004

Ship Trajectory Compression Based on FP-TSDP Algorithm

JIANG Haiyang¹, GAO Chao², MA Yong¹

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. China Ship Design and Research Center, Wuhan 430063, China)

Abstract: In terms of ship trajectory compression, there is usually a problem that it is difficult to effectively eliminate useless data points in the massive automatic identification system (AIS) data. In order to improve the quality of ship trajectory compression, an improved feature point (FP)-temporal and spatial (TS) algorithm based on Douglas-Peucker (DP) is proposed. In the FP-TSDP algorithm, attention is paid to important dynamic behavior points such as acceleration and deceleration, turning, entering and leaving special areas during the traveling process, and the above-mentioned dynamic behavior feature points (FP) in the AIS data are extracted and retained by numerical calculation methods, with FP as the initial Use DP algorithm to compress AIS data. At the same time, considering the temporal and spatial (TS) characteristics of the AIS data, the choice is made based on the temporal and spatial distance, and then the ship trajectory compression is realized based on the optimization of the FP and TS characteristics. The results confirm that under the premise of ensuring the compression rate, the trajectory compressed by the FP-TSDP algorithm is closer to the original trajectory, and the retention rate of important dynamic behavior points is higher.

Key words: AIS; FP-TSDP Algorithm; Trajectory Feature Points; Temporal and Spatial Characteristics; Ship Trajectory Compression

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金 (52022073, 62073251); 湖北省自然科学基金 (2020CFA055)

1 引言

船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 轨迹数据中蕴含着大量信息^[1-4], 包括船舶的静态和动态信息、船舶驾驶员的人为因素、船舶避碰行为、船员通常做法和习惯航路等。通过分析和研究船舶轨迹, 可获得能够反映船舶规律的有效和潜在信息, 进而为海上安全监管、船舶通航、航海保障等活动提供必要的技术支持^[5-6]。然而, 海量的 AIS 数据中存在一些利用价值较低的数据点, 当移除此类数据后船舶轨迹不会产生改变。由此, 为提高数据的利用效率, 需要对冗杂的船舶 AIS 轨迹数据进行压缩处理。

通常, 包括道格拉斯-普克 (Douglas-Peucker, DP) 在内的多数船舶轨迹压缩算法往往仅考虑轨迹的距离偏移量来压缩轨迹^[7], 在压缩过程中舍弃了船舶航速、航向改变、进出某区域边界等航迹特征点, 得到的轨迹忽略了船舶的动态信息, 降低了数据的利用价值; 少部分压缩算法通过航向、航速变化率均值来保留船舶轨迹特征点^[8-10], 但忽略了由传感器误差导致的航速、航向出现的小范围波动, 进而保留了波动点, 使得压缩后保留的数据点过多; 极少数压缩算法虽然考虑了船舶的时空特性^[11-13], 但仅将时间特性作为分类和排序的指标, 一般压缩后的轨迹失真率较高。

为提升轨迹压缩算法质量, 充分应用船舶动态特征点 (Feature Point, FP) 数据以及时空特性 (Temporal and Spatial, TS), 在 DP 算法的基础上提出 FP-TSDP 船舶轨迹压缩算法。对比结果表明, 经 FP-TSDP 算法压缩后的轨迹质量得到较好的提升。

2 AIS 数据解码与预处理

AIS 数据分析主要包括数据解码、数据预处理和数据挖掘 3 个步骤。数据预处理包括轨迹异常点清除和船舶轨迹压缩环节, 经过预处理的数据, 较为精简, 具有较高的实用性和使用价值。

2.1 AIS 数据解码

AIS 报文信息是一串复杂晦涩的字符串, 封

装度极高, 难以被人们直接理解和应用, 为获取直观信息, 需要解码原始信息。数据中的每个记录点代表一个由船载 AIS 设备在某个瞬间发出的 AIS 报告信息。

AIS 数据解码主要由 3 个阶段实现^[14]。首先, 将 AIS 原始数据转换为 ASCII 码。然后, 将 ASCII 码值与 16 进制数 80H 相比较, 如果大于 80H, 则转换出的 ASCII 码值加上 20H; 如果小于 80H, 则转换的 ASCII 码值加上 28H。经变换, 原来的 ASCII 码变成了 6 位 ASCII 码。单条信息转换后全长最大为 168bit, 每个字符都是转换后 6bit 的 ASCII 码, 从字符“1”开始为有效信息。最后, 参照 AIS 国际标准信息对照表, 解析出对应信息。解码后的信息是一连串由数字 0 和 1 组成的二进制编码, 需对比国际 AIS 制定的标准协议, 利用 27 种电文的格式分配相应的比特位, 拼接信息后解析出 AIS 信息。

2.2 AIS 数据预处理

经数据解码后的 AIS 数据不能直接使用, 主要是存在许多异常数据, 会影响船舶轨迹压缩的结果。为保证数据的准确性, 需要对 AIS 数据进行异常数据处理工作。AIS 数据主要有 3 种异常情况。其一, 存在静态信息输入错误和部分信息未输入的情况; 其二, 存在船舶航次相关信息输入错误或信息未输入的情况; 其三, 存在因传感器故障, 导致船舶动态信息出现错误的情况。

由此, 针对解码后的数据, 需要开展 AIS 数据筛选预处理工作^[15], 即需要删除 AIS 报告信息 MMSI 记录为 0 的点; 删除数据中偏离所选水域航道较远的点, 如经纬度显著超出航道, 速度出现负值或超出正常值; 删除时间相邻的 2 个 AIS 报告点距离超过实际可能最大值的轨迹点。在数据预处理阶段, 删除无效的、不合理的、偏离航道的数据, 确保获得有效的 AIS 数据。

出于安全考虑, 国际海事组织要求 AIS 数据点的报告间隔较短。经过上述筛选处理的 AIS 数据规模非常大, 直接使用导致运算速度缓慢, 难以得到有效应用。为此, 需要对 AIS 数据进行压缩处理。传统 DP 压缩算法^[16]根据距离阈值来判

定。在 DP 算法中,通常将轨迹的起点和终点连成直线,计算轨迹上每个点到这条直线的距离,选择其中距离最大的点,将其距离与预设的距离阈值进行比较,小于距离阈值,则舍弃这条直线两侧的点,若大于距离阈值,则保留这个点;然后,将起点和终点分别同这个点进行连线,得到两条直线,再分别重复上述步骤,迭代计算,直至所有点到对应直线的距离都小于距离阈值,则完成压缩。可知,上述方法压缩出来的轨迹,动态信息丢失较多、轨迹失真率较高,有必要设计一种高质量的船轨迹压缩算法。

3 船舶轨迹压缩 FP-TSDP 算法

3.1 特征点优化

传统 DP 算法一般仅通过距离偏移量来压缩轨迹,会导致在压缩过程中舍弃部分船舶的动态信息、航速及航向改变、进出某区域边界等航迹特征点,降低了数据的利用价值。因此,在 DP 算法的基础上,需要优化轨迹特征点,开展提取和保留特征点研究工作。

针对船舶航速、航向改变点的提取保留工作,可通过判断各数据点的船舶航速、航向改变率是否高于某一设定阈值来实现。

船舶航速改变率及航向改变率的示意图如图 1 所示,其中, B_{i-1}, B_i, B_{i+1} 为连续的 3 个数据点, V_{in}, V_{out} 分别为航段 $B_{i-1} B_i, B_i B_{i+1}$ 上的平均航速, COG_{in}, COG_{out} 分别为 $B_{i-1} B_i, B_i B_{i+1}$ 上的平均航向。

各数据点的船舶航速、航向改变率分别由式(1)、(2)计算得出^[17]。

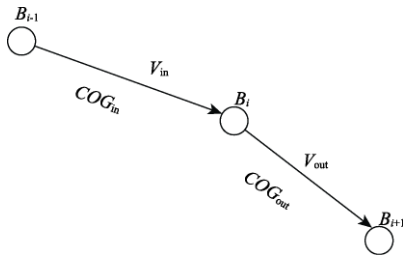


图 1 船舶航速改变率和航向改变率计算示意图
Fig. 1 Schematic diagram of calculating of ship speed change rate and course change rate

$$S_{cri} = \frac{|S_i^{out} - S_i^{in}|}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, S_{cri} 为第 i 个 AIS 数据点的航速改变率, S_i^{out} 表示第 $i+1$ 个和第 i 个 AIS 数据点间的平均航速, S_i^{in} 表示第 i 个和第 $i-1$ 个 AIS 数据点间的平均航速, Δt 表示第 $i+1$ 个 AIS 数据点和第 $i-1$ 个 AIS 数据点的时间间隔。

$$C_{cri} = \frac{|C_i^{out} - C_i^{in}|}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, C_{cri} 为第 i 个 AIS 数据点的航向改变率, C_i^{out} 表示第 $i+1$ 个和第 i 个 AIS 数据点的平均航向, C_i^{in} 表示第 i 个和第 $i-1$ 个 AIS 数据点间的平均航向, Δt 表示第 $i+1$ 个 AIS 数据点和第 $i-1$ 个 AIS 数据点的时间间隔。

在确定阈值的过程中,首先由式(3)、(4)计算整体数据全航程的平均航速改变率以及平均航向改变率;考虑到船载 AIS 设备传感器精度的限制,航速和航向数据会存在小范围的波动,如以平均改变率作为阈值,可能会将此类波动点视为航速改变、航向改变的轨迹特征点而保留下来,导致压缩后数据量依然庞大;通过多次测验分析引入扩大系数 M, N , 其中 $9 \leq M \leq 11, 3 \leq N \leq 5$ 。分别对平均航速改变率和平均航向改变率进行 M 和 N 倍扩大处理,在接近原始轨迹的同时可显著缩小数据量。

$$\overline{S_{cr}} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} S_{cri} \quad (3)$$

$$\overline{C_{cr}} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} C_{cri} \quad (4)$$

式中, $\overline{S_{cr}}$ 为整个航行过程中的平均航速改变率; $\overline{C_{cr}}$ 为整个航行过程中的平均航向改变率; n 表示 AIS 数据点个数。

船舶驶入/出行为^[18]包括驶入/出码头、锚地、桥区水域、渔区水域、环形道等闭合区域以及航道、危险线、边界线等非闭合区域。船舶驶入/出轨迹特征点是指船舶通过上述非闭合区域边界线前后的 AIS 数据点。对于此类轨迹特征点,可

以通过判断相邻两个 AIS 数据点分别代入边界线方程后值的乘积是否小于 0。若小于 0, 则标记并保留为船舶进出某区域轨迹点, 构成进出某区域点集合。

DP 算法特征点优化即通过上述方法, 对轨迹中的特征点进行识别保留, 以特征点为 DP 算法输入的初始点进行轨迹压缩。经过特征点优化后的 DP 算法进行轨迹压缩, 压缩后的轨迹保留了这些轨迹特征点, 关键信息含量高于传统 DP 算法进行压缩后的轨迹, 轮廓特征更加接近于原始轨迹, 具有较高的利用价值。

3.2 时空特性优化

AIS 数据的时空特性^[19], 如图 2 所示, 图中 S_1 、 S_2 、 S_3 为 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻船舶的位置, 对此段轨迹进行压缩, S_1 、 S_3 的连线为预期直线轨迹, S_2' 为计算 S_2 到预期直线轨迹欧式距离对应的船位, S_2'' 为 T_2 时刻预期直线轨迹上实际的船位。不难看出, 在预期轨迹上偏移点所对应的实际预期船位应在偏移点计算到预期轨迹线欧式距离的船位之前。传统 DP 算法计算轨迹的偏移量的方式往往采用欧式几何上的垂直距离, 此距离略小于时空偏移距离, 使用此距离进行压缩, 虽然压缩后数据量较小, 但压缩后轨迹的失真率较高。因此, 在 DP 算法的基础上, 需要进行时空特性优化, 计算偏移船位与实际预期船位的时空距离, 以时空距离对比 DP 算法距离阈值进行偏移点的取舍。

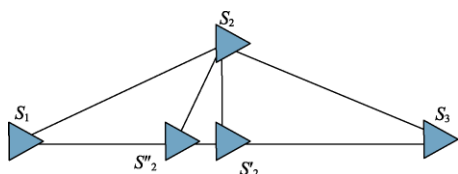


图 2 时空特性优化原理

Fig. 2 Principle of optimization using time and space characteristics

时空距离计算方法如下: 连接每个分段航迹的起点和终点, 并根据起点与终点的经度, 纬度转换后的墨卡托坐标系坐标和时间建立虚拟直线时空轨迹, 对每个子轨迹段, 计算该子轨迹段 AIS

数据点在虚拟直线时空轨迹上同时刻点的墨卡托坐标系坐标, 将该子轨迹段的 AIS 数据点的墨卡托坐标系坐标与该 AIS 数据点在虚拟直线时空轨迹上同时刻点的墨卡托坐标系坐标之间的距离作为该 AIS 数据点到虚拟直线时空轨迹的时空距离, 即为 S_2S_2'' 。

DP 算法的时空特性优化即采用时空距离 S_2S_2'' 代替欧式距离 S_2S_2' 距离阈值进行压缩。经过时空特性优化后的 DP 算法进行轨迹压缩, 能够保证压缩后船舶轨迹轮廓特征更加接近原始轨迹, 降低压缩后轨迹失真率。

3.3 FP-TSDP 算法流程

通过上述特征点优化与时空特性优化, 提出 FP-TSDP 算法流程, 流程图如图 3 所示。

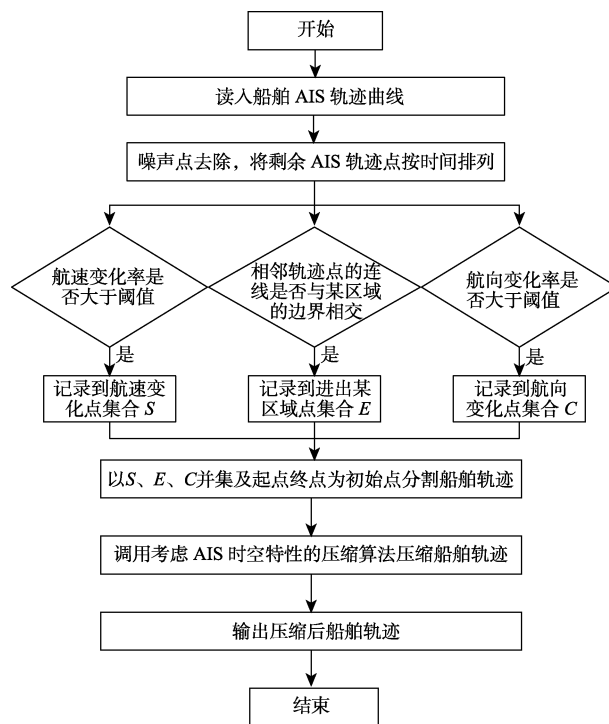


图 3 FP-TSDP 算法流程图

Fig. 3 FP-TSDP algorithm flow chart

FP-TSDP 算法具体实现步骤如下:

- (1) 识别并保留 AIS 时序性数据记录中的船舶航向和航速的改变点, 船舶驶入/出某区域特征点, 分别记录到航速改变点集合 S , 航向改变点集合 C , 驶入/出某区域特征点集合 E ;
- (2) 设置距离阈值 d_T , 以船舶轨迹的起点、

终点以及集合 S 、 E 、 C 中的特征轨迹点为初始点对轨迹进行分段标记, 相邻两个轨迹特征点之间的轨迹为一个子轨迹段;

(3) 连接每个分段航迹的起点和终点, 并根据起点与终点的经度, 纬度转换后的墨卡托坐标系坐标和时间建立虚拟直线时空轨迹。对每个子轨迹段, 计算该子轨迹段 AIS 数据点在虚拟直线时空轨迹上同时刻点的墨卡托坐标系坐标, 将该子轨迹段 AIS 数据点的墨卡托坐标系坐标与该 AIS 数据点在虚拟直线时空轨迹上同时刻点的墨卡托坐标系坐标之间的距离作为该 AIS 数据点到虚拟直线时空轨迹的时空距离 d , 找到所有时空距离中的最大距离 d_{\max} , 比较该最大距离与预设距离阈值 d_T 的大小;

(4) 如果 $d_{\max} < d_T$, 则该子轨迹段上所有中间数据点全部舍掉, 舍掉所有中间点后, 连接该子轨迹段起点和终点的直线就作为该子轨迹段的近似, 该段子轨迹处理完毕;

(5) 如果 $d_{\max} > d_T$, 则对应最大距离的 AIS 数据点应保留为结果轨迹上的数据点, 同时通过对对应最大距离的 AIS 数据点将该段子轨迹分为两部分, 对这两部分曲线分别采用步骤 (3) 和步骤 (4) 进行处理, 直到所有的 $d_{\max} < d_T$;

(6) 当所有子轨迹段处理完后, 依次连接各分割点形成的轨迹, 即为原轨迹压缩后的近似轨迹。压缩过程示意图如图 4 所示, 如图中①表示起始点和特征点划分子轨迹段以及子轨迹段时空插值的结果, 图中②~⑤表示各子轨迹段的处理流程, 图⑥表示对①中轨迹最终处理结果。

4 仿真结果及分析

长江武汉段属于长江中游与下游的交接段, 是长江中下游水运的重要中转站, 水运较为繁忙, AIS 基站仅一天接收到的 AIS 数据就有 15 万条之多。水域内桥区多、港区和停泊区多, 增加了船舶在水域内航行的安全隐患。为提升利用 AIS 数据对船舶轨迹的分析研究, 可以从中获取能够反映船舶规律的、有效的、潜在的信息, 进而为海

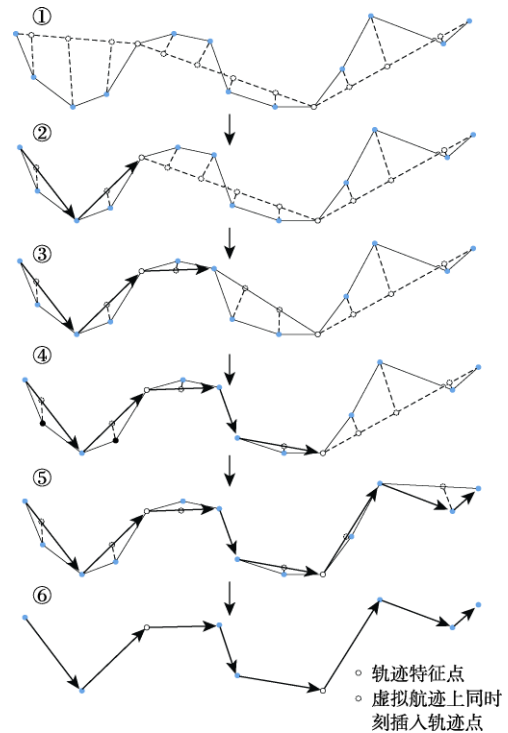


图 4 FP-SPDP 算法压缩轨迹过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the trajectory compression process of the FP-SPDP algorithm

事机关对船舶违章行为监管, 修订航行规则, 推行船舶定线制提供有效的数据支持。为提升数据利用效率, 需要对数据进行压缩处理。

本文分别使用传统 DP 算法和本文进行优化过的 DP 算法, 对长江武汉段 2016 年 8 月 9 日当天所采集 AIS 数据, 原始轨迹点总计 146789 个, 作为原始数据进行压缩实验, 距离阈值均为 100, 特征点优化扩大系数 M 为 10, N 为 5。原始船舶轨迹图如图 5 所示, 总体压缩结果如图 6 和图 7 所示, 单船压缩结果如图 8 和图 9 所示。传统 DP 算法压缩后保留轨迹点 12272 个, 压缩率 (压缩后轨迹点数量/原始轨迹点数量) 为 8.36%, 优化 DP 算法压缩后保留轨迹点数量 17703 个, 压缩率为 12.06%。

对比图 5~7, 可以明显看出传统 DP 算法压缩后有一段轨迹丢失, FP-TSDP 算法压缩后的轨迹与原始轨迹更为相近; 如图 8 和图 9 所示, 传统 DP 算法压缩后轨迹点较少, 但特征点缺失较多, FP-TSDP 算法所得到的轨迹更加平滑, 接近于原始轨迹, 且特征点保留完整。在图 8 和图 9

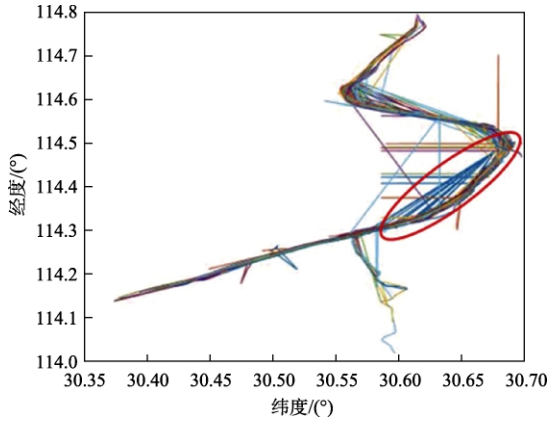


图 5 原始船舶轨迹图
Fig. 5 Original ship trajectory map

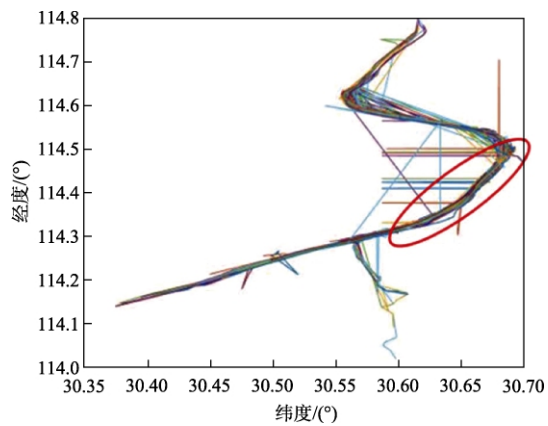


图 6 传统 DP 算法压缩后整体船舶轨迹图
Fig. 6 Overall ship trajectory map compressed by the traditional DP algorithm

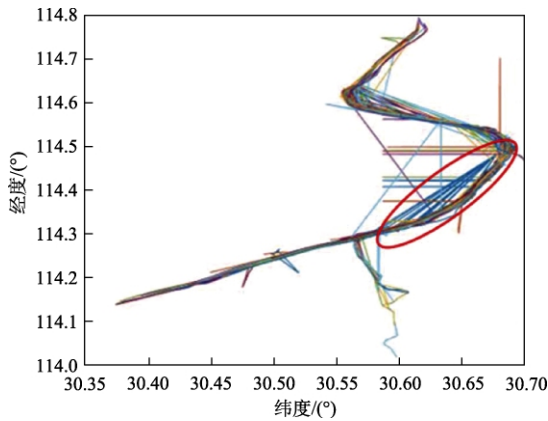


图 7 FP-TSDP 算法压缩后整体船舶轨迹图
Fig. 7 Overall ship trajectory map compressed by FP-TSDP algorithm

的基础上增加一个维度表示船舶速度，分别做出两种方法轨迹压缩后单船轨迹-速度复合曲线，如图 10 和图 11 所示。对比分析图 10 和图 11，可

看出传统轨迹压缩方法压缩后的轨迹中船舶航速改变点明显少于 FP-TSDP 算法压缩后的船舶轨迹，同时大部分轨迹特征点偏离复合曲线。

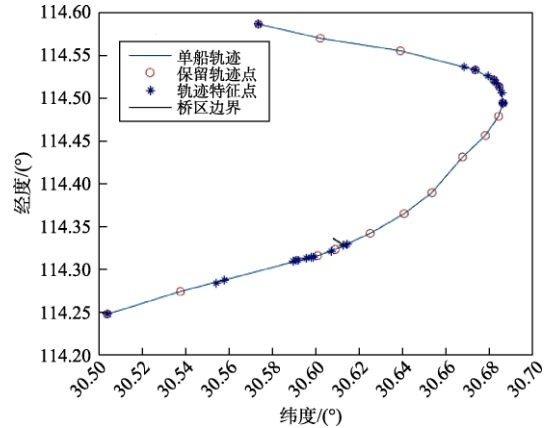


图 8 传统 DP 算法压缩后单船轨迹图
Fig. 8 Single ship trajectory after compression by traditional DP algorithm

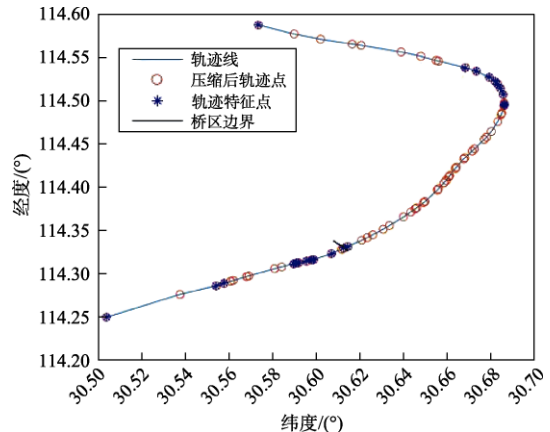


图 9 FP-TSDP 算法压缩后的单船轨迹图
Fig. 9 Single ship trajectory compressed by FP-TSDP algorithm

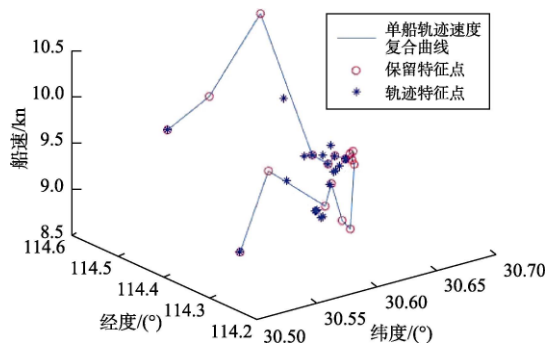


图 10 传统 DP 算法压缩后单船轨迹-速度复合曲线
Fig. 10 Single ship trajectory-speed compound curve compressed by traditional DP algorithm

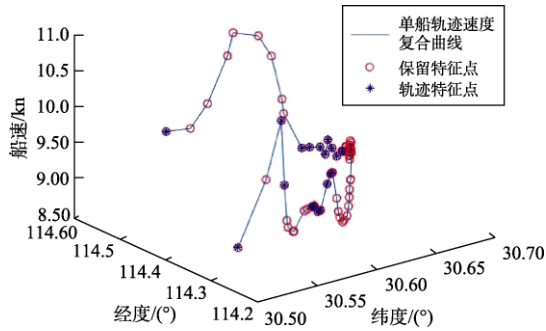


图 11 FP-TSDP 算法压缩后的单船轨迹-速度复合曲线

Fig. 11 Single ship trajectory-speed compound curve compressed by FP-TSDP algorithm

5 结 论

针对船舶 AIS 数据中无用数据点的剔除问题, 本文对传统 DP 算法进行了特征点优化和时空特性优化, 提出了基于 FP-TSDP 算法的船舶 AIS 轨迹压缩方法。实验结果表明, 在保证一定压缩率的前提下, FP-TSDP 算法充分考虑了特征轨迹点的保留问题, 对船舶行驶中加速、减速、转向、进出特殊区域等重要的动态行为点较完整地进行保留。同时, 利用时空距离压缩轨迹, 较好地保留了原始轨迹的形状。通过 FP-TSDP 算法简化后的数据较为简洁, 且有较大的二次利用价值。

参 考 文 献

- [1] 杨博辰. 基于 AIS 的船舶轨迹分析的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [2] De Vries G K D, Van Someren M. Machine learning for vessel trajectories using compression, alignments and domain knowledge[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(18): 13426-13439.
- [3] 郭乃琨, 马壮壮, 岳明桥. 船舶轨迹挖掘与可视化技术分析研究[J]. *电子元器件与信息技术*, 2020, 4(3): 137-138.
- [4] 朱飞祥, 张英俊, 高宗江. 基于数据挖掘的船舶行为研究[J]. *中国航海*, 2012, 35(2): 50-54.
- [5] Lin K, Li X, Zhang Z, et al. A K-means clustering with optimized initial center based on Hadoop platform[C]. *International Conference on Computer Science & Education*. IEEE, 2014: 263-266.
- [6] Xu K, Zhen H, Li Y, et al. Big data acquisition and analysis platform for intermodal transport[J]. *International Journal of Database Theory and Application*, 2016, 9(12): 67-78.
- [7] 毕月琨. AIS 基站系统中的数据解析与压缩[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- [8] 张永兵, 孟凡彬, 孟科. 一种基于航向和航速变化率的船舶轨迹压缩方法[P]. 天津: CN110990504A, 2020-04-10.
- [9] 张广娜, 梁莹力. 船舶高速航行运动轨迹分段压缩算法研究[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(12): 49-51.
- [10] 陈永超. 基于数据挖掘的船舶轨迹预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [11] 徐凯, 邱家瑜, 李燕. 一种加入时间维的船舶轨迹高效离线压缩算法研究[J]. *计算机科学*, 2017, 44(S2): 498-502.
- [12] Zhao L B, Shi G Y. A method for simplifying ship trajectory based on improved Douglas-Peucker algorithm[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 166: 37-46.
- [13] Cao W, Li Y. DOTS: An online and near-optimal trajectory simplification algorithm[J]. *Journal of Systems and Software*, 2017, 126: 34-44.
- [14] 莫红飞, 张勇. AIS 数据解码分析[J]. *计算机光盘软件与应用*, 2012, 15(6): 60-61.
- [15] 艾佳琪. AIS 轨迹聚类分析及异常轨迹检测[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [16] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. *The Canadian Cartographer*, 1973, 10(2): 112-122.
- [17] 陈鹏. 基于 HSSVM 与卷积神经网络的船舶避碰知识库研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [18] 文元桥, 宋荣鑫, 黄亮, 等. 船舶行为的语义建模与表达[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(8): 109-115.
- [19] 高逸. 基于 Seq-CGAN 与操纵行为基拼接的船舶智能避碰决策结构化学学习[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.

作者简介:



江海洋 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶智能航行信息感知与控制。



高超 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能船舶技术、船舶物流。



马勇 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶智能航行理论与技术、智能海事保障技术。本文通信作者。

[引用格式] 雷 洁, 徐文华, 许国冬, 等. 基于双目视觉定位技术的无人船航迹跟踪控制室内模型实验[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 43-50.

基于双目视觉定位技术的无人船航迹跟踪控制室内模型实验

雷 洁^{1,2}, 徐文华², 许国冬², 李明爵²

(1. 重庆前卫科技集团有限公司, 重庆 401121; 2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 水面无人系统的航向控制与航迹跟踪技术在研究开发阶段一般在室内环境进行调试与运行, 该过程需要定位系统进行辅助。实船常用的定位技术难以在室内发挥作用, 现有的几种室内定位技术存在成本高、信号传播不稳定等问题。设计了一种基于双目视觉定位技术的船模航迹跟踪控制系统。结合实验场地和实验对象, 通过在船模上布置特征物、图像预处理、图像位置特征提取、关键点快速准确匹配等流程, 实现了基于双目视觉系统的船模航向和位置估计。船模定航向控制实验和航迹跟踪控制实验表明, 双目视觉定位系统的位置与方向测量精度高、响应快, 且基于该系统的辅助船舶航迹跟踪控制系统精度高, 稳定可靠。应用双目视觉技术实现了在室内对船模的高精度定位, 并成功应用于室内船舶轨迹追踪实验。

关键词: 双目视觉; 室内定位; 模型实验; 航迹跟踪; 运动控制

中图分类号: U664.82

文献标识码: TP391.41

文章编号: 2096-5915(2022)01-43-08

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.005

Indoor Model Experiment of Unmanned Ship Track Tracking Control Based on Binocular Visual Positioning Technology

LEI Jie^{1,2}, XU Wenhua², XU Guodong², LI Mingjue²

(1. Chongqing Qianwei Science & Technology Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China;

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The heading control and track tracking control system of surface unmanned system is generally debugged and operated in indoor environment during the research and development stage, and the research needs the assistance of the positioning system. The positioning technology commonly used in real ships is difficult to work indoors. Existing indoor positioning technologies are expensive and the signal is unstable. This paper designs a ship model track tracking control system based on binocular vision positioning technology. Combining the experimental site and experimental objects, the features on the ship model are arranged. We design the image preprocessing process, extract the position features from the image species, and realize the fast and accurate matching of key points. The binocular vision positioning system measures the position and direction with high accuracy and response fast. The experiments of ship model heading control and track tracking control show that the track tracking control system aided by binocular vision positioning technology has high precision and stability. In this paper, binocular vision technology is used to realize the high-precision positioning of ship model indoors, and has been successfully applied to the indoor ship trajectory tracking experiment.

Key words: Binocular Vision; Indoor Positioning; Model Experiment; Track Tracking; Motion Control

1 引言

海洋的开发利用与货物运输一般依靠水面航行器。得益于传感器技术与无人技术的发展,船舶逐渐向智能化方向发展。通过集成运动控制系统自动跟踪预设航迹,实现无人驾驶是智能化的首要目标。室内的模型实验是研究船舶航迹跟踪控制系统的重要手段,但船舶的运动控制需要定位系统进行辅助。实船上通常使用的GPS定位系统与声定位系统在室内不能有效地实现定位与跟踪。因此,船舶航迹跟踪控制的室内模型实验需要采用合适的室内定位技术。

当前已有的室内定位技术多通过硬件设备实现,包括红外线定位技术、Wi-Fi定位技术以及超声波定位技术等。这些定位技术由信号发射器和信号接收器配合实现^[1-6]。提前将多个信号接收器布置在室内场景下,信号发射器安装在目标物上随物体运动并定时向外发射固定信号,在多个接收器接收到信号后根据多边测量原理计算目标物的实时坐标。由于布置多个信号接收器,造价以及功耗导致这些定位技术的成本较高。此外,信号容易发生遮挡、折射与衰减,信号传播极易受到场地环境的影响。

双目视觉定位技术是近年来比较热门的定位技术,已经被应用到多个领域,如火星探测器^[7]、无人驾驶汽车^[8]等,同时它在室内场景下有很强的适用性,比如餐厅的服务机器人可以通过双目视觉技术,将餐品准确送到目标桌号^[9]。双目视觉定位技术是一种基于三角测距原理的定位技术,通过一组固定且各项参数信息已知的摄像机拍摄物体图像,配合电脑程序实现目标的定位^[10]。相较于常规的室内定位技术,双目视觉定位技术成本较低,定位精度高。双目视觉技术的处理对象是摄像机拍摄的图像,信息保留较好,位置信息反馈快,定位结果的可信度高。本文采用双目视觉定位技术,应用到船模室内航迹跟踪控制实验中。实验表明,该方法实用可靠、稳定性好。

2 双目视觉定位技术原理与室内船模定位系统

2.1 双目视觉技术原理

一般情况下,双目视觉定位系统使用平行双目模式,两台摄像机的光轴平行,成像平面共面并且水平高度一致,光心之间的连线平行于成像平面^[11],具体模型如图1所示。图中, O_l 和 O_r 是左右摄像机的光心, Z_l 和 Z_r 轴是两个摄像机的光轴, A 和 B 是两个空间点,点 A 距离成像平面较远,它们在两个成像平面上的投影是 A_l 和 A_r 以及 B_l 和 B_r 。由图可知,空间点在左右成像平面上的投影点的横坐标存在偏差,在双目视觉系统中,这个偏差叫做视差,通常用 d 表示^[11-14]。可以发现,点 A 的视差 A_lA_r 比点 B 的视差 B_lB_r 要大。

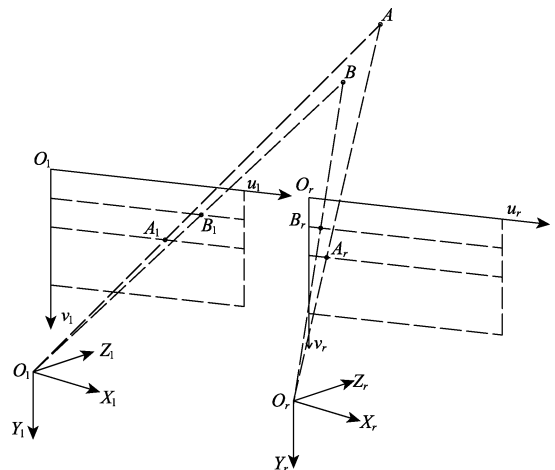


图1 双目视觉模型

Fig. 1 Binocular vision model

为了方便推导空间点坐标与视差之间的具体数学关系,现给出了双目视觉模型的俯视图^[15],如图2所示。其中, O_l 和 O_r 是左右摄像机的光心,线段 O_lO_r 叫做双目视觉系统的基线,长度为 B 。 I_l 和 I_r 代表两个成像平面, C_l 和 C_r 表示两个主点, f 是焦距。点 P 是空间中的一个任意点,与光心平面的距离是 Z ,在左右成像平面上的投影分别为 P_l 和 P_r , d 是点 P 的视差。很显然,在图

2 中, 三角形 PP_lP_r 相似于三角形 PO_lO_r , 所以有:

$$\frac{B-d}{B} = \frac{Z-f}{Z} \quad (1)$$

上式可简化为:

$$Z = f \frac{B}{d} \quad (2)$$

根据方程 (2) 可知, 如果已知摄像机的焦距 f 、基线 B 以及空间点的视差 d , 则可以计算出该点的空间坐标信息。

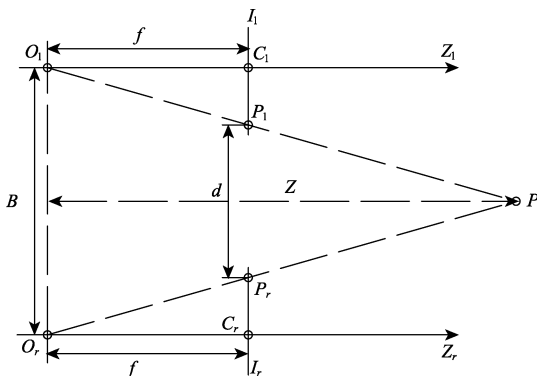


图 2 双目视觉模型俯视图
Fig. 2 Top view of binocular vision model

2.2 双目视觉摄像机图像标定与畸变校正

由双目视觉定位的原理可知, 空间点的坐标计算需要知道摄像机的焦距、基线等参数, 摄像机的出厂铭牌中一般不完全包含。此外, 由于生产装配过程中的误差, 摄像机拍摄的图像存在一定的畸变, 而实际的双目视觉模型通常如图 3 所示。 O_l 和 O_r 是左右摄像机的光心, P_l 和 P_r 为点 P 在不同摄像机成像平面上的位置。通过摄像机标定可以得到摄像机的内、外参数, 以此可将实际模型校正为双目平行模式, 并得到焦距 f 和基线 B 。同时, 摄像机标定还能得到畸变参数, 对图像畸变进行校正。

本文基于张正友标定法^[16]对摄像机进行标定。在标定过程中, 双目摄像机保持不动, 拍摄不同位置下的棋盘格标定板图像, 为了保证标定结果精确, 采集了 70 组共 140 张图像。根据标定结果对左右图像位置和畸变进行校正, 结果如图 4 所示。

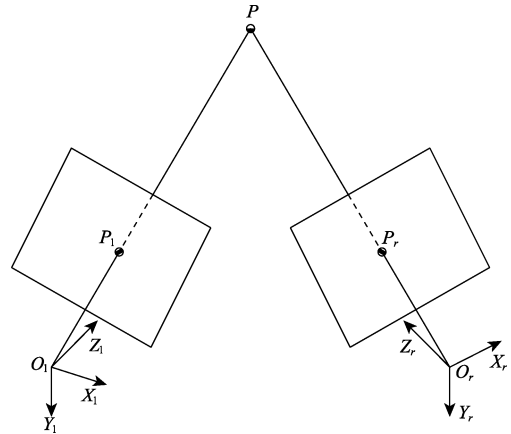


图 3 双目视觉实际模型
Fig. 3 Practical model of binocular vision

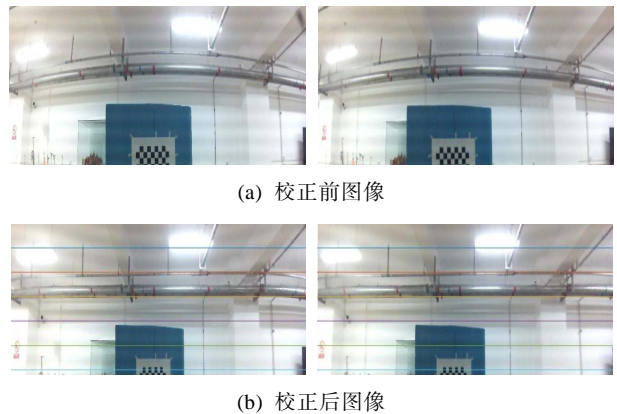


图 4 摄像机标定结果
Fig. 4 Camera calibration result

2.3 室内船模运动定位系统搭建

实验在室内的水池内进行, 主要包含船模、计算机以及双目摄像头等实验设备, 各设备的布置如图 5 所示。

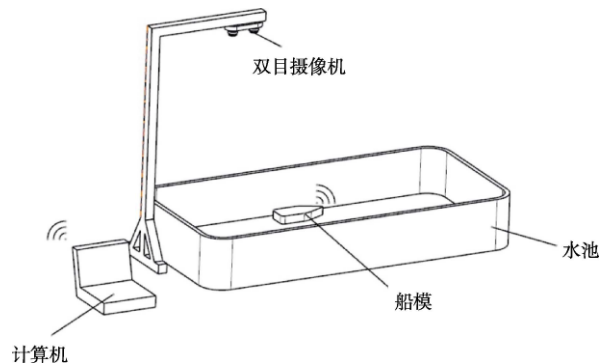


图 5 实验示意图
Fig. 5 Schematic diagram of experiment

实验选用的摄像机为 USB 免驱双目摄像机, 如图 6 所示。摄像机通过一条 USB3.0 接口的数据线与控制电脑主机相连实现图像传输, 帧率最高可达 60 fps, 单个摄像头的分辨率为 1280×720 像素。双目摄像机通过钢材架设在水池上方, 成像平面与水面平行, 在经过图像处理后可得出特征点的三维坐标信息, 成像平面与水面平行可以保证相机有最大的视野范围。由于场地限制, 摄像机与水面距离为 2 m, 摄像机视野中的水池面积约为 2.4 m×1.8 m。

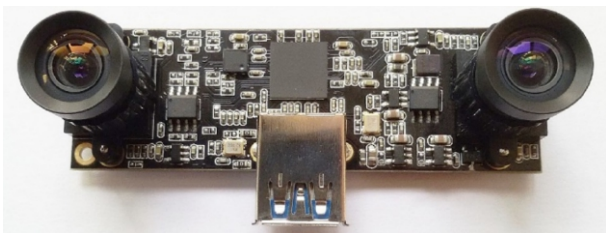
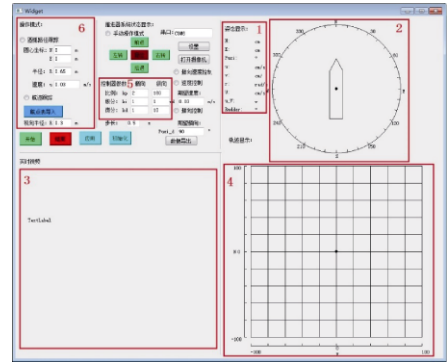


图 6 双目摄像机
Fig. 6 Binocular camera

船模定位系统采用无线控制模式。由 Arduino 2560 开发板、HC-05 蓝牙模块、直流电机、L298N 电机驱动器、舵机、干电池以及船模实现。HC-05 蓝牙模块包含两块, 分别连接在电脑主机和 Arduino 2560 开发板上, 实现信号的无线传输; Arduino 2560 开发板根据 HC-05 蓝牙模块接收的信号控制船模的运动, 一方面直接控制舵机角度, 另一方面采用 PWM 技术通过 L298N 电机驱动器控制直流电机与船模螺旋桨转速, 进而控制船模速度; 船模中所有硬件设备均由干电池供电。

室内定位系统基于 Qt Creator 开发船模运动控制程序。采用视线导向法 (Line of Sight Guidance, LOS)^[17-19]作为船模的航迹跟踪算法, 采用 PID 控制器^[20-21]对船模的推进系统进行控制, 采用帧差法^[22]根据船模在前后两帧上的位置与艏向角计算纵向速度、横向速度和艏向角速度, 依据多帧的位置和艏向角计算纵向加速度、横向加速度和艏向角加速度。程序中关于双目视觉定位的代码均基于 OpenCV 2.4 计算机视觉库, 程序界面及工作模块如图 7 所示。



1. 参数模块
2. 姿态显示模块
3. 实时图像模块
4. 航迹显示模块
5. 控制器参数模块
6. 航迹设置模块

图 7 船模运动控制程序
Fig. 7 Ship model motion control program

2.4 图像预处理与定位

确定空间点三维坐标的前提是准确找到该点在左右图像上的投影坐标, 获得视差, 这在双目视觉技术中叫做左右图像匹配。视觉定位部分的流程图如图 8 所示。实验中使用船模重心和纵剖面上一点即可反映船模的位置和朝向。为准确提取上述两点的投影坐标, 实现左右图像的快速匹配, 根据实验水池背景为蓝色这一特征, 在船模的重心以及纵剖面上粘贴大小不同的白色剪纸, 作为图像匹配的特征物, 如图 9 所示。

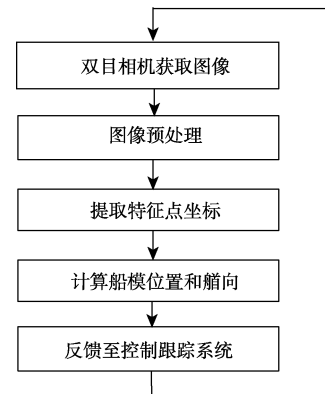


图 8 视觉定位部分流程图
Fig. 8 Flow chart of visual positioning

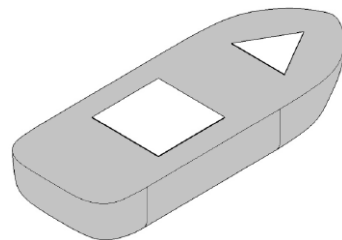


图 9 船模特征物布置示意图
Fig. 9 Layout of ship model features

特征物仅占据了摄像机采集图像的极小部分,其余图像均为干扰。为快速从图中提取特征物,提前对图像进行了预处理,将图像中的干扰区域完全剔除掉。由于特征物是依据颜色选择的,图像预处理的主要方法和步骤均围绕颜色特征设计,具体的处理过程为:(1)图像灰度化;(2)图像滤波去噪;(3)图像二值化;(4)形态学处理。具体处理结果如图 10 所示,从图 10(a)与图 10(e)可以看出,图中的干扰区域已经完全剔除,设置在船模上的特征物被准确地保留下来。

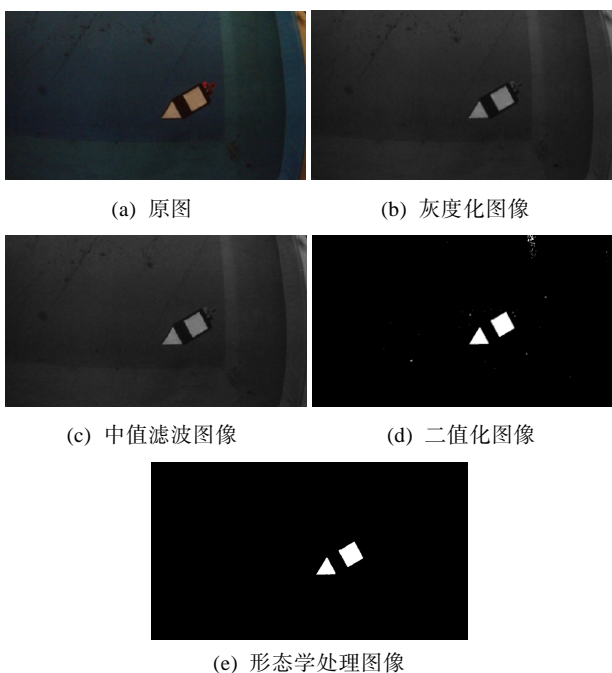
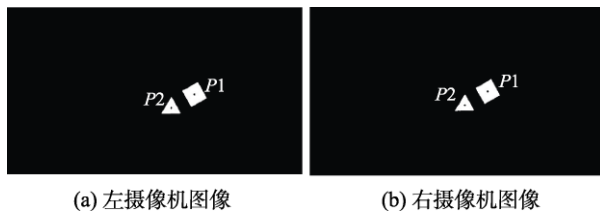


图 10 图像预处理

Fig. 10 Image preprocessing

以两个特征物区域的面积大小作为判别依据,可区分出不同的点,并实现左右图像的匹配。设正方形区域形心点为 P_1 ,三角形区域形心点为 P_2 ,程序的匹配结果如图 11 所示。从最终的匹配结果来看,程序成功提取了船模特征物,并根据船模特征物大小对其进行识别,实现了左右船模图像中同一像素点之间的匹配。在本系统中,方形中心 P_1 为船体重心位置,视为船模位置坐标;三角形中心 P_2 为船艏位置,通过 P_1 、 P_2 点坐标,即可算出艏向角,从而得到船舶模型相应的位置与艏向角信息。



(a) 左摄像机图像

(b) 右摄像机图像

图 11 左右图像匹配结果

Fig. 11 Image matching results

3 室内船模航迹跟踪控制实验

3.1 双目视觉定位验证与误差分析

在开展船模运动与定位之前,测试所设计的双目视觉定位系统的精度。

双目视觉定位的基础原理是提取特征物的形心坐标,通过计算得出目标的相关姿态信息。上节中所使用的三角形及方形特征物,本质上是为了依靠不同形状物体的特征面积区分不同点的坐标信息,得到模型的位置与艏向。因此,为了测试定位精度,本节使用圆形(形心即圆心)进行精度的测量。

使用 3D 打印技术制作两个大小不同的白色圆形薄片,较小圆的圆心固定在直尺 0 刻度位置,较大圆的圆心固定在 600mm 刻度位置,即两圆心之间的距离为 600mm,如图 12 所示。为保证误差分析结果有效可靠,将带有两圆的标尺摆放在摄像头视线范围内的不同位置进行测量,测得两个圆心的平面坐标并计算圆心之间的距离,对比分析定位系统的视觉图像测量精度。误差分析以及后续的定位工作中需要根据坐标系统确定关键点的具体坐标值。在本实验中,以图像的正中心为坐标原点,水平向右为 X 轴正向,竖直向上



图 12 测量物体

Fig. 12 Measuring object

为 Y 轴正向。此外,在后续计算船模的艏向角时,以 Y 轴正向为 0° ,顺时针递增至 360° 。

摄像机捕捉图像与圆心提取结果如图 13 所示,具体测得的圆心平面坐标和误差值见表 1。由表 1 可知,当前设计的双目视觉定位系统测量

的长度最小误差为 0.68%,最大误差为 2.29%。

实际测量数据表明,双目视觉获得的位置精度高,完全可以满足室内实验的精度要求。分析发现标尺在图像中心区域的误差最小,在视线边缘区域的误差较大。

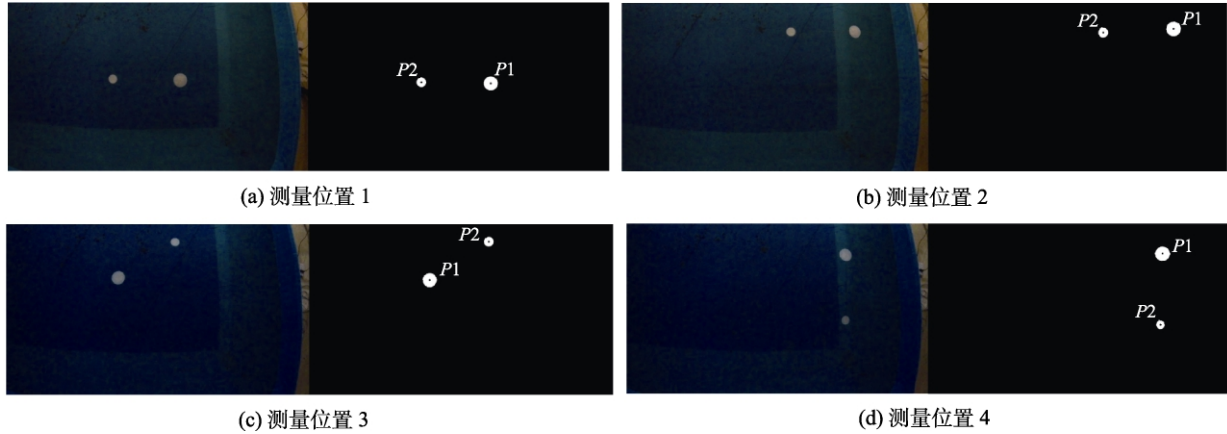


图 13 不同位置的拍摄图像及其圆心提取结果(左侧图像为摄像机拍摄原图,右侧图像为实现图像匹配后的图像)
Fig. 13 Captured images at different positions and their circle center extraction results(The left image is the original image taken by the camera, and the right image is the image after image matching)

表 1 圆心空间坐标与误差值
Table 1 Spatial coordinates and error values of circle center

图片序号	$P1$ 坐标/mm	$P2$ 坐标/mm	距离/mm	绝对误差/mm	百分比/%
1	(204.75,-152.21,1718.37)	(-389.80, -112.46,1720.19)	595.88	4.12	0.69
2	(193.20,62.16,1712.62)	(-402.40,73.22,1717.31)	595.72	4.28	0.71
3	(485.26,362.21,1732.85)	(-121.60,383.29,1724.24)	607.29	7.29	1.22
4	(751.68,546.66,1736.46)	(139.11,509.88,1727.19)	613.75	13.75	2.29
5	(535.88,-434.72,1725.94)	(168.37,34.36,1719.47)	595.94	4.06	0.68
6	(-354.45,284.78,1727.71)	(153.73,620.52,1743.46)	609.28	9.28	1.55
7	(635.87,506.44,1737.89)	(610.79, -103.56,1723.52)	610.69	10.69	1.78

3.2 船模定艏向控制实验

对船模的航速与艏向角速度不做限制,进行船模的定艏向控制实验。实验中图像竖直向上方向为 0° 方向,角度顺时针增加。船模的航行轨迹如图 14 所示。为保证足够的运动时长,初始时刻船模均静置在靠近摄像机视野边界的位置。图 14 (a) 为目标艏向角为 60° 的船模运动轨迹图,初始时刻船模的艏向角为 90° ; 图 14 (b) 为目标艏向角为 270° 的船模运动轨迹图,初始时刻船模的艏向角为 0° 。从船模的实际航行轨迹来看,船艏最终都转向了设计航向,达到了控制目标。

3.3 船模航迹跟踪控制实验

航迹跟踪控制主要使用 PID 控制器结合 LOS 算法对船模的航向角进行控制,对船模的航行速度不做要求。航迹的设计主要通过设置航迹点坐标实现。设置若干数量的航迹点,再使用直线将航迹点依次连接即可得到设计航迹。本文设计了航迹点数分别为 3 点和 6 点的两种航迹,控制船模对其进行跟踪,具体的实验结果如图 15 所示。图中黑色虚线为设计航迹,黑色实线为船模的实际航迹,红色虚线为路径点的切换圆。切换圆以航迹点为圆心,一定数值为半径,当船模跟踪航

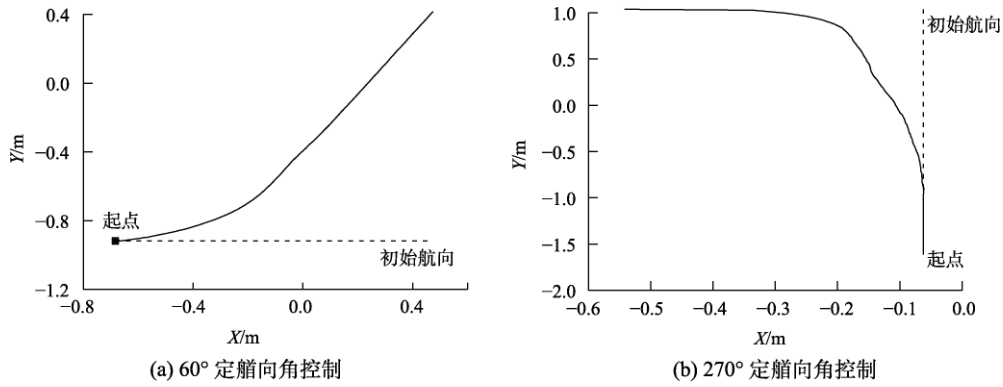


图 14 定艏向控制实验

Fig. 14 Fixed heading control experiment

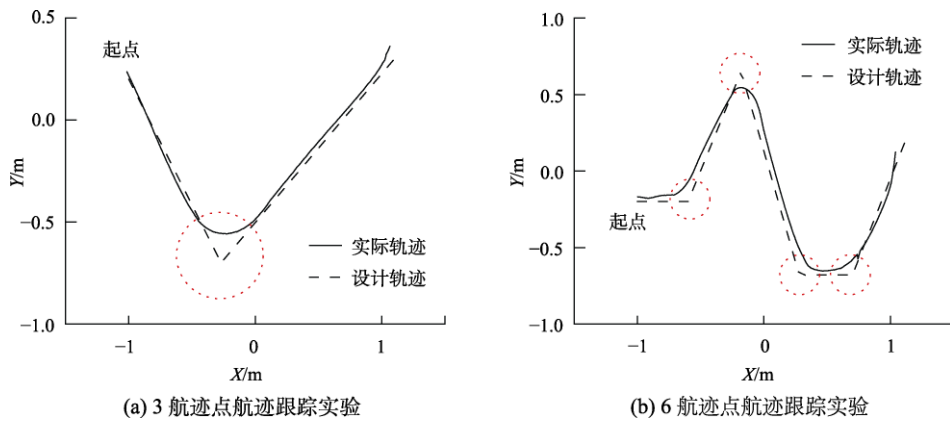


图 15 航迹跟踪控制实验

Fig. 15 Track tracking control experiment

迹点行驶至切换圆内, 船模自动按顺序跟踪下一个航迹点。在本实验中, 3 航迹点跟踪实验的切换圆半径为 0.2 m, 6 航迹点跟踪实验的切换圆半径为 0.1 m。

从图 15 可以看出, 船模实现了对预设航迹的稳定跟踪, 证明本文设计的双目视觉定位系统在响应速度和定位精度上都能够满足室内船舶航迹跟踪控制系统设计的要求。

4 结 论

室内模型实验是研究船舶航迹跟踪控制系统的重要手段, 针对实船常用定位技术无法在室内环境下使用的难点, 本文提出将双目视觉技术作为定位工具, 向控制系统实时反馈船模的位置信息, 辅助船舶航迹跟踪控制的室内模型研究。从船模的位置跟踪与航迹控制实验结果看, 设计的

控制系统对船模的控制效果达到了预期目标, 双目视觉定位系统在船模航迹跟踪控制的室内模型研究中可行、可靠。

在实验过程中, 图像的预处理方法及流程仅考虑了颜色特征, 处理结果受环境影响较大, 进一步研究还可以考虑在不预设目标颜色和形状等特征的室外更加复杂的情况, 以满足更多应用。当前采用双目摄像机分辨率较低, 采用高分辨率相机可提供更高精度的位置信息。

5 展 望

本文所使用双目视觉定位技术, 其基本原理是通过提取特征图形的三维坐标信息, 计算并得出相关的姿态信息, 以进行后续操作。实验水池背景色较为单一, 因此该方法可以用于水池实验环境中。目前, 双目视觉技术还处于发展阶段,

通过规则标记物定位所得出的坐标精度更高。对于复杂环境,该双目视觉定位技术在今后的发展中可进行相应的改进,如可通过与深度学习结合,使用卷积神经网络与图像处理相结合的方式定位,便可不需通过特征物直接将被测物体识别出来,实现对无明显标记点的无人船进行姿态的提取,这将大大提高该双目视觉定位技术的应用范围。

参 考 文 献

- [1] 周慧. 基于 WiFi 的室内定位技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [2] 武涛. 基于 WiFi 和蓝牙融合的室内定位算法的研究[D]. 安徽: 安徽工程大学, 2019.
- [3] 余扬, 赵凯飞, 沈嘉. 室内定位技术应用、研究现状及展望[J]. 电信网技术, 2014(5): 46-49.
- [4] 孙大洋, 章荣炜, 李赞. 室内定位技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 32-46.
- [5] Want R, Hopper A, Gibbons J. The active badge location system[J]. *Acm Transactions on Information Systems*, 1992, 10(1): 91-102.
- [6] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]. *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2000, 2: 775-784.
- [7] Clark F, Habib A, Ming Y, et al. Wide-baseline Stereo Vision for Mars Rovers[C]. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on IRS*, 2003.
- [8] 宁柯琳. 基于双目立体视觉的三维重建平台研究与实现[M]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [9] 于清晓. 轮式餐厅服务机器人移动定位技术研究[M]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [10] 杨芳. 基于 OpenCV 的双目视觉系统目标定位与测距方法研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2018.
- [11] 姜映舟. 基于计算机视觉的测距技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
- [12] Marr D. *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. MIT Press[J]. Cambridge, Massachusetts, 1982.
- [13] 仲伟波, 姚旭洋, 冯友兵, 等. 双目区域视差快速计算及测距算法[J]. *中国图象图形学报*, 2019, 24(9): 1537-1545.
- [14] 姚旭洋. 基于双目视觉的水上目标测距与识别算法研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2019.
- [15] 宋子豪. 基于双目视觉的汽车测距避障和目标识别研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [16] 马颂德, 张正友. *计算机视觉: 计算理论与算法基础*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 程浪. 船舶动力定位非线性模型预测控制研究[D]. 江苏: 江苏科技大学, 2016.
- [18] 钱小斌. 船舶动力定位非线性模型预测控制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [19] Fossen T I, Breivik M, Skjetne R. Line-of-sight path following of underactuated marine craft[C]. *Proceedings of the 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Girona, Spain, 2003, 244-249.
- [20] 傅康, 桑华希. PID 控制器优化的船舶航迹跟踪控制[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(12): 31-33.
- [21] 谢芃. 基于 PID 控制算法的考虑推进器失效的动力定位船舶运动预报研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [22] 潘雨坤. 基于双目立体视觉的运动目标检测系统设计与实现[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.

作者简介:



雷洁(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞行器运动控制与决策。



徐文华(1991-)男, 博士研究生, 主要研究方向为仿生流体动力学与智能流动控制技术。



许国冬(1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为仿生水动力学理论与仿生技术。本文通信作者。



李明爵(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶运动控制与定位技术。

[引用格式] 李 可, 宋志斌, 刘骁锋, 等. 海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划研究[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 51-59.

海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划研究

李 可, 宋志斌, 刘骁锋, 翟子正, 李相杰, 徐培鸿

(哈尔滨工程大学水下机器人技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 无人水面航行器在航行过程中受到尺寸限制, 只能携带有限的能源, 而海洋中蕴含大量的能源, 如果无人水面航行器在航行过程中能利用广泛分布的海洋能源, 那么其续航能力将会显著提升。研究一种海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划方法, 使海洋能驱动航行器在航行过程中尽可能少地消耗能源, 并尽可能多地利用海洋能。首先, 选取我国南海部分海域作为研究对象, 构建栅格地图环境模型。其次, 针对海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划中的能源消耗问题, 建立海流消耗模型, 引用考虑海流消耗的能源最优 A*算法(C-A*); 然后, 针对海洋能驱动航行器能源最优航迹规划中的海洋能利用问题, 建立风能捕获模型, 研究考虑海流消耗和海洋能捕获的能源最优 A*算法(N-A*)。最后, 利用仿真软件验证算法的效果, 通过对不同环境状况下, 传统 A*算法、C-A*、N-A*的能源消耗情况进行对比, 验证算法的可行性与有效性。

关键词: 海洋能驱动航行器; 能源最优; 海洋能捕获; 航迹规划; A*算法

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2022)01-51-09

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.006

Optimal Energy Path Planning for Oceanic Energy-driven Vehicle

LI Ke, SONG Zhibin, LIU Xiaofeng, ZHAI Zizheng, LI Xiangjie, XU Peihong

(Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Unmanned surface vehicle (USV) is limited in size during navigation and only can carry a little energy, and the ocean contains a lot of natural energy. If the USV can use the oceanic energy in the ocean during navigation, its endurance will be greatly improved. This thesis studies an optimal energy path planning method for oceanic energy-driven vehicle, so that oceanic energy-driven vehicle consume as little energy as possible during navigation and use oceanic energy in the ocean as much as possible. The thesis first selected part of the South Sea as the research object to construct a grid map environment model. Secondly, in view of the energy consumption problem in the optimal energy path planning of oceanic energy-driven vehicle, the ocean current consumption model were established, and the A* Algorithm Considering Current Consumption (C-A*) is adopted. Then, in view of the ocean energy utilization problem in the energy optimal trajectory planning of ocean energy-driven aircraft, a wind energy capture model is established to study the energy optimal A* algorithm (N-A*) considering ocean current consumption and ocean energy capture. Finally, the simulation software is used to verify the effect of the algorithm, and the feasibility and effectiveness of the algorithm are verified by comparing the optimal energy effects of the traditional A* algorithm, C-A* and N-A* under different environmental conditions.

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(52071097, 51779052); 黑龙江省优秀青年科学基金(YQ2020E026)

Key words: Oceanic Energy-driven Vehicle; Optimal Energy; Oceanic Energy Capture; Path Planning; A* Algorithm

1 引言

近年来,随着无人水面航行器技术不断向自主化、智能化、大范围、长续航的方向发展,常规无人水面航行器由于自身能源不足,续航力有限的问题日益凸显,而海洋中蕴含着大量的能源,包括海洋自身的潮汐能、波浪能、温差能和盐差能等,还包括海洋上空的风能、太阳能以及海水中的生物质能。如何利用海洋中的能源来增加无人水面航行器的续航力已经成为无人水面航行器研究中的热点问题。

目前,无人水面航行器对海洋能源的利用方式主要有两种:一种是通过安装驱动装置,如波浪翼板、风帆等,将海洋清洁能源直接作为推力使用;另一种是通过安装海洋能源捕获设备,如风力发电机、太阳能电池板,将海洋中的海洋能源转换为其他形式的能源并储存起来,待需要时再提供给动力系统,这两种无人水面航行器可以统称为海洋能驱动航行器。

海洋能驱动航行器在执行任务时选择的航行路径直接影响着其能源消耗量和海洋能捕获量,路径的优劣也直接决定了海洋能驱动航行器续航力的高低。

2011年,庄佳园等^[1]为解决无人水面航行器全局航迹规划问题,提出一种基于电子海图的距离寻优 Dijkstra 算法。该算法使用动态网格模型,克服了传统 Dijkstra 算法占用内存大的问题,可以减少规划时间,提高规划精度。2016年, Niu 等^[2]为了提高无人水面航行器的续航能力,开发了一种全局节能航迹规划算法。该算法集成了 Voronoi 图、可见性算法和 Dijkstra 搜索算法,并且考虑了海流数据,通过仿真试验分析了无人水面航行器在不同任务场景下的节能效果。2019年,贾知浩^[3]为解决无人水面航行器在海流影响下的续航问题,提出一种考虑海流影响的节能航迹规划算法 C-A*(A* Algorithm Considering Cur-

rent Consumption, C-A*)。2019年,姚鹏等^[4]为解决海洋环境下水下机器人的路径规划问题,提出一种基于最小一致性的路径规划算法。该算法能够有效减少水下机器人的能源消耗并提高路径平滑度。2019年,为解决人工势场路径规划问题中的局部最小值和目标不可到达问题,成昌巍等^[5]提出一种基于动态窗口法的改进策略,改进后的人工势场法能够有效地使机器人逃离局部极小点并到达目标点。2020年,为解决无人机路径规划算法无法兼顾路径质量和计算效率的问题,王延祥等^[6]提出一种基于扰动流场和深度神经网络的无人机自适应路径规划算法,该算法在保证路径质量的同时,有效减少了计算开销。

上述算法均为经典的无人飞行器航迹规划算法。近年来, PSO 算法和 GA 算法等仿生智能算法也被广泛地应用于无人飞行器的航迹规划^[7-9]。2018年6月,冯辉等^[10]为达到在实际水流环境中减小无人水面航行器的能耗和保证无人水面航行器安全的目标,提出一种自适应混合粒子群(AHPSO)算法用于无人水面航行器的全局航迹规划。该方法根据海流中无人水面航行器航迹能耗等因素,建立多目标优化方程。针对粒子群算法早熟收敛等问题,采用自适应原理改变惯性权重和加速系数,有效提高了算法的寻优速度和精度。

可以看出,全局路径规划研究取得了较多进展,并且其逐渐由以路径最短为标准转变成以能耗最小为标准,由恒定不变的海洋因素条件转变为随时空变化的海洋因素。海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划应当考虑的问题包含以下内容。

(1) 对海洋能的捕获问题。伴随无人水面航行器技术研究的深入,为提高续航力,部分无人水面航行器逐渐由常规动力向海洋能驱动转变。目前的全局路径规划问题研究重点放在控制和规划层面,这就意味着很有必要考虑海洋能能量捕获问题。

(2) 阻力导致的航行能耗问题。当下,大部

分全局路径规划方法都把路径最短视为标准, 较少涉及能耗问题, 这就引起无人水面航行器路径搜寻时不可避免地加大能量消耗, 特别是海洋能驱动航行器将会损耗更多的能量在航行过程中, 而这直接关联到其续航能力。

本文基于 A*算法, 研究海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划问题, 通过分析海洋能驱动航行器航行过程中能源消耗的主要因素, 建立海流能源消耗模型; 通过分析海洋能驱动航行器航行过程中能够利用的海洋资源, 建立风能捕获模型; 改进 A*算法, 力求保证海洋能驱动航行器在到达目标点的同时, 尽量少地消耗能源, 尽量多地捕获海洋能源, 提高海洋能驱动航行器的续航能力。

2 A*算法原理和地图模型的建立

A*算法的实现需要首先建立栅格地图模型。本文选取我国南海部分地区的实际海域作为研究对象构建地图, 采用栅格法构建栅格地图模型, 如图 1 所示。

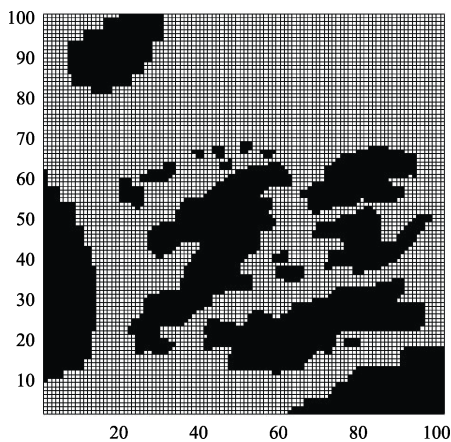


图 1 栅格地图模型

Fig. 1 Grid map model

为了使仿真试验的对比效果更显著, 将海流的流向设置为以地图中线做分割, 左侧流向 90° 方向(正北方向), 右侧流向 -90° 方向(正南方向); 将风场的流向设置为以地图中线做分割, 上侧流向 180° 方向(正西方向), 下侧流向 0° 方向(正东方向)。风速设置为 14 m/s 。

栅格地图的尺寸为 100×100 (相邻网格之间

单位距离取为 1 km), 透明方格表示无人水面航行器可以航行的海域, 黑色方格表示陆地、岛屿或者其他障碍物范围。起点位置为(4,4), 终点节点位置(96,20), 相邻网格之间单位距离取为 1 km 。

A*算法是一种经典的路径规划方法, 它主要结合了 Dijkstra 搜索算法^[11]与 BFS 算法^[12]的优点, 回避了 Dijkstra 搜索算法扩展节点过多、运行速度过慢和 BFS 算法无法得到最优路径的缺点, 能够在较短的运行时间内得到最优的路径^[13]。A*算法主要引入了寻优函数、消耗函数和启发函数, 可以根据用户的需要对寻优函数、消耗函数、启发函数进行调整, 从而得到不同的目标路径。

不同的 A*算法有着不同的寻优函数、消耗函数和启发函数。本文引入曼哈顿距离与对角线距离研究 A*算法的寻优函数。曼哈顿距离^[14]即直线距离, 在本文中是指从当前节点移到目标节点的水平距离和竖直距离之和。

对角线距离^[15]是指在曼哈顿距离的基础上, 将对角线节点加入了 A*算法的节点集合, 即海洋能驱动航行器除了沿水平和垂直方向运动外, 也可以沿东北、西北、东南、西南方向运动, 基于对角线距离设计的寻优函数:

$$\text{astar_fun}(p_{\text{start}}, p_{\text{cur}}) = c \times (\text{Diagonal}(p_{\text{start}}, p_{\text{cur}}) + \text{Diagonal}(p_{\text{cur}}, p_{\text{aim}})) \quad (1)$$

式中, c 表示从一个节点移动到某一个相邻节点的消耗, 可以是距离消耗, 也可以是能源消耗等; $\text{Diagonal}(p_1, p_2)$ 表示从节点 p_1 移动到节点 p_2 的对角线距离, 具体计算方法为:

$$\text{Diagonal}(x, y) = \min(\text{Manhattan}_x(x, y) + \text{Manhattan}_y(x, y)) \cdot (\sqrt{2}-2) + \text{Manhattan}(x, y) \quad (2)$$

式中, $\text{Manhattan}_x(x, y)$ 表示节点 x 到节点 y 之间沿 X 轴方向的曼哈顿距离, $\text{Manhattan}_y(x, y)$ 表示节点 x 到节点 y 之间沿 Y 轴方向的曼哈顿距离。对角线距离的引入, 使 A*算法在进行路径规划时可沿对角线的方向进行搜索。

3 能源消耗模型和捕获模型构建

本文选取某型号海洋能驱动航行器作为研究

平台,如图 2 所示。本章的研究内容集中于海洋能驱动航行器能源消耗模型和能源捕获模型的建立。考虑海流对海洋能驱动航行器航行过程中能源消耗的影响,建立海洋能驱动航行器在海流影响下的能源消耗模型^[16-17],如式(4)所示;在海洋能驱动航行器的海洋能源利用方面,考虑风的影响,建立风能捕获模型,如式(6)所示。



图 2 海洋能驱动航行器

Fig. 2 Oceanic energy-driven vehicle

在网格地图的航行过程中,假设海洋能驱动航行器从节点 n 移动到节点 n' ,海流相对于大地的速度矢量用 \mathbf{v}_{c2e} 表示,海洋能驱动航行器相对于大地的速度矢量用 \mathbf{v}_{u2e} 表示,海洋能驱动航行器相对于海流的速度矢量用 \mathbf{v}_{u2c} 表示,三者的速度矢量用下式表示:

$$\mathbf{v}_{u2e} = \mathbf{v}_{u2c} + \mathbf{v}_{c2e} \quad (3)$$

根据计算流体力学的相关原理和公式^[18],海洋能驱动航行器的能源消耗量 E 可以通过下式计算:

$$\begin{aligned} E &= |\mathbf{v}_{u2c}| \cdot \alpha \cdot |\mathbf{v}_{u2c}|^2 \cdot \frac{|n \times n'|}{|\mathbf{v}_{u2e}|} = \alpha \cdot |\mathbf{v}_{u2c}|^3 \cdot \frac{|n \times n'|}{|\mathbf{v}_{u2e}|} \\ &= \alpha \cdot |\mathbf{v}_{u2c}|^3 \cdot \frac{|n \times n'|}{|\mathbf{v}_{u2c} + \mathbf{v}_{c2e}|} \end{aligned} \quad (4)$$

当已知海洋能驱动航行器的航行路径,海洋能驱动航行器与海流之间的相对速度 \mathbf{v}_{u2c} 和海流流速 \mathbf{v}_{c2e} 时,可根据式(3)和式(4)计算出该路径的能量消耗量。

考虑海洋能驱动航行器在航行过程中捕获的海洋能问题,本文建立风能捕获模型,其中, \mathbf{v}_{w2e}

表示风相对地球的速度矢量,海洋能驱动航行器相对于风的速度矢量用 \mathbf{v}_{u2w} 表示,二者的速度矢量用下式表示:

$$\mathbf{v}_{u2e} = \mathbf{v}_{u2w} + \mathbf{v}_{w2e} \quad (5)$$

计算风的能量需要用到风能密度公式^[19]:

$$E_2 = 0.5 \cdot \rho \cdot t \cdot S \cdot \mathbf{v}_{u2w}^2 \quad (6)$$

式中, E_2 表示为风能密度; S 表示风所流经的横截面面积,一般表示风力发电机风轮所掠过的面积; \mathbf{v}_{u2w} 表示海洋能驱动航行器相对于风的速度; ρ 表示空气密度; t 表示风流经海洋能驱动航行器上风力发电机风轮的时间。

当已知海洋能驱动航行器的航行路径,海洋能驱动航行器与地球之间的相对速度 \mathbf{v}_{u2e} 和风速 \mathbf{v}_{w2e} 时,可根据上述公式计算出该路径的风能捕获量。

4 改进 A*算法能源最优航迹规划

基于第 3 节介绍的海流消耗模型和风能捕获模型,改进 A*算法,设计考虑海流消耗和海洋能捕获的能源最优 A*算法(N-A*),N-A*的寻优函数表示为 $E_{star_fun 2}$ 。海洋能驱动航行器航行过程中产生的能源消耗:

$$\begin{aligned} E_{star_fun 2}(p_{start}, p_{cur}) &= \mu \cdot E_{star_cost 2}(p_{start}, p_{cur}) \\ &+ \nu \cdot E_{star_heuristic 2}(p_{cur}, p_{aim}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $E_{star_cost 2}(p_{start}, p_{cur})$ 表示海洋能驱动航行器从起点航行到当前节点的过程中,海流引起的能源消耗减去风能的捕获量后的总的能源消耗值; $E_{star_heuristic 2}(p_{cur}, p_{aim})$ 表示海洋能驱动航行器从当前节点航行到目标点中,海流引起的能源消耗减去捕获的风能后的总的启发值; μ 和 ν 分别为它们的调节参数,其中 $\mu \geq 0$, $\nu \geq 0$, $\mu + \nu = 1$ 。

本文引入速度堆(以下简称为 U_stack 和 U_stack2)的概念, U_stack 为海洋能驱动航行器相对大地的速度堆, U_stack2 为海洋能驱动航行器相对风的速度堆,其结构均如图 3 所示。

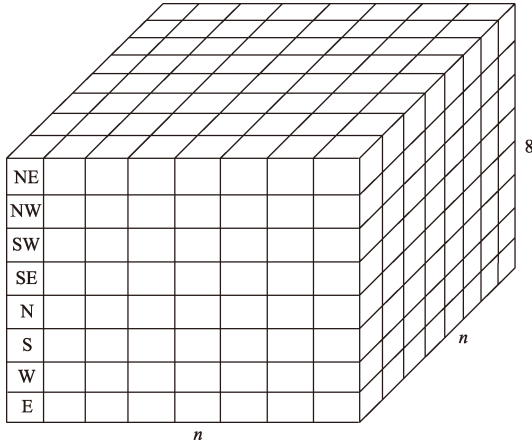


图 3 海洋能驱动航行器速度堆

Fig. 3 Unmanned surface vehicle speed stack

以 U_stack 为例, 从最上层到最下层依次代表在 $n \times n$ 的网格地图上的每个节点海洋能驱动航行器在海流作用下向东北、西北、西南、东南、北、南、西和东 8 个方向行驶时相对于大地的速度 \mathbf{v}_{u2e} , 以此实现全局地图中海洋能驱动航行器不同时速下对能量消耗的估算。

根据上文所述 U_stack 、 U_stack2 对网格中各个节点的可能出现的运动方向设计能源消耗函数, 依次对海洋能驱动航行器当前所在节点 $p_{cur}(x, y)$ 周围的 8 个节点 (x_i, y_i) , 其中 $i \in [1, 8]$, 进行访问, 并在 U_stack 、 U_stack2 中选择对应行、列和层的 \mathbf{v}_{u2e} 、 \mathbf{v}_{u2w} , 利用以下公式分别计算 8 个节点 (x_i, y_i) 的能源消耗, 取其中的最小值作为下一步的能量消耗 $e_{cost2}(x, y)$, 其中变量 d 用来表示网格中两个相邻节点之间的单步代价, 变量 $floor$ 则表示 \mathbf{v}_{u2e} 或 \mathbf{v}_{u2w} 所在的层数。

$$e_{cost2}(x_i, y_i) = \begin{cases} |\mathbf{v}_{u2c}|^3 / |\mathbf{v}_{u2e}| \cdot d - 0.5 \cdot \rho \cdot (d / |\mathbf{v}_{u2e}|) \\ \cdot S \cdot \mathbf{v}_{u2w}^2, & floor=1, 2, 3, 4 \\ |\mathbf{v}_{u2c}|^3 / |\mathbf{v}_{u2e}| \cdot d \cdot \sqrt{2} - 0.5 \cdot \sqrt{2} \cdot \rho \\ \cdot (d / |\mathbf{v}_{u2e}|) \cdot S \cdot \mathbf{v}_{u2w}^2, & floor=5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (8)$$

$$e_{sumcost2}(x, y) = \sum_{j=p_{start}}^{p_{cur}} e_{cost2}(x_j, y_j) + e_{cost2}(x, y) \quad (9)$$

最后通过式(9)计算从起点 p_{start} 到当前节点 p_{cur} 的实际能源消耗 $e_{sumcost2}(x, y)$ 。

为了使启发函数计算的能源消耗量尽可能地接近从当前节点到目标点的实际能源消耗量, 启发函数需要计算启发路径长度: $L_{heu} = D_{heu} + S_{heu}$ 和任一节点 (x_i, y_i) 与目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 之间的相对位置角度 A_{pp} 。

D_{heu} 和 S_{heu} 分别表示从当前节点 $p_{cur}(x, y)$ 周围的 8 个节点 (x_i, y_i) (其中 $i \in [1, 8]$) 到目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 的斜线的距离和直线的距离, 计算公式(10)如下:

$$\begin{cases} D_{heu}(x_i, y_i) = \min(\text{abs}(x_i - x_{goal}), \text{abs}(y_i - y_{goal})) \\ S_{heu}(x_i, y_i) = \text{abs}(x_i - x_{goal}) + \text{abs}(y_i - y_{goal}) \\ -2 \times D_{heu}(x_i, y_i) \end{cases} \quad (10)$$

计算任一节点 (x_i, y_i) 与目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 之间的相对位置角度 A_{pp} , 并根据 A_{pp} 的范围来确定 U_stack 、 U_stack2 中的层数, 具体规则见表 1。

表 1 能源消耗启发函数算法规则表

Table 1 Rule table of energy consumption heuristic function algorithm

相对位置角度 $A_{pp} / (^\circ)$	U_stack 、 U_stack2 层数
0	1
90	4
180	2
-90	3
(0, 90)	8
(90, 180)	7
(-90, 0)	5
(-180, -90)	6

根据 (x_i, y_i) 、 D_{heu} 、 S_{heu} 和 A_{pp} 选择对应的启发路径上速度堆 U_stack 、 U_stack2 中的所有海洋能驱动航行器相对于大地的速度 $\{\mathbf{v}_{u2e}\}$ 、海洋能驱动航行器相对于风的速度 $\{\mathbf{v}_{u2w}\}$ 。接着利用式(11)依次计算从当前节点 $p_{cur}(x, y)$ 的周围 8 个节点 (x_i, y_i) 到目标点 (x_{goal}, y_{goal}) 的启发能源消耗量, 并取最小值作为下一步预估的能源消耗 $e_{heuristic2}(x, y)$ 。

$$e_{\text{heuristic2}}(x_i, y_i) = \begin{cases} |v_{u2c}|^3 \cdot d \cdot \frac{S_{\text{heu}}}{\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2e}|} - 0.5 \cdot d \cdot \rho \cdot \frac{S_{\text{heu}}^2}{\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2e}|} \\ \cdot S \cdot \left(\frac{\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2w}|}{S_{\text{heu}}} \right)^2, \text{ floor}=1,2,3,4 \\ |v_{u2c}|^3 \cdot d \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot D_{\text{heu}} + S_{\text{heu}}}{\sum_1^{D_{\text{heu}}} |v_{u2e}| + \sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2e}|} \right) - 0.5 \cdot d \cdot \rho \\ \cdot \frac{S_{\text{heu}}^2}{\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2e}|} \cdot S \cdot \left(\frac{\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2w}|}{S_{\text{heu}}} \right)^2 - 0.5 \cdot d \cdot \rho \cdot \frac{D_{\text{heu}}^2}{\sum_1^{D_{\text{heu}}} |v_{u2e}|} \\ \cdot S \cdot \left(\frac{\sum_1^{D_{\text{heu}}} |v_{u2w}|}{D_{\text{heu}}} \right)^2, \text{ floor}=5,6,7,8 \end{cases} \quad (11)$$

$$e_{\text{ans2}}(x, y) = \mu \cdot e_{\text{sumcost2}}(x, y) + \nu \cdot e_{\text{heuristic2}}(x, y) \quad (12)$$

式中, $\sum_1^{D_{\text{heu}}} |v_{u2e}|$ 和 $\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2e}|$ 分别表示启发路径的对角线距离和直线距离上每个节点海洋能驱动航行器相对于大地的速度和; $\sum_1^{D_{\text{heu}}} |v_{u2w}|$ 和 $\sum_1^{S_{\text{heu}}} |v_{u2w}|$ 分别表示启发路径的对角线距离和直线距离上每个节点海洋能驱动航行器相对于风的速度和。利用上述公式得到寻优函数 $E_{\text{star_fun2}}$ 的最终结果。

将 $E_{\text{star_fun2}}$ 带入 A* 算法, 得到考虑海流消耗和风能捕获的能量最优 A* 全局规划算法。

5 算法仿真试验与分析

通过在相同海况与相同风场环境下传统 A* 算法, C-A*, N-A* 的能量消耗情况进行对比, 开展仿真实验, 对所提算法的可行性和有效性进行验证。

对于现实海况, 海洋环境并非恒定, 具有不规则不确定的特征。本文研究海洋环境的影响时采用简化模型, 假设海流是均定流, 海风为匀速风, 从而讨论海流和海风对海洋能驱动航行器的能耗作用以及对全局路径规划的影响。

由于现有海洋能驱动航行器研究较少, 经验

公式还不完善, 通过经验公式方法计算海浪干扰力, 不仅方法繁琐复杂, 同时计算的干扰力误差大, 不满足实验要求, 借助流体力学软件 (CFD) 估算也会有较大误差。并且根据文献[20]可以得知若波浪波长超出船长 1.5 倍及以上后, 波浪干扰力会很小。故本文暂不考虑波浪产生的阻力影响。

仿真环境 1: 静水状态风速为 0

传统 A* 算法的结果路径如图 4 所示, C-A*、N-A* 的结果路径如图 5 和图 6 所示。

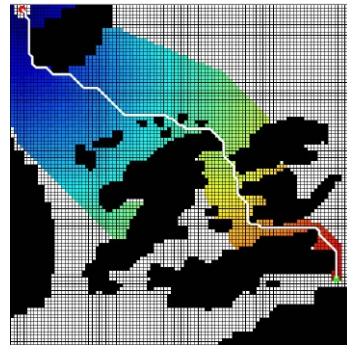


图 4 传统 A* 算法结果

Fig. 4 Traditional A* algorithm results

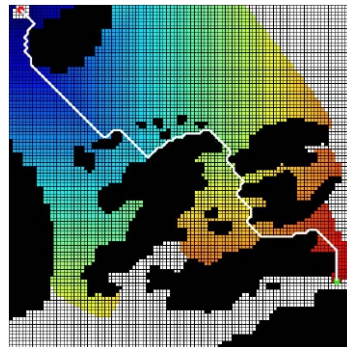


图 5 C-A* 算法结果

Fig. 5 C-A* algorithm results

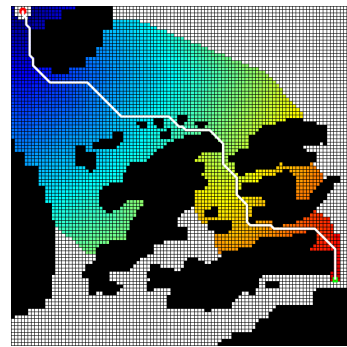


图 6 N-A* 算法结果

Fig. 6 N-A* algorithm results

表 2 静水中的算法对比结果

Table 2 Algorithm comparison results in still water

算法名称	路径长度/km	能源消耗/MJ	消耗比/%
传统 A*	146.98	1115.42	—
C-A*	164.38	1247.45	111.84
N-A*	146.98	1091.62	97.87

算法对比结果见表 2, 可以看出, 在静水情况下 N-A* 的能源消耗要少于传统 A* 算法和 C-A* 算法。由于传统 A* 算法在静水中能够得到最短路径, 所以传统 A* 算法消耗的能量也比较少。另外, 对比 C-A* 与 N-A* 的结果可以发现, N-A* 的能源消耗较少。综上所述, 在静水环境下 N-A* 是能源最优的算法, 传统 A* 算法次之, C-A* 最差。

仿真环境 2: 低流速 0.6m/s, 低风速 6m/s

传统 A* 算法的结果路径同上, C-A*、N-A* 的结果路径如图 7、图 8 所示, 算法对比结果见表 3。

表 3 海流流速 0.6 m/s 中的算法对比结果

Table 3 Algorithm comparison results in ocean current velocity of 0.6 m/s

算法名称	路径长度/km	能源消耗/MJ	消耗比/%
传统 A*	146.98	1600.48	—
C-A*	180.72	1186.04	74.11
N-A*	175.75	1112.28	69.50

从算法对比结果可以看出, 在海流 0.6 m/s 的作用下, N-A* 是能源最优的算法, C-A* 次之, 传统 A* 算法最差。C-A* 相较传统 A* 算法所规划出的路径节约了 25% 的能源消耗; N-A* 相较传统 A* 所规划出的路径节约了 30% 的能源消耗。

仿真环境 3: 高流速 1.2 m/s, 高风速 14m/s

传统 A* 算法的结果路径同上, C-A*、N-A* 的结果路径如图 9、图 10 所示, 算法对比结果见表 4。

从算法对比结果可以看出, 在海流 1.2m/s 的作用下, N-A* 是能源最优的算法, C-A* 次之, 传

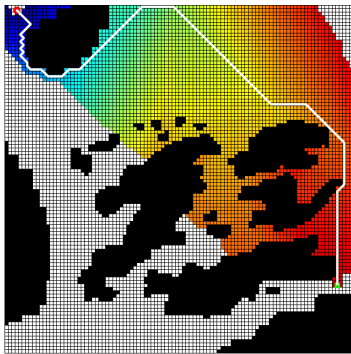


图 7 海流流速 0.6 m/s 中的 C-A* 算法结果
Fig. 7 C-A* algorithm result in sea current flow rate 0.6 m/s

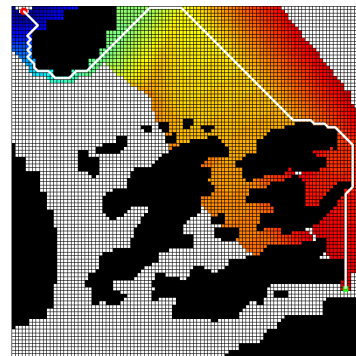


图 9 海流流速 1.2 m/s 中的 C-A* 算法结果
Fig. 9 C-A* algorithm result in sea current flow rate 1.2 m/s

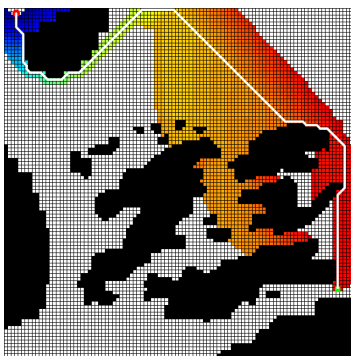


图 8 海流流速 0.6 m/s 中的 N-A* 算法结果
Fig. 8 N-A* algorithm result in sea current flow rate 0.6 m/s

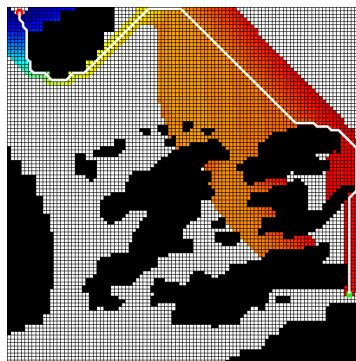


图 10 海流流速 1.2 m/s 中的 N-A* 算法结果
Fig. 10 N-A* algorithm result in sea current flow rate 1.2 m/s

表4 海流流速 1.2 m/s 中的算法对比结果
Table 4 Comparison results of algorithms in ocean current velocity 1.2 m/s

算法名称	路径长度/km	能源消耗/MJ	消耗比/%
传统 A*	146.98	3401.96	—
C-A*	180.72	2258.28	66.38
N-A*	175.75	2145.84	63.08

统 A*算法最差。C-A*相较传统 A*算法所规划出的路径节约了 33%的能源消耗；N-A*相较传统 A*所规划出的路径节约了 37%的能源消耗。

综合以上结果可知，在海流流速不为 0 的情况下，C-A*、N-A*所规划出的路径都要比传统 A*算法所规划出的路径要节约更多的能源，N-A*是能源最优的算法，C-A*次之。而且 C-A*和 N-A*的节能效果会随着海流的增大而增加。此外，就 C-A*而言，虽然其能源消耗情况比 N-A*差，但随着海流的增加，其能源消耗情况在不断地接近 N-A*，所以在实际应用过程中，可以根据具体情况选择算法。

6 结 论

针对于海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划问题，在传统距离寻优的 A*算法基础上，考虑海洋能驱动航行器航行过程中的能源消耗问题和海洋能利用问题，建立考虑海流影响的能源消耗模型和风能捕获模型，对传统 A*算法的消耗函数、启发函数和寻优函数进行改进，完成能源最优 A*算法的研究，并对该算法进行仿真对比验证。主要结论如下。

(1) 针对海洋能驱动航行器的全局路径规划问题，选取我国南海部分海域作为研究对象，采用栅格法，建立栅格地图环境模型。

(2) 利用 A*算法进行路径规划研究。建立考虑海流影响的能源消耗模型和风能捕获模型。根据上述模型，改进 A*算法的消耗函数、启发函数和寻优函数，完成海洋能驱动航行器的能源最优航迹规划研究。

(3) 在不同的环境状况下，对传统 A*算法、C-A*、N-A*进行仿真试验，对比其能源消耗情况，

分析表明，N-A*是能源最优的算法，C-A*次之，传统 A*算法最差。随着流速的增加，C-A*和 N-A*的节能效果在不断增加。

参 考 文 献

- [1] 庄佳园, 万磊, 廖煜雷, 等. 基于电子海图的水面无人艇全局路径规划研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(9): 211-214.
- [2] Niu H, Lu Y, Savvaris A, et al. Efficient path planning algorithms for unmanned surface vehicle[J]. IFAC Papersonline, 2016, 49(23): 121-126.
- [3] 贾知浩. 动态拥挤环境中无人艇自主靠泊方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [4] 姚鹏, 王琨. 基于最小一致性的自治式水下机器人路径规划[J]. 无人系统技术, 2019, 2(4): 8-14.
- [5] 成昌巍, 胡劲文, 王策, 等. 基于改进型人工势场的路径规划方法[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 10-16.
- [6] 王延祥, 王宏伦, 吴健发, 等. 基于流体扰动算法与深度神经网络的无人机自适应路径规划[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 50-58.
- [7] Lolla T, Jr P, Lermusiaux P. Time-optimal path planning in dynamic flows using level set equations: realistic applications[J]. Ocean Dynamics, 2014, 64(10): 1399-1417.
- [8] Alvarez A, Caiti A, Onken R. Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 418-429.
- [9] Kim H, Kim S H, Jeon M, et al. A study on path optimization method of an unmanned surface vehicle under environmental loads using genetic algorithm[J]. Ocean Engineering, 2017, 142(15): 616-624.
- [10] 冯辉, 刘梦佳, 徐海祥. 基于 AHPSO 算法的无人艇多目标路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 59-64.
- [11] 吕太之, 赵春霞, 夏平平. 基于同步可视图构造和 A*算法的全局路径规划[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(3): 313-321.
- [12] 宋久元, 滕国库, 胡丽霞. 路径规划算法的改进及在车载导航中的应用[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(8): 95-98.
- [13] Bentes C, Saotome O. Dynamic swarm formation with potential fields and A* path planning in 3D environment//Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium[C]. New York: IEEE, 2012: 74-78.
- [14] Hanne T, Hanne T, Hanne T, et al. Emotion influenced robotic path planning//International Conference on Intelligent Systems[C]. New York: ACM, 2017: 130-136.
- [15] Aharonian F. Very high energy gamma rays from the direction of Sagittarius A*[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 425(1): 13-17.

- [16] 姜权权, 李可, 廖煜雷, 等. 自然能驱动无人艇融合 TD 滤波的无模型自适应航速控制方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 37-42.
- [17] 王琼. 船舶动力定位系统的优化与控制策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [18] 鲍毅, 许定生. 船舶阻力的相关系数及其应用[J]. 船舶工程, 1996 (6): 27-30.
- [19] 严新平, 徐立, 袁成清. 船舶清洁能源技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [20] 方昭昭, 朱仁传, 缪国平, 等. 基于数值波浪水池的波浪中船舶水动力计算[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(5): 515-524.

作者简介:



李 可 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器路径规划技术。



宋志斌 (1999-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器集群智能技术。本文通信作者。



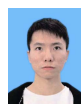
刘骁锋 (1998-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器路径规划与避碰技术。



翟子正 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器自适应控制技术。



李相杰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器路径规划技术。



徐培鸿 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无人水面航行器水动力分析与设计技术。

[引用格式] 徐凯凯, 宋利飞, 史晓骞, 等. 基于雷达数字孪生的水上多目标跟踪方法研究[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 60-68.

基于雷达数字孪生的水上多目标跟踪方法研究

徐凯凯^{1,2}, 宋利飞^{1,2}, 史晓骞^{1,2}, 石正坤^{1,2}, 孙昊^{1,2}

(1. 武汉理工大学高性能船舶技术教育部重点实验室, 武汉 430063;
2. 武汉理工大学船海与能源动力工程学院, 武汉 430063)

摘要: 雷达的采样数据经过多目标跟踪处理后可为无人艇提供障碍状态, 以保障无人艇的安全。对雷达数字孪生的水上多目标跟踪方法进行了研究。首先, 以雷达采样的真实数据为研究对象, 建立雷达观测数据多目标跟踪算法全流程处理策略, 提出了雷达和惯性导航/全球定位组合导航的采样数据的时钟二次同步对准算法; 然后, 建立了雷达数据的起始航迹、暂时航迹、稳定航迹三级动态匹配航迹管理策略; 最后, 基于双向拟合算法进行稳定航迹的降噪, 通过真实采样数据对该算法进行数字孪生仿真测试, 与运用多项式拟合算法进行状态估计的目标跟踪算法进行对比, 验证了该数字孪生策略的有效性和稳定性。

关键词: 多目标跟踪; 雷达数字孪生; 关联门; 航迹管理; 双向拟合算法; 均方根误差; 无人艇
中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5915(2022)01-60-09
DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.007

Research on Water Multi-target Tracking Method Based on Digital Twin of Radar

XU Kaikai^{1,2}, SONG Lifei^{1,2}, SHI Xiaoqian^{1,2}, SHI Zhengkun^{1,2}, SUN Hao^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-Performance Ship Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: After multi-target tracking processing, the sampling data of radar can provide obstacle state for unmanned surface vehicle, so as to ensure the safety of unmanned surface vehicle. A Water multi-target tracking method based on digital twin of radar is studied. Firstly, taking the real data sampled by radar as the research object, the whole process processing strategy of radar observation data multi-target tracking algorithm is established, and the clock secondary synchronous alignment algorithm of radar and inertial navigation/global positioning integrated navigation sampling data is proposed. Then, the three-level dynamic matching track management strategy of radar data, including initial track, temporary track and stable track, is established. Finally, the noise reduction of stable track is carried out based on bidirectional fitting method. The digital twin simulation test of the algorithm is carried out through the real sampling data, and compared with target tracking algorithm using polynomial fitting algorithm for state estimation to verify the effectiveness and stability of the digital twin strategy.

Key words: Multi-target Tracking; Digital Twin of Radar; Associated Gate; Track Management; Bidirectional Fitting Method; Root Mean Square Error; Unmanned Surface Vehicle

1 引言

无人艇 (Unmanned Surface Vessel, USV) 在航行过程中, 可由船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 获取周围部分船舶的准确状态 (位置、速度和航向), 为避碰等运动方式提供信息^[1-2], 然而所遇到的许多障碍并不都配备 AIS, 位置信息一般可由无人艇的雷达直接获得^[3-4], 而速度、方向和航迹等信息需要对雷达采样数据进行多目标跟踪算法处理后获得^[5]。

雷达测得无人艇周围障碍物的距离和方位信息, 惯性导航/全球定位 (Inertial Navigation System/Global Positioning System, INS/GPS) 组合导航测得无人艇的坐标和航向信息。无人艇在实际航行一段时间的雷达探测点如图 1 所示, 从中可以看出存在以下问题。

(1) 雷达和 INS/GPS 组合导航采样数据时钟不同步。图中雷达采样点较为稀疏而 INS/GPS 组合导航采样点较为密集;

(2) 雷达和 INS/GPS 组合导航采样数据参考坐标系不同, 前者为极坐标系, 后者为直角坐标系;

(3) 雷达无法分辨出哪些探测点是真正的障碍或杂波, 即使分辨出真正的障碍, 由于涉及时间维度, 也无法直接得到障碍物的航迹和数量;

(4) 雷达的采样数据是有误差的, 且无法直接探测到机动障碍的状态。

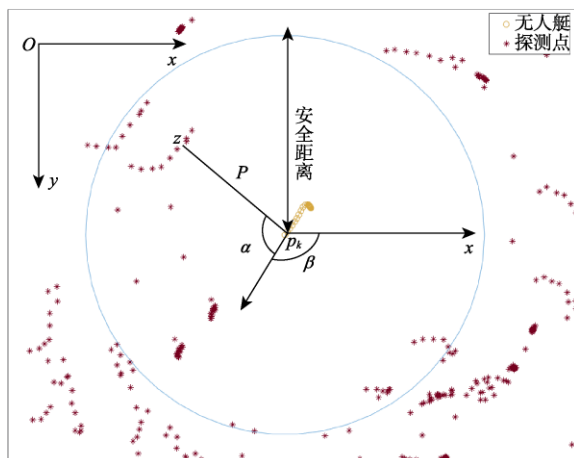


图 1 雷达探测

Fig. 1 Radar detection

大多数目标跟踪算法利用仿真完成实验, 没有将雷达和 INS/GPS 组合导航采样数据时钟不同步问题考虑在内, 但可以利用插值的方法解决采样时间不同步的问题。常用的插值方法为多项式插值, 包括线性插值、牛顿插值和埃尔米特插值等^[6]。其中, 线性插值只需两个周期的数据, 计算步骤简便, 在相邻样本数据相差较小时即可满足计算要求, 而后两种插值方法涉及到多个周期的数据, 属于多项式插值, 计算过程较为复杂。

针对雷达和 INS/GPS 组合导航采样数据参考坐标系不同问题, 需将极坐标系下的探测点转换成无人艇所在的直角坐标系对应的坐标^[7]。吉林大学的王鹏宇等^[8]研究了传感器载体装载有多个传感器时, 由于各个传感器参考的坐标系不同, 无法直接探测数据进行处理而需要进行转换的问题。郭云飞等^[9]为了减少坐标系转换带来的误差, 在极坐标下对目标建立目标跟踪运动模型, 通过模拟数据仿真验证了目标跟踪效果。一般雷达的探测范围较小, 不需要考虑地球表面因素; INS/GPS 组合导航采样的经纬度在选取正确参考系的情况下, 可以最大限度地减小经纬度转平面坐标系的误差, 在此基础上进行的极坐标系转化会产生累计误差, 但只要保证在一定范围内满足需求即可。针对雷达无法直接得到障碍物的航迹和数量的问题, 可以利用关联门, 从时间维度上对探测点进行数据关联, 剔除多余探测点, 获得每个障碍在一段周期内的探测点集合, 即每个障碍的航迹。常用的关联门有环形关联门、椭圆关联门和扇形关联门^[10]。环形关联门所关联的范围较大, 不容易漏掉探测点, 后两种关联门则相反, 在对目标运动能力掌握较少的情况下, 容易漏掉探测点。航迹探测点数据关联常用的方法有最近邻算法、概率数据互联算法、联合概率数据互联算法和多假设法等^[11]。其中, 最近邻算法最为简便, 后 3 种关联算法计算方法都较为复杂, 计算量大。天津大学的魏存伟等^[12]考虑到雷达探测过程中的随机误差、信号处理、设备硬件等因素, 对探测点中的孤立野值和离群点进行了剔除处理。湖南大学的黄晶等^[13]基于最近邻法对航迹下

一时刻的雷达探测点进行筛选,根据关联门的性质去匹配航迹与探测点。国防科技大学的王树亮等^[14]考虑到了交叉目标的情况,提出一种概率数据关联算法。Bae S H^[15]提到在目标跟踪过程中需要初始化和终止航迹,并剔除重合和错误的航迹。虽然以上文章介绍了航迹的生成方法,但是仅局限于关联门的选择或数据关联方法的介绍,并没有建立完整的航迹管理框架。

针对雷达无法直接探测到机动障碍状态的问题,可以对航迹进行状态估计,以获得该障碍物相对准确的状态信息^[16]。运动轨迹状态估计的方法有双向拟合、回归法等数学预测方法,卡尔曼滤波也较多地被用来预测运动物体的状态信息^[17]。西安电子科技大学的刘代等^[18]针对杂波环境下的目标状态估计问题,提出一种利用多普勒量测状态估计算法,侧重于目标数学运动模型的建立,将观测目标运动模型的径向速度线性化,提高了目标状态精度和算法收敛速度,但该方法仅针对目标匀速情况。海军航空工程学院的王国宏等^[19]针对目标测量速度欺骗干扰情况,提出基于速度估计径向投影和运动状态技术延迟的状态估计方法,在仿真实验下有较好的效果。Tlig 等^[20]基于卡尔曼滤波成功实现了目标跟踪,但卡尔曼滤波需要准确选取目标运动模型,且部分参数经验性较强,模型和部分参数选取不当,收敛速度大大降低。上述文章都可对目标进行状态估计,但没有提及状态估计后的数据仍需一次时钟对准,以便于后续无人艇避碰时的定时执行。

上述相关文献更多侧重介绍数据关联方法或状态估计等多目标跟踪中的部分步骤,较少对整个雷达多目标跟踪流程中的细节进行介绍,对时钟和空间对准、航迹管理、航迹来源和去向等步骤描述不够详细。本文做出的主要贡献如下。

(1)对雷达和 INS/GPS 组合导航的原始采样数据进行多目标跟踪,建立了一套完整的雷达多目标跟踪算法处理流程。

(2)对该算法进行了雷达数字孪生仿真测试,与多项式拟合算法进行对比,验证了本文算法的有效性和稳定性。

2 多目标跟踪方法

2.1 算法架构

多目标跟踪方法的算法架构如图 2 所示。由于硬件本身采集数据的性能、硬件之间的差异性以及系统各个层级之间的通信延迟等因素,需要对雷达和 INS/GPS 组合导航的采样数据进行数据预处理,即无效值剔除、时钟对准和空间对准;在数据预处理后,可以在相同的时间和空间维度对障碍物数据进行航迹管理,基于关联门对探测点进行数据关联;在对航迹分类之后,需要对稳定航迹进行状态估计,以获得机动障碍状态,再进行二次时钟对准,方便定时发送数据。

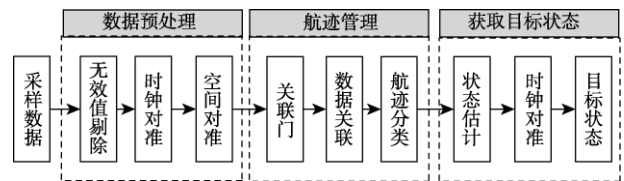


图 2 雷达多目标跟踪算法流程图

Fig. 2 Flow chart of radar multi-target tracking algorithm

2.2 数据预处理

无人艇在航行过程中需要在安全范围内提前感知到周围障碍物以采取下一步行动。所以,只需要保留以无人艇为圆心,半径为安全距离内的雷达数据(如图 1 中蓝色圆圈内的探测点),并剔除采样中的空值。

雷达 30 为低采样率传感器,频率在 $3s^{-1}$ 左右,INS/GPS 组合导航为高采样率传感器,频率在 $1/30s^{-1}$ 左右,故可采用线性插值法进行时间对准;INS/GPS 组合导航在 k_1 时刻测得无人艇测量值坐标为 p_{k_1} ,雷达在 k_2 时刻得到采样数据,INS/GPS 组合导航在 k_3 时刻测得无人艇测量值坐标为 p_{k_3} ,并且有 $k_1 < k_2 < k_3$ 。对 p_{k_1} 和 p_{k_3} 进行线性插值,可得到 INS/GPS 组合导航在 k_2 时刻的测量值 p_{k_2} 如式(1)所示。

$$p_{k_2} = p_{k_1} + \frac{k_2 - k_1}{k_3 - k_1} (p_{k_3} - p_{k_1}) \quad (1)$$

由于两个传感器在无人艇上放置的相对位置

一般较近, 忽略各自偏差, 尽管各自的坐标系不同, 但是可以认为其坐标系的原点是在同一个位置。空间转化后的探测点坐标 (x_z, y_z) 计算如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} x_z = \rho \cdot \cos(\alpha + \beta) + x_k \\ y_z = \rho \cdot \sin(\alpha + \beta) + y_k \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ 为无人艇距离探测点的直线距离; α 为探测点的方位角; β 为无人艇艏向角; x_k 和 y_k 分别为当前时刻下无人艇的横纵坐标。

2.3 航迹管理

环形关联门是以障碍航迹末端为中心建立一个由障碍最大和最小运动速度以及采样时间间隔决定的 360° 环形区域 (图 3 灰色区域), 即障碍可能在下一时刻出现的位置。其内径和外径满足 $R_1 = V_{\min} \cdot \Delta T$ 、 $R_2 = V_{\max} \cdot \Delta T$, V_{\min} 和 V_{\max} 分别为目标最小速度和最大速度, ΔT 为采样间隔。

在同一时刻下, 落入关联门的探测点往往不止 1 个, 可通过最近邻法选择下一个时刻的探测点, 主要思想就是选择目标中心点最近的探测点作为下一时刻的目标中心点。所以当多个探测点同时落入关联门内时, 选择距离该末航迹点最近的一个探测点作为该机动障碍的下一时刻航迹点, 如图 3 所示, $Z(k-1)$ 的下一个航迹点是 $Z_1(k)$, 而不是 $Z_2(k)$ 。

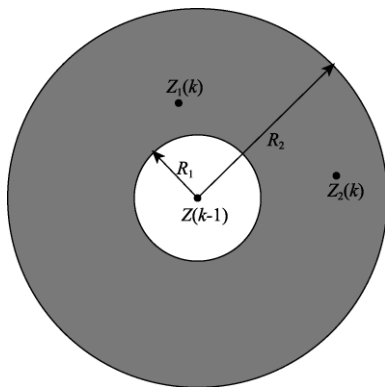


图 3 环形关联门

Fig. 3 Annular association gate

为了方便航迹管理, 把航迹分成起始航迹、暂时航迹和稳定航迹 3 种, 其探测点数量特征、航迹来源和去向如表 1 所示。

3 种航迹可能在一段周期的时间内匹配不到新的探测点, 这段周期称为航迹剔除时间阈值, 分别为 T_1 、 T_2 和 T_3 ; 当前时刻与每个航迹的末航迹点时间戳差值为 ΔT_E ; 令当前时刻的探测点集合 $z(k)$, 上一时刻所有航迹末点集合为 E 。航迹管理涉及到空间和时间两个维度、探测点数量、关联门、数据关联和航迹剔除时间阈值等多个变量, 其流程图如图 4 所示。

表 1 航迹特征、来源和去向

Table 1 Track characteristics, source and destination

航迹	探测点数量特征	来源	去向
起始航迹	1 个	1. 当前时刻探测点 2. 上一时刻起始航迹	1. 下一时刻起始航迹 2. 下一时刻暂时航迹 3. 剔除
暂时航迹	2~4 个	1. 上一时刻起始航迹 2. 上一时刻暂时航迹	1. 下一时刻暂时航迹 2. 下一时刻稳定航迹 3. 剔除
稳定航迹	5 个及以上	1. 上一时刻暂时航迹 2. 上一时刻稳定航迹	1. 下一时刻稳定航迹 2. 剔除

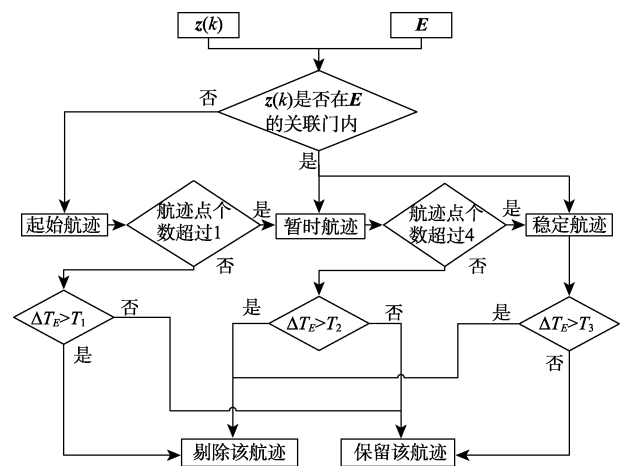


图 4 航迹管理流程图

Fig. 4 Flow chart of track management

2.4 双向拟合状态估计

基于多项式和粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 双向拟合以消除采样误差, 对障碍进行状态估计。距离当前时刻太久前的采样数据对当前目标状态估计参考意义不大, 探测点数量 $N = 4$ 是同时获得目标估计位置、速度和航向的最小周期数, 如式 (3) 所示。

$$\Delta a(k) = x(k) - 3(x(k-1) - x(k-2)) - x(k-3) \quad (3)$$

雷达的采样误差为 r_error ，每次采样时间为 T_p ，采样误差在直角坐标系中体现为在 x 轴和 y 轴上的坐标误差。双向拟合误差消除的主要思路是首先用多项式拟合的方法消除 y 向误差并得到拟合曲线，然后用粒子群算法通过最优化消除 x 向误差。

2.4.1 多项式拟合消除 y 向误差

首先利用多项式对采样点 (x_i, y_i) 进行拟合，表示为

$$p_n(x_i) = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_kx_i^k \quad (4)$$

且 $p_n(x_i)$ 为最小二乘拟合多项式，满足

$$I = \sum_{i=0}^m [p_n(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m [\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i]^2 \quad (5)$$

目标障碍的机动性未知，在 $k-3T_p$ 时刻和 k 时刻位置分别为 $x(k-3T_p)$ 和 $x(k)$ ，可能在短期内有较大变动，规定 $\overline{x(k) - x(k-3T_p)}$ 为目标主要运动方向，其中 $x = [x, y]^T$ ， $\overline{x(k) - x(k-3T_p)}$ 与原坐标系 xOy 的 x 轴形成的夹角为 α ，则将原坐标系 xOy 旋转 α 得到坐标系 $x'Oy'$ ，如图 5 所示。

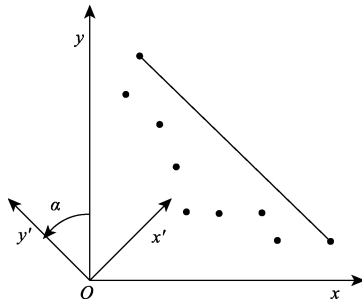


图 5 坐标系转换

Fig. 5 Coordinate system conversion

采用式 (6) 将采样点从坐标系 xOy 转化为坐标系 $x'Oy'$ 。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

采用式 (7) 将采样点从坐标系 $x'Oy'$ 拟合后的曲线转化为坐标系 xOy 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & \sin(-\alpha) \\ -\sin(-\alpha) & \cos(-\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.4.2 粒子群算法修正拟合点消除 x 向误差

通过多项式拟合，得到拟合之后 4 个点，假定首尾采样点 $x(k-3T_p)$ 和 $x(k)$ 的位置是正确的，对中间采样点 $x(k-2T_p)$ 和 $x(k-T_p)$ 进行修正再次减小误差，满足以下条件：

(1) 修正后的 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ 与修正前同样满足式 (4)，即保证目标轨迹是光滑的曲线。

(2) 修正后的 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ 距修正前的距离小于 r_error ，即认为估计位置满足雷达的误差精度要求。

(3) 修正后的 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ 应满足式 (3) 中加速度改变量 $\Delta a(k)$ 尽量小。

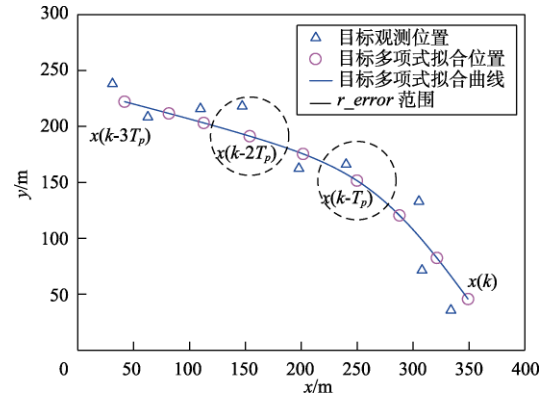


图 6 粒子群算法消除 x 向误差

Fig. 6 PSO eliminate x -direction error

基于此，采用粒子群算法对 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ 的位置进行优化求解。如图 6 所示，将 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ 的横坐标值作为二维粒子 $x(k-T_p)$ 和 $x(k-2T_p)$ ，并带入对应多项式曲线拟合公式得到 $y(k-T_p)$ 和 $y(k-2T_p)$ ，此时两点分别为 (x_{k-T_p}, y_{k-T_p}) 和 (x_{k-2T_p}, y_{k-2T_p}) ，与真实值的距离集合为 $d_i = \{d_{k-1}, d_{k-2}\}$ ，则该距离对目标函数的影响可表示为罚函数 H

$$H = [h_{t-1}, h_{t-2}]$$

$$s.t. \quad h_i = \begin{cases} \frac{d_i}{r_error} & d_i > r_error \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中， $i = t-1, t-2$ 。

适应度函数表示为使修正后的 4 个采样点的 Δa 最小, 表示为

$$fit = \begin{cases} \Delta a(k)^2 & \max(H) = 0 \\ \max(H)^2 \Delta a(k)^2 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

双向拟合估计的计算流程如下:

Step1: 获取稳定航迹最新 4 个周期内的采样点集合为 $P_A = \{x(k-3T_p), x(k-2T_p), x(k-T_p), x(k)\}$ 。

Step2: 按照式 (6) 对坐标系 xOy 的 P_A 进行坐标旋转, 得到坐标系 $x'Oy'$ 下的坐标 $P'_A = \{x'(k-3T_p), x'(k-2T_p), x'(k-T_p), x'(k)\}$, 对 P'_A 进行多项式曲线拟合, 得到拟合后的曲线函数 $y'' = Poly(x'')$, 将 P'_A 中的横坐标代入 $y'' = Poly(x'')$, 得到坐标 $P''_A = \{x''(k-3T_p), x''(k-2T_p), x''(k-T_p), x''(k)\}$, 多项式曲线拟合前后的横坐标是相同的。

Step3: 在坐标系 $x'Oy'$ 下, 将两个中间时刻的采样点横坐标 ($x'(k-T_p), x'(k-T_p)$) 作为粒子, 式 (9) 为适应度函数, 采用 PSO 求解最优 ($\hat{x}'(k-T_p), \hat{x}'(k-T_p)$), 带入 $y'' = Poly(x'')$ 得到 ($\hat{y}'(k-T_p), \hat{y}'(k-T_p)$), 得到坐标系 $x'Oy'$ 下的估计位置 $x''(k-3T_p), \hat{x}'(k-2T_p), \hat{x}'(k-T_p), x''(k)$, 并按照式 (7) 转为坐标系 xOy 下的坐标, 得到估计位置 $\bar{x}(k-3T_p), \bar{x}(k-2T_p), \bar{x}(k-T_p), \bar{x}(k)$ 。此外, 估计位置需要按照式 (1) 进行第二次时钟对准。

3 仿真结果及分析

3.1 本文目标跟踪算法仿真

以安装雷达和 INS/GPS 组合导航的无人艇所采集到数据集进行数字孪生仿真测试。以无人艇初始位置为原点, 将所有时刻的障碍物相对位置转化到对应的直角坐标系内。通过关联门对探测点进行航迹分类。 $t=40.66s$ 时, 如图 7 (a) 所示, 有 4 个孤立探测点, 为起始航迹; 3 条航迹的探测点个数还不到 5 个, 为暂时航迹; 2 条航迹的探测点个数已超过 5 个, 为稳定航迹。 $t=98.71s$ 时, 如图 7 (b) 所示, 起始航迹、暂时航迹和部分稳定航迹已经被剔除, 环境中的杂波已经完全

过滤, 形成了 5 条稳定航迹。

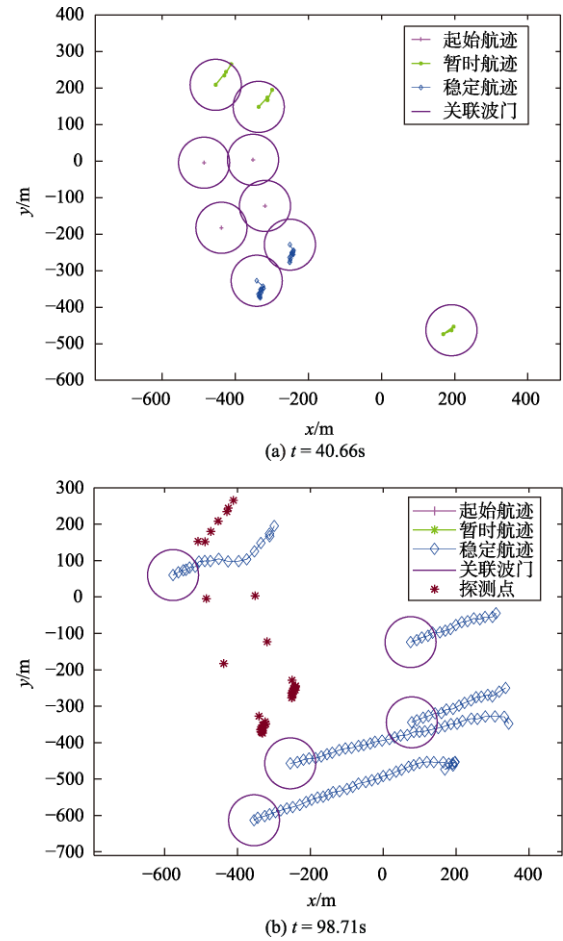


图 7 航迹管理

Fig. 7 Track management

稳定航迹形成时, 便可运用双向拟合算法对稳定航迹进行状态估计, 以求得机动障碍相对准确的位置、速度和航向信息。从图 8 (a) 可以看出, 原始航迹的采样点比较曲折, 航迹连线并不平滑, 经过双向拟合算法后, 其估计航迹连线平滑了, 更符合机动障碍的运动规律。

图 8 (b) 和 (c) 分别是利用双向拟合算法对原始航迹处理所得到的估计速度和航向。可以看出, 速度估计趋势较为平缓, 而前若干个探测点的航向变化较大, 原因在于, 机动障碍初始速度较小, 位置变化较小, 待障碍速度提升之后, 双向拟合算法可以进行相对准确的估计, 机动障碍的速度和航向在若干采样周期之后, 已经趋于稳定。

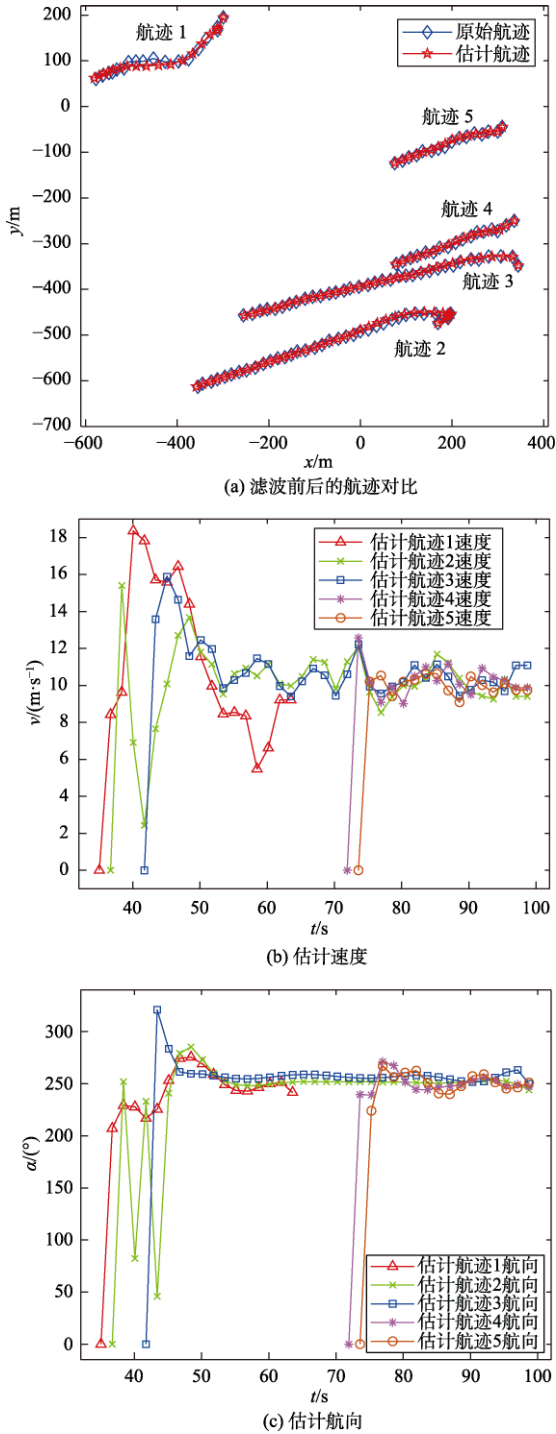


图8 状态估计
Fig. 8 State estimation

3.2 对比仿真分析

以航迹1为例,将真实航迹、稳定航迹、本文目标跟踪航迹和多项式拟合航迹作对比,如图9所示。可以看出,两种算法的轨迹都较为平滑,本文目标跟踪航迹与真实航迹的重合度较高;多

项式拟合算法与稳定航迹的重合度较高,且易产生过拟合和欠拟合的情况。其原因在用本文目标跟踪方法在状态估计时,第一步拟合的采样点较少,且第二步经过一次粒子群算法修正。

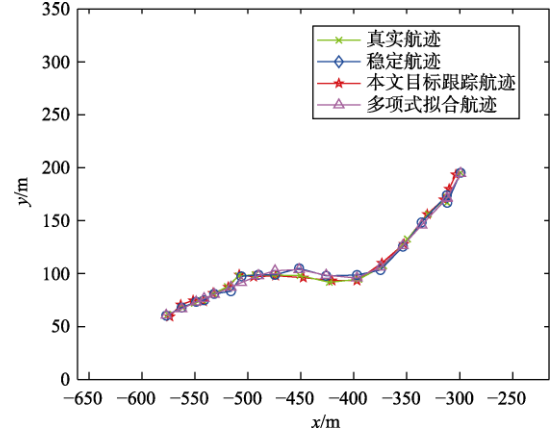


图9 航迹1对比
Fig. 9 Track1 comparison

将本文目标跟踪算法与多项式拟合算法进行性能对比,性能指标采用障碍空间位置均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和速度RMSE,计算公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} RMSE_p(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\bar{x}(k) - \hat{x}(k))^2 + (\bar{y}(k) - \hat{y}(k))^2]} \\ RMSE_v(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\dot{\bar{x}}(k) - \dot{\hat{x}}(k))^2 + (\dot{\bar{y}}(k) - \dot{\hat{y}}(k))^2]} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $RMSE_p$ 和 $RMSE_v$ 分别表示障碍的位置RMSE和速度RMSE; N 为蒙特卡洛实验次数; $(\hat{x}(k), \hat{y}(k))$ 和 $(\bar{x}(k), \bar{y}(k))$ 为 k 时刻障碍的估计位置和真实位置; $(\dot{\hat{x}}(k), \dot{\hat{y}}(k))$ 和 $(\dot{\bar{x}}(k), \dot{\bar{y}}(k))$ 为 k 时刻障碍的估计速度和真实速度。

图10和图11分别是两种估计算法的位置RMSE和速度RMSE变化曲线,可以看出本文目标跟踪算法的RMSE在前期有些不稳定且高于多项式拟合算法,经过5个周期之后便逐渐下降并趋于平稳;多项式拟合算法整体处于平稳,但局部波动较大。通过对比,验证了本文所提算法的有效性和稳定性。

两种算法的时间复杂度差别主要在于状态估

计所采用的方法不同, 只考虑状态估计步骤, 忽略 $O(1)$ 、矩阵转置等较小的复杂度, 本文目标跟踪算法时间复杂度为 $O(8m + mn + glm^2)$, 其中, m 为观测数据维数; n 为状态维数; g 为粒子群算法中的种群规模; l 为迭代次数。

多项式拟合算法的时间复杂度为 $O(8m + mn)$ 。理论上本文目标跟踪算法花费的时间更多, 但仍需以实际时间为准。

如表 2 所示, 与多项式拟合算法相比, 本文目标跟踪算法的位置 RMSE 均值和速度 RMSE 均值更小, 而本文目标跟踪算法平均每步运算时间与多项式拟合算法平均每步运算时间之间的差别很小, 说明本文目标跟踪算法在跟踪精度方面具有一定的优势。

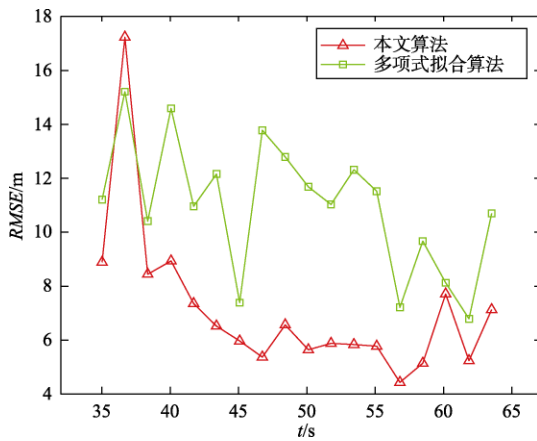


图 10 位置 RMSE 曲线
Fig. 10 RMSE curve of position

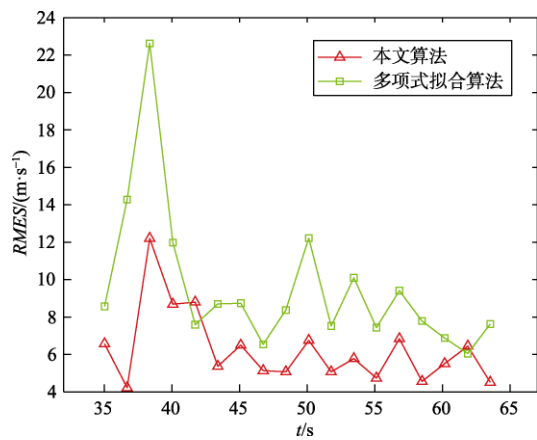


图 11 速度 RMSE 曲线
Fig. 11 RMSE curve of velocity

表 2 两种算法数据对比表

算法	位置 RMSE 均值/m	速度 RMSE 均值/(m·s ⁻¹)	平均每步运算时间/ms
本文算法	7.11	6.26	62.85
多项式拟合算法	10.98	9.58	54.63

4 结 论

本文研究了基于雷达数字孪生的水上多目标跟踪方法。以雷达和 INS/GPS 组合导航采集的数据为样本, 进行了预处理, 使两种传感器的数据可在相同的时间和空间维度进行计算, 并通过环形关联门和最近邻数据关联实现了对航迹的分类, 建立了航迹管理流程, 最后运用双向拟合算法对机动障碍的位置、速度和航向进行数字孪生仿真测试, 结果优于多项式拟合算法。

未来可从数据关联、航迹管理和状态估计等多方面对多目标跟踪算法进行优化, 以应对更加复杂的情况, 比如交叉航迹分类, 更快地识别障碍的出现和消失时间点, 更加精确地估计机动障碍位置、速度和航向等。

参 考 文 献

- [1] 张伟, 廖煜雷, 姜峰, 等. 无人水面艇技术发展回顾与趋势分析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(6): 1-9.
- [2] Zhao Y J, Ma Y, Hu S L. USV formation and path-following control via deep reinforcement learning with random braking[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(12): 5468-5478.
- [3] Ma Y, Zhao Y J, Atilla I, et al. A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs[J]. Ocean Engineering, 2021, 224(15): 108713.
- [4] Chiani M, Giorgetti A, Paolini E. Sensor radar for object tracking[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(6): 1022-1041.
- [5] 张巍巍, 时晨光, 周建江, 等. 面向射频隐身的组网 Radar 多目标跟踪波形优化设计方法[J]. 无人系统技术, 2021, 4(5): 53-60.
- [6] Chen X M, Liu C F, Fan Y W, et al. Time synchronization method based on time interval measurement[C]. 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2021.
- [7] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. Radar 数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [8] 王鹏宇, 赵世杰, 马天飞, 等. 基于联合概率数据关联的车用多传感器目标跟踪融合算法[J]. 吉林大学学报(工学版),

- 2019, 49(5): 1420-1427.
- [9] 郭云飞, 任昕. 一种极坐标下基于高斯过程的扩展目标跟踪方法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(7): 1501-1510.
- [10] Huang Q L, Lu D W, He L, et al. Group tracking method with adaptive gate for multiple extended objects tracking[C]. 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing, Wuxi, China, 2019.
- [11] Sheng H, Chen J H, Zhang Y, et al. Iterative multiple hypothesis tracking with tracklet-level association[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 29(12): 3660-3672.
- [12] 魏存伟, 段发阶, 刘先康, 等. 雷达舰船目标 HRRP 成像视角参数估计[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(12): 2723-2729.
- [13] 黄晶, 李勇, 胡林. 基于数据关联和改进统计模型的激光雷达目标跟踪研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(3): 356-362.
- [14] 王树亮, 毕大平, 阮怀林. 认知雷达波形自适应数据关联跟踪算法[J]. 宇航学报, 2017, 38(12): 1331-1338.
- [15] Bae S H. Online multi-object tracking with visual and radar features[J]. IEEE Access, 2020, 8: 90324-90339.
- [16] Chang C B, Dunn K P. Radar tracking using state estimation and association[C]. 2019 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2019.
- [17] Song L, Chen Z, Mao Y, et al. Error mitigation algorithm based on bidirectional fitting method for collision avoidance of unmanned surface vehicle[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(4): 13-20.
- [18] 刘代, 赵永波, 郭敏, 等. 一种杂波环境下机动目标跟踪算法[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(2): 213-218.
- [19] 王国宏, 白杰, 孙殿星. 速度欺骗干扰下的机动目标跟踪技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1359-1370.
- [20] Tlig M, Bouchouicha M, Sayadi M, et al. Multi-object tracking based on Kalman filtering combining radar and image measurements[C]. 2020 5th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, Sousse, Tunisia, 2020.

作者简介:



徐凯凯 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多目标跟踪、无人艇路径规划。



宋利飞 (1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能船舶。



史晓骞 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为意图识别、无人艇控制。



石正坤 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为意图识别、无人艇控制。



孙昊 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、多目标跟踪。本文通信作者。

[引用格式] 张昊酥, 王 盛, 王 涛, 等. 一种基于极坐标模型的多 AUV 协同导航与定位算法[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 69–79.

一种基于极坐标模型的多 AUV 协同 导航与定位算法

张昊酥^{1,2}, 王 盛³, 王 涛^{4,5}, 苗建明^{1,2}, 龚 喜^{1,2}

- (1. 中山大学海洋工程与技术学院, 广州 510275; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519000;
3. 华中光电技术研究所-武汉光电国家研究中心, 武汉 430223; 4. 中山大学智能工程学院, 广州 510006;
5. 广东省消防科学与智能应急技术重点实验室, 广州 510006)

摘 要: 为了解决多个自主式水下无人飞行器 (AUV) 在作曲线轨迹的航行时常规协同导航算法精度较低的难题, 提出了一种基于极坐标的多 AUV 协同导航与定位算法。首先, 将本算法的模型、可观测性与常规的直角坐标系算法进行了分析与对比。接着, 进行了基于实航数据的数值仿真。针对解决各种传感器受异常噪声干扰导致多 AUV 协同定位误差变大的问题, 本算法引入了野值识别与剔除技术。提出的算法、常规协同导航算法和航位推算算法的航迹终点误差分别为 15.9 m、621.1 m 和 1251.3 m。算法的终点误差是传统算法的 2.6%。因此, 相对传统算法, 提出的算法精度更高、抗干扰性能更好。

关键词: 协同导航; 极坐标模型; 自主式水下飞行器 (AUV); 扩展卡尔曼滤波; 可观测性; 野值判别; 定位误差。

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 2096–5915(2022)01–69–11

DOI: 10.19942/j.issn.2096–5915.2022.1.008

A Cooperative Navigation and Positioning Algorithm of Multi-AUVs Based on the Polar-coordinate Model

ZHANG Haosu^{1,2}, WANG Sheng³, WANG Tao^{4,5}, MIAO Jianming^{1,2}, GONG Xi^{1,2}

- (1. School of Marine Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China; 3. Huazhong Institute of Electro-Optics–Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China; 4. School of Intelligent Engineering Systems, Sun Yet-sen University, Guangzhou 510006, China; 5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Intelligent Emergency Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to solve the problem of low precision of conventional cooperative navigation algorithm of multiple Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) moving in curved trajectory, a cooperative navigation and positioning algorithm based on the polar coordinate is proposed in this article. Firstly, the model and observability of this algorithm are analyzed and compared with the conventional algorithm based on the rectangular coordinate. Then, the numerical simulation based on the experimental sailing-data is carried out. In order to solve the problem that the errors of cooperative positioning of multi-AUVs become larger due to the interference of various sensors by the abnormal noise, the recognition and elimination technology of outliers from the sensors is introduced in this algorithm. The errors of end-points at the trajectories of the proposed algorithm, conventional algorithm of cooperative navigation and dead-reckoning algo-

收稿日期: 2021–09–20; 修回日期: 2021–12–03

基金项目: 国家自然科学基金 (61876187)

rithm are 15.9m, 621.1m and 1251.3m respectively. The error of end-point in this algorithm is 2.6% of that in the traditional algorithm. Therefore, compared with the traditional algorithm, the accuracy of the proposed algorithm is higher accuracy and the performance of anti-interference is better.

Key words: Cooperative Navigation; Polar Coordinate Model; Autonomous Underwater Vehicle (AUV); Extended Kalman Filter (EKF); Observability; Discrimination of Outlier; Positioning Error

1 引言

水下无人航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 最近成为一个研究的热点。它在军事侦察、水下打击、水下搜救与打捞、水下资源勘探与开采等领域都有十分重要的应用。UUV 又可以分为自主式水下无人航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、远程操控式水下无人航行器 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 两大类。ROV 由于需要一根连接到母船的电缆/光缆进行操控和通信, 所以限制了其应用范围。AUV 具有更高的自主性, 可以完成更多更复杂的水下作业任务。AUV 的导航定位是 AUV 总体研制技术中的关键技术, 对于 AUV 十分重要。水下可以利用的导航信息十分稀少, 所以水下的导航比空中导航研究的难度更大, 面临更大的挑战。AUV 的导航定位分系统通常由惯性导航装置、多普勒计程仪和卫星定位装置组成。单独一个 AUV 作业时, 其导航定位技术比较成熟, 精度已经达到一个较高的水平。定位精度与导航系统的成本是一对矛盾, 低成本的导航系统实现高精度的定位对于 AUV 意义重大: 可以大大地降低成本并极大地拓展 AUV 的应用范围。但是, 对于单体 AUV, 低成本导航系统很难实现高精度的定位。

对于 AUV 集群, 通过较优的协同导航算法可以实现集群中所有低成本的从 AUV 的导航定位精度接近主 AUV 的水平。在这样的集群中, 主 AUV 配备常规的高精度惯性导航系统 (Inertial Navigation System, INS) + 高精度多普勒计程仪 (Doppler Velocity Log, DVL) + 全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS), 从 AUV 通常配备磁罗盘 (Magnetic Compass,

MC) + 低精度 DVL + GNSS 或者低精度 INS + MC + 低精度 DVL + GNSS。由于高精度 INS 占整个导航系统成本的 60%~70% 左右, 高精度 DVL 与低精度 DVL 的差价一般在 10 万元以上, 所以从 AUV 的导航定位系统成本将大大降低, 从而可以实现整个较低成本的 AUV 集群达到较高的导航定位精度。协同导航的核心是: 利用水声定位系统、INS、MC 等测量和计算得到的主从 AUV 相对距离, 相对方位等信息, 再利用水声通信设备交互共享这些信息并通过合理的协同导航模型与算法实现所有从 AUV 的高精度定位。采用这种技术, 可以让一个制造成本较低的 AUV 集群去执行一些需要高精度导航定位的水下作业任务 (例如: 水下资源勘探、测绘、打捞与搜救、探潜与反潜、反水雷作战、水下高精度的水雷布放等), 从而可以完全取代传统的高成本 AUV 集群 (集群中所有 AUV 都配置高精度 INS)。所以, 这种协同导航技术将大大扩展 AUV 的应用, 有效地降低各种水下作业的成本以及提高作业效率, 对于国家大力发展海洋经济有重要的意义。

最常用的协同导航方法就是基于 AUV 之间的距离或者距离+方位角的观测量在直角坐标系 (笛卡尔坐标系) 下建立扩展卡尔曼滤波 (Extended Kalman Filter, EKF) 的模型来提升每个 AUV 的导航定位精度^[1-4]。协同导航的模式一般分为无领航者模式 (去中心化模式)^[4] 和主从式 (领航者模式)。主从式一般又分为单领航者^[1-3,5]、双领航者^[6] 和多领航者模式^[2]。在无领航者模式中, 所有 AUV 配置同样精度的惯导, 通过协同导航来对导航精度进行微弱的提升。而在有领航者模式中, 领航者 AUV 携带的惯导精度比跟随者 AUV 的至少高一个数量级, 通过协同导航,

将整个 AUV 团体的精度提升至与领航者的导航精度相当的水平。主从式模式还可以用来估算未知的定常洋流信息^[7]。一般 AUV 之间的距离/方位角信息通过声通机、水听器^[8]、长基线水声定位系统^[9]等设备来测量并进行交互。声学设备都存在声波通信延迟带来的各种问题, 所以需要专门针对声学通信延迟进行补偿^[10-11]。对于长期作曲线运动的 AUV, 运用直角坐标系建模将带来较大误差, 有学者提出了基于极坐标系的协同导航算法^[12]。

传统的 AUV 协同导航算法都是基于直角坐标系, 对于长期作直线或近似直线运动的 AUV 集群具有较高的精度。但是, 大量的可观性分析表明: 想要提高 AUV 集群的可观性, 必须依靠曲线运动等这类机动。另外, 有时受限于水下地形(例如: 必须不停地拐弯进行避障)或任务的特殊要求(例如: 按某种特定的曲线运动进行高效的搜索与探测), AUV 集群必须长期处于机动运动状态。在这种情况下, 采用常规的基于直角坐标系的协同导航算法, 定位精度将变差, 定位误差将有较大的增长。所以, 需要开发一种适用于这种运动情形的新协同导航算法来提高精度。本文提出了在极坐标系下建立协同导航模型和相应的算法来解决定位精度不高的问题。

除了 AUV, 协同导航技术在其他各类无人装备/机器人中也得到了广泛的应用。例如, 有学者提出将最优通信网络模型^[13]、车联网^[14]、概率估计算法和优化算法^[15]、协同编队^[16]、自适应协同^[17]等用于无人系统的协同导航与定位。跨域协同^[18-19]、有人/无人装备的协同^[20-21]等也是协同导航领域未来的发展方向。

2 物理模型

2.1 直角坐标系情形

协同导航主要是利用 AUV 之间的距离, 方位角信息, 所以建模也是针对这些信息。以仅观测距离信息的情况为例(假设 AUV 的俯仰角接近零, 忽略它的影响), 模型如下:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + (u_k \cdot \cos \Psi_k - v_k \cdot \sin \Psi_k) \cdot \Delta t \\ y_{k+1} &= y_k + (u_k \cdot \sin \Psi_k + v_k \cdot \cos \Psi_k) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $[x_k, y_k]^T$ 是 k 时刻 AUV 在导航坐标系(一般采用东北天的直角坐标系)里的位置; Ψ_k 是 AUV 的航向角(相对于地理北向); v_k 是 AUV 的前向速度; u_k 是 AUV 的横向速度; Δt 是导航计算的时间间隔。

需要说明的是, 由于惯导的高度通道是不稳定的, 一般深度信息都通过 AUV 搭载的深度计获得, 所以建模时只用考虑 AUV 实际位置投影到同一水平面(一般选择水域的表面), 只对水平距离建模即可。

如果需要观测 AUV 之间相对方位角信息, 则模型中需要加入相对方位角的变化规律(与 AUV 航向角变化速率相关)。有的情况下还可以获得 AUV 的准确航速信息, 航速当作观测量时, 模型中需要加入速度相关的变化规律(与加速度相关)。另外, 建立卡尔曼滤波模型时还需要考虑 AUV 的 IMU 中陀螺和加速度计的噪声。由于协同导航中相对距离是最重要的关键量, 所以建模时加速度计的噪声更为重要。详细模型方程可以参考文献[1-4]。

对于在深海区航行的 AUV, 多普勒计程仪往往只能测出相对海流的速度, 这将导致组合导航精度下降, 所以洋流估计也是一个重要的研究方向。如前文分析, 由于领航者携带了高精度惯导, 所以通过协同导航在提高跟随者 AUV 导航定位精度的同时, 还可以估算出定常洋流的大小。利用主从式协同导航方式还可以估算定常未知洋流。这种情形下的建模如下^[7]:

$$\begin{aligned} x_{k+1}^S &= x_k^S + \delta x_k^S + \delta t \cdot Ux_k \\ y_{k+1}^S &= y_k^S + \delta y_k^S + \delta t \cdot Uy_k \\ Ux_{k+1} &= Ux_k \\ Uy_{k+1} &= Uy_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta x_k^S &= \sum_{i=k}^{N+k} \frac{\delta t}{N} V_i^S \cdot \cos \psi_i^S \\ \delta y_k^S &= \sum_{i=k}^{N+k} \frac{\delta t}{N} V_i^S \cdot \sin \psi_i^S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, 上标 S 代表从 AUV, 也就是跟随者; Ux_k

和 U_{y_k} 分别为 k 时刻的 x 和 y 方向的定常洋流大小; δt 是协同定位导航的更新时间; $N=\delta t/\Delta t$ 。 V_i^S 为从 AUV 在 t_i 时刻的前向航行速度; Ψ_i^S 为从 AUV 在 t_i 时刻的偏航角。

利用以上这种模型就可以估算出定常洋流信息, 估算出洋流以后, 再补偿到多普勒计程仪的测速信息上, 就可以改进每个 AUV 自身的导航定位精度。

任何水声设备都有一定的延时, 为了提高协同导航的精度, 需要对延时进行补偿。考虑水声延时的模型和常规情况的模型一样。考虑水声通信延迟的主从式多 AUV 协同定位具体过程如下: ①AUV^M (主 AUV)、从 AUV^S (从 AUV) 进行时钟同步准备; ②AUV^M 在 T_S 时刻对 AUV^S 进行水声测距; ③由于水声设备信息处理、激励声波信号需要一定的时间, 所以 AUV^M 延迟一段时间向 AUV^S 广播自身的定位信息、AUV^M 与 AUV^S 的间距信息, 以及信息发送时刻的时间戳; ④水声信息经过一定时间的传播, 到达 AUV^S。AUV^S 接收到信息后, 通过自身携带的世界标准时间系统计算本次接收的信息延迟时长, 按照信息发送时间顺序, 依次利用 AUV^M 的相对定位信息实现对自身航推定位误差的修正, 完成 AUV^S 的协同

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & v_{k-1}^S \sin(\Psi_{k-1}^S - \varphi_{k-1}^S) \cdot T & -v_{k-1}^S \sin(\Psi_{k-1}^S - \varphi_{k-1}^S) \cdot T \\ -\frac{v_{k-1}^S \sin(\Psi_{k-1}^S - \varphi_{k-1}^S) \cdot T}{(\rho_{k-1}^S)^2} & 1 - \frac{v_{k-1}^S}{\rho_{k-1}^S} \cos(\Psi_{k-1}^S - \varphi_{k-1}^S) \cdot T & \frac{v_{k-1}^S}{\rho_{k-1}^S} \cos(\Psi_{k-1}^S - \varphi_{k-1}^S) \cdot T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, T 为卡尔曼滤波器的离散化时的采样周期。这种方法在极坐标系下描述曲线运动十分简便, 也可以保证较高的导航精度。

3 导航算法

3.1 直角坐标系情形

整个协同导航算法的核心就是模型的建立。通常可以选择的观测量为两个 AUV 之间的距离、两个 AUV 之间的相对方位角和两个 AUV 各自的速度等。最常用的就是距离, 距离+相对方位角, 距离+主和从 AUV 的速度, 距离+相对方位角+

定位; ⑤AUV^M 与各 AUV^S 重复完成过程②~④, 实现主从式多 AUV 协同定位。

2.2 极坐标系情形

对于长时间作曲线运动的 AUV, 利用直角坐标系会带来一些不便。这时, 用极坐标系更加简便。以主从模式为例, AUV^M 和 AUV^S 的两组极坐标与航向角分别记为 $\rho^M, \varphi^M, \Psi^M$ 和 $\rho^S, \varphi^S, \Psi^S$ 。可以找到如下的关系式^[12]:

$$R = \sqrt{(\rho^S)^2 + (\rho^M)^2 + 2\rho^S \rho^M \cos(\varphi^S - \varphi^M)} \quad (4)$$

在惯性系下研究主和从 AUV 的运动时, Ψ 就是相对于惯性系 y 轴的方位角; 在东北天的导航系下研究主和从 AUV 的运动时, Ψ 就是相对地理北向的方位角。

当 AUV^M 在 AUV^S 前面时:

$$\phi = \Psi^S - \tan^{-1} \frac{\rho^S \sin \varphi^S - \rho^M \sin \varphi^M}{\rho^S \cos \varphi^S - \rho^M \cos \varphi^M} \quad (5)$$

当 AUV^M 在 AUV^S 后面时:

$$\phi = \pi + \tan^{-1} \frac{\rho^S \sin \varphi^S - \rho^M \sin \varphi^M}{\rho^S \cos \varphi^S - \rho^M \cos \varphi^M} - \Psi^S \quad (6)$$

式中, R 为主从 AUV 之间的距离; ϕ 为主从 AUV 之间的相对方位角。将 $\rho^M, \varphi^M, \Psi^M$ 和 $\rho^S, \varphi^S, \Psi^S$ 这 6 个量作为状态变量, 就可以建立卡尔曼模型。其中, 状态转移阵为:

主和从 AUV 的速度这 4 种情况。建模时应该根据观测量的情况和所需协同导航精度来选择状态变量进行建模。一般观测量越多并且精度要求越高, 则需要选择的状态变量就越多, 计算也就越慢。模型的系统噪声、量测噪声、初值等也十分重要。在 AUV 不会长时间做曲线运动的大多数情况下, 还是选择直角坐标系更加简便。

整个模型建立好以后, 开始选择合适的滤波算法。由于协同导航的卡尔曼模型是一个典型的非线性模型, 只能使用非线性的卡尔曼滤波算法, 最常见的是 EKF (扩展卡尔曼) 算法。由于采用的都是标准的 EKF 计算流程, 这里不再赘述。对

于需要补偿声学设备的延时的情况, 可以使用延时 EKF 算法 (DEKF) [10]。DEKF 是在水声通信延迟 EKF 方法的基础上, 利用延迟滤波状态存储器保存的延迟过程中各时刻的滤波状态值, 基于状态估计均方误差最小对量测信息延迟产生的协同定位误差进行修正。

除了 EKF, 还可以采用更先进的自适应滤波 (AF) [3]、粒子滤波 (PF) [22-23]、因子图算法 [24]、M 估计算法 [25]、无迹卡尔曼滤波 (UKF) 算法 [26] 等。一般情况下, 越先进的算法意味着更高的精度和更大的计算量。需要根据 AUV 搭载的运算硬件资源来选择合适的滤波算法。另外, 在设计滤波算法时, 如果在使用距离和速度等量测量之前对它们进行滤波, 剔除掉其中的野值 [27-28], 则可以进一步提升协同导航的精度和可靠性。

3.2 极坐标系情形

在极坐标情形下, 同样是选择合适的观测量, 建立极坐标下的卡尔曼模型, 然后推导滤波算法。以选择相对距离+相对方位角为例, 可以得到 AUV^M 在 AUV^S 前方时的量测矩阵为:

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{r_k(r_k - r_{1,k})\cos(\theta_k - \theta_{1,k})}{R_k} & \frac{r_k r_{1,k} \sin(\theta_k - \theta_{1,k})}{R_k} & 0 \\ -\frac{r_{1,k} \cos(\theta_k - \theta_{1,k})}{R_k^2} & \frac{r_k(r_k - r_{1,k})\cos(\theta_k - \theta_{1,k})}{R_k^2} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

AUV^M 在 AUV^S 后方时的量测矩阵与式(8)几乎相同, 只是第二行的元素全部取反。建立完模型以后就可以采用常规的 EKF 算法或自适应滤波等进行解算。

4 可观性分析

对于一个卡尔曼系统, 其可观性分析十分重要。选择不同的观测量, 系统就有不同的可观性。先分析直角坐标系情形下的可观性问题。建立的坐标系关系如图 1 所示。

图 1 中, Σ^I 、 Σ^M 和 Σ^S 分别是惯性坐标系、主 AUV 坐标系和从 AUV 坐标系。注意图 1 中的航向角 ψ 为相对于主 AUV 的 X 轴向 (主 AUV 的前

进方向) 的相对方位角。基于移动矢径单领航 AUV 协同导航定位示意图见图 2。根据图 2 可以得到表示式(9)。

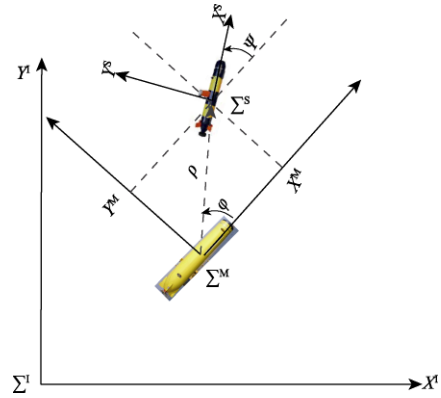


图 1 单领航者 AUV 协同导航各个坐标系关系
Fig. 1 Schematic diagram of multi-AUV cooperative navigation and positioning system for single leader

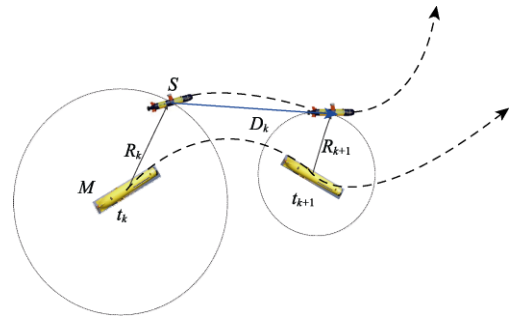


图 2 基于移动矢径单领航 AUV 协同导航定位示意图
Fig. 2 Schematic diagram of cooperative navigation of multiple AUVs based on the MRV (Moving Radius Vector)

$$R_k = (x_k^S - x_k^M)^2 + (y_k^S - y_k^M)^2 \quad (9)$$

$$R_{k+1} = (x_k^S + \delta x_k^S - x_{k+1}^M)^2 + (y_k^S + \delta y_k^S - y_{k+1}^M)^2$$

式中, δx_k^S 和 δy_k^S 的计算方法见式(3)。

如果记 Σ^I 中主 AUV 和从 AUV 的状态变量分别为 $X^M = [x^M, y^M, \psi^M]^T$ 和 $X^S = [x^S, y^S, \psi^S]^T$, 则有式(10)所示的关系。

$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} \dot{X}^M(t) \\ \dot{X}^S(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}^M(t) \\ \dot{y}^M(t) \\ \dot{\psi}^M(t) \\ \dot{x}^S(t) \\ \dot{y}^S(t) \\ \dot{\psi}^S(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^M(t) \cos \psi^M(t) \\ v^M(t) \sin \psi^M(t) \\ \omega^M(t) \\ v^S(t) \cos \psi^S(t) \\ v^S(t) \sin \psi^S(t) \\ \omega^S(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\omega^M(t)$ 和 $\omega^S(t)$ 是航向角变化的角速率。注意此处的航向角都是相对于 X^I 轴的方位角。如果把 Σ^I 中的运动状态 $X^S=[x^S, y^S, \Psi^S]^T$ 转换到 Σ^M 中, 记为 $[x, y, \Psi]^T$ 。考虑到极坐标下运算更加便捷, 转换为极坐标后记为 $[\rho, \varphi, \Psi]^T$, 则有式(11)所示的表达式。

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^S \cos(\psi - \varphi) - v^M \cos \varphi \\ \frac{v^S}{\rho} \sin(\psi - \varphi) - \frac{v^M}{\rho} \sin \varphi - \omega^M \\ \omega^S - \omega^M \end{bmatrix} \quad (11)$$

一个典型的非线性系统如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{x} = f_0(x) + f_1(x) \cdot u_1 + \dots + f_l(x) \cdot u_l \\ y = h(x) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x=[x_1, \dots, x_n]^T$ 为该系统的状态向量; $u=[u_1, \dots, u_l]^T$ 为该系统的输入向量; $y=[y_1, \dots, y_m]^T$ 为该系统的输出向量, 其中, $y_k=h_k(x)$, $k=1, \dots, m$ 。

非线性函数 $h_k(x)$ 关于 $f_i(x)$ 的 n 阶 Lie 导数为:

$$L_{f_i}^n h_k(x) = L_{f_i}^1 (L_{f_i}^{n-1} h_k(x)) = \nabla L_{f_i}^{n-1} h_k(x) \cdot f_i(x) \quad (13)$$

式中, $f_i(x)=[f_{i1}(x), \dots, f_{in}(x)]^T$; ∇ 是梯度运算符, \cdot 是向量的内积运算符。

有了以上 Lie 导数定义, 就可以建立非线性系统的观测性矩阵:

$$O = \{ \nabla L_{f_i, f_j}^L h_k(x), L=0, \dots, l-1; i, j=1, \dots, l; k=1, \dots, m \} \quad (14)$$

如果这个矩阵是满秩的, 则该系统是局部弱能观的。下面分析仅观测距离的非线性系统的能观性。为了简化计算, 把主从 AUV 之间距离的测量值设为 $h(x)=(1/2) \cdot d^2(t)$ 。把式(11)写成式(12)的形式, 则有:

$$\begin{cases} f_1(x) = \left[-\cos \varphi, \frac{\sin \varphi}{d}, 0 \right]^T \\ f_2(x) = [0, -1, -1]^T \\ f_3(x) = \left[\cos \gamma, \frac{\sin \gamma}{d}, 0 \right]^T \\ f_4(x) = [0, 0, 1]^T \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\gamma = \Psi - \varphi$ 。设该系统的 4 个输入分别为: $u_1 = v^M$, $u_2 = \omega^M$, $u_3 = v^S$, $u_4 = \omega^S$, 则可得到如下

观测性矩阵 O :

$$O = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ -\cos \varphi & d \sin \varphi & 0 \\ \cos \gamma & d \sin \gamma & -d \sin \gamma \\ -\sin \varphi & d \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & \sin \psi \\ -\sin \gamma & d \cos \gamma & -d \cos \gamma \\ 0 & 0 & -\cos \psi \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

如果只考虑 u_1 和 u_3 , 则可得到如下观测性矩阵 O_v :

$$O_v = \begin{bmatrix} d & 0 & 0 \\ -\cos \varphi & d \sin \varphi & 0 \\ \cos \gamma & d \sin \gamma & -d \sin \gamma \\ 0 & 0 & \sin \psi \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

类似地, 只考虑 u_2 和 u_4 , 则可得到观测性矩阵 O_ω 。对 O 阵或者 $O_v + O_\omega$ 阵进行分析, 可以得到如下结论。在如下两种情况下系统是可观的^[29]:

① $v^M \neq 0$, $v^S \neq 0$, $\omega^M = \omega^S = 0$, 同时两个 AUV 的运动轨迹不共线。② $v^M \neq 0$, $v^S \neq 0$, 而且 ω^M 和 ω^S 中至少一个不为 0。当在某一段时间内, 两个 AUV 的航迹平行且运动速度相同, 或者两个 AUV 的航迹共线, 则此段时间内系统是不可观测的, 所以应该尽量避免这两种运动情况。总结以上情况, 当主从 AUV 之间距离为 0 (主和从 AUV 位置重合) 或不变时, 该系统是不可观的。

下面, 以极坐标系下的非线性系统为研究对象, 推导该系统以距离和航向/方位角作为观测量时的可观测性。极坐标系下的非线性系统如式(18)和(19)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho}^s \\ \dot{\varphi}^s \\ \dot{\Psi}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^s \cos(\psi^s - \varphi^s) \\ \frac{v^s}{\rho^s} \sin(\psi^s - \varphi^s) \\ \omega^s \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{cases} f_1(x) = [\cos(\Psi^s - \varphi^s), 0, 0]^T \\ f_2(x) = \left[0, \frac{1}{\rho^s} \sin(\Psi^s - \varphi^s), 0 \right]^T \end{cases} \quad (19)$$

当 AUV^M 在 AUV^S 前面时, 相对距离和相对方位角的表达式 h_1 和 h_2 如下面所示:

$$\begin{cases} h_1(x) = \sqrt{(\rho^S)^2 + (\rho^M)^2 + 2\rho^S\rho^M \cos(\varphi^S - \varphi^M)} \\ h_2(x) = \psi^S - \tan^{-1} \frac{\rho^S \sin \varphi^S - \rho^M \sin \varphi^M}{\rho^S \cos \varphi^S - \rho^M \cos \varphi^M} \end{cases} \quad (20)$$

注意, 此处假定是在导航系中建立模型, 所以 ψ^S 是相对于地理北向的航向角, 与式(10)和(11)中 ψ^S 含义不同。主和从 AUV 之间的相对方位角如式(20)中的 h_2 所示。基于以上理论可以建立如式(21)所示的观测性矩阵。

$$\mathbf{O} = [\mathbf{O}_R | \mathbf{O}_\phi] = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{h_1} & \frac{a_2}{h_1} & 0 & \frac{b_1}{h_1^2} & \frac{b_2}{h_1^2} & 1 \\ \frac{c_1}{h_1^3} & \frac{c_2}{h_1^3} & \frac{c_3}{h_1^3} & \frac{d_1}{h_1^3} & \frac{d_2}{h_1^3} & \frac{d_3}{h_1^3} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, 相关变量的表达式为: $a_1 = \rho^S - \rho^M \cdot \cos(\varphi^S - \varphi^M)$; $a_2 = \rho^S \cdot \rho^M \cdot \sin(\varphi^S - \varphi^M)$; $b_1 = a_2 / \rho^S$; $b_2 = -a_1 \cdot \rho^S$; $c_1 = (h_1)^2 \cdot f_1 - (a_1)^2 \cdot f_1 - a_1 \cdot a_2 \cdot f_2$; $c_2 = (h_1)^2 \cdot (r^S)^2 \cdot f_2 - a_1 \cdot a_2 \cdot f_1 - (a_2)^2 \cdot f_2$; $c_3 = (h_1)^2 \cdot (b_2 \cdot f_2 - b_1 \cdot f_1)$; $d_1 = (h_1)^2 \cdot r^S \cdot f_2 - 2a_1 \cdot b_1 \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_2 \cdot f_2$; $d_2 = -(h_1)^2 \cdot r^S \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_1 \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_2 \cdot f_2$; $d_3 = (h_1)^2 \cdot (a_2 \cdot f_2 + a_1 \cdot f_1)$, f_1 是矢量 $f_1(x)$ 中的第 1 个分量, f_2 是矢量 $f_2(x)$ 中的第 2 个分量; \mathbf{O}_R 和 \mathbf{O}_ϕ 分别是相对距离和相对方位角的子块观测矩阵。

类似地, 当 AUV^M 在 AUV^S 后面时, 相对距离和相对方位角的表达式 h_1 和 h_2 如下所示:

$$\begin{cases} h_1(x) = \sqrt{(\rho^S)^2 + (\rho^M)^2 + 2\rho^S\rho^M \cos(\varphi^S - \varphi^M)} \\ h_2(x) = \pi + \tan^{-1} \frac{\rho^S \sin \varphi^S - \rho^M \sin \varphi^M}{\rho^S \cos \varphi^S - \rho^M \cos \varphi^M} - \psi^S \end{cases} \quad (22)$$

$$\mathbf{O} = [\mathbf{O}_R | \mathbf{O}_\phi] = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{h_1} & \frac{a_2}{h_1} & 0 & \frac{b_1}{h_1^2} & \frac{b_2}{h_1^2} & -1 \\ \frac{c_1}{h_1^3} & \frac{c_2}{h_1^3} & \frac{c_3}{h_1^3} & \frac{d_1}{h_1^3} & \frac{d_2}{h_1^3} & \frac{d_3}{h_1^3} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, 相关变量的表达式为: $a_1 = \rho^S - \rho^M \cdot \cos(\varphi^S - \varphi^M)$; $a_2 = \rho^S \cdot \rho^M \cdot \sin(\varphi^S - \varphi^M)$; $b_1 = a_2 / \rho^S$; $b_2 = a_1 \cdot \rho^S$; $c_1 = (h_1)^2 \cdot f_1 - (a_1)^2 \cdot f_1 - a_1 \cdot a_2 \cdot f_2$; $c_2 = (h_1)^2 \cdot (r^S)^2 \cdot f_2 - a_1 \cdot a_2 \cdot f_1 - (a_2)^2 \cdot f_2$; $c_3 = (h_1)^2 \cdot (b_2 \cdot f_2 - b_1 \cdot f_1)$; $d_1 = -(h_1)^2 \cdot r^S \cdot f_2 - 2a_1 \cdot b_1 \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_2 \cdot f_2$; $d_2 = (h_1)^2 \cdot r^S \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_1 \cdot f_1 - 2a_2 \cdot b_2 \cdot f_2$;

$$d_3 = -(h_1)^2 \cdot (a_2 \cdot f_2 + a_1 \cdot f_1)。$$

通过对式(21)和(23)分析可知: ①当主和子 AUV 之间的相对距离不变时, 相对距离观测子块不可观。②当主和子之间的相对方位角不变时, 相对方位角观测子块不可观。③当主和子 AUV 的位置重合时, 系统整体不可观(两个子块都不可观)。④当相对距离和相对方位角都不变时, 系统整体不可观。该结论与前面直角坐标系情形下的分析是一致的。被观测量只有在变化时, 可观性才比较强。所以, 协同导航中应该尽量避免相对距离或相对方位角保持为恒定的情况。

5 基于实航数据的仿真测试

基于以上模型和理论, 利用主/从 AUV 实航的试验数据进行了协同导航的离线仿真, 分析了不同模型和观测量对协同导航精度的影响。试验在某个湖中进行, 主 AUV 的口径为 324 mm, 搭载高精度光纤 INS (其中光纤陀螺的零偏稳定性 $\varepsilon = 0.008^\circ/\text{h}$, 石英挠性加速度计的零偏稳定性 $\nabla = 10 \mu\text{g}$)、测速精度为 $0.4\% \pm 4 \text{ mm/s}$ 的 DVL (多普勒计程仪)、定位误差 $\leq 3 \text{ m}$ 的全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 接收机。从 AUV 的口径为 200 mm, 搭载低精度光纤惯导 (光纤陀螺的零偏 $\varepsilon = 0.1^\circ/\text{h}$, 石英挠性加速度计的零偏 $\nabla = 500 \mu\text{g}$)、测速精度为 $2\% \pm 150 \text{ mm/s}$ 的 DVL (多普勒计程仪)、定位误差 $\leq 3 \text{ m}$ 的 GPS、航向角误差 $\leq 0.2^\circ$ 的磁罗盘。从 AUV 搭载磁罗盘是为了获得自身较准确的航向角信息, 从而可以得到相对方位角观测量。用于测量主/从 AUV 相对距离的水声设备的主要指标为: 测距误差 $\leq 0.1 \text{ m}$ 、量程 $\geq 4000 \text{ m}$ 、声波波束角 $\geq 200^\circ$ 。考虑到 AUV 在水面航行时水声定位测距系统的测量精度较差, 所以在水面时使用无线电定位测距系统。由主 AUV 的组合导航推算以及 GPS 量测得到的航迹如图 3 所示。该试验中主和从 AUV 的 GPS 位置信息误差较小, 可以认为是准确位置, 在本研究中作为 Benchmark 数据。本研究中, 将从 AUV 自身进行航位推算、从 AUV 自身进行组合导航、

基于距离信息的传统（基于直角坐标系）协同导航算法和基于距离+方位角信息的传统协同导航算法这 4 种算法作为对比对象，重点研究了基于距离信息（基于极坐标系）的新式协同导航算法和基于距离+方位角信息的新式协同导航算法这两种算法的定位精度。为了能够得到 Benchmark 数据，本研究总是在整个 AUV 集群都处于水面能够接收到 GPS 信息时才统计定位误差。这种对比研究和衡量误差的方法是协同导航研究中最常用的方法。

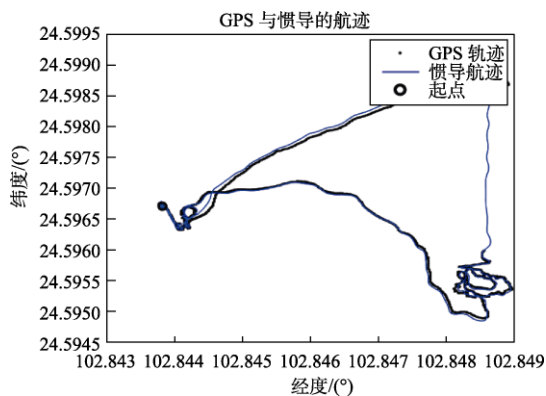


图 3 主 AUV 的航迹图

Fig. 3 Tracks of the master AUV

整个航行试验的时间持续了约 25620 s (约 7.11 h)。图 3 是出发后约 1000 s 时间内的一段航迹。当在水面航行时，主 AUV 处于 INS/DVL/GPS 组合导航状态，在水下航行时，处于 INS/DVL 组合导航模式。试验中，从 AUV 始终在主 AUV 附近 1 km 左右跟随前进，主 AUV 水下航行时，从 AUV 也跟随进行水下航行。主 AUV 和从 AUV 的巡航速度都尽量保持在 2.5 kn 左右。图中有一段没有显示 GPS 轨迹，就是因为主 AUV 在水下航行。主 AUV 的在某段时间内的姿态信息如图 4（俯仰和横滚角）和图 5（航向角）所示。

该信息为截取的一段长度为 350s 的姿态角数据。图 4 表明 AUV 在上浮或下潜时俯仰角变化幅度较大，而横滚角变化不大，始终在 0°附近波动。为了保持较好的可观性，主 AUV 的航向角一直在变化，如图 5 所示。图 5 中，0°与 360°之间的跃变是由航向角的 0°~360°的周期性引起

的。该航向角依靠 INS/DVL/GPS 组合导航（水面）或 INS/DVL 组合导航（水下）计算得到，精度比较高。

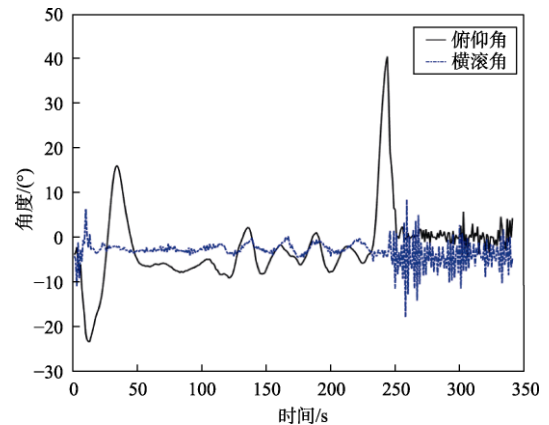


图 4 主 AUV 的俯仰和横滚角

Fig. 4 Roll and pitch angles of the master AUV

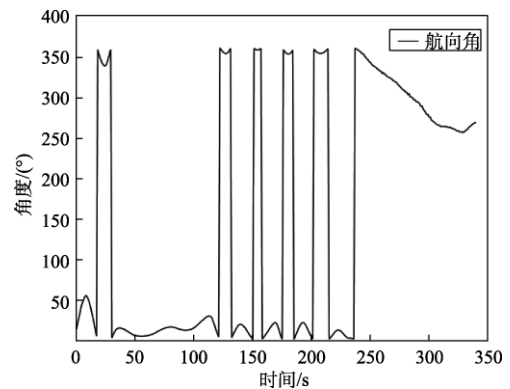


图 5 主 AUV 的航向角

Fig. 5 Yaw angle of the master AUV

从 AUV 的航向角由磁罗盘量测得到。本研究通过事后处理，综合低精度光纤惯导与磁罗盘量测信息，对磁罗盘的野值进行了识别。航向角一旦被判定为野值，就认为此时的量测值无效，卡尔曼滤波只进行时间更新而不进行量测更新。这样处理可以避免野值造成卡尔曼估算误差的快速增长。针对野值的判别与剔除，本研究采用统计方法（“ 3σ 准则”）。根据高斯误差的理论，当测量值服从正态分布时，残差落在 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的概率 $\geq 99.7\%$ ，落在此区间外的概率 $< 0.3\%$ 。因此，可认为残差落于该区间之外的测量值就是野值（即：异常值），这就是“ 3σ 准则”。设 $X_i (i=1, 2, \dots,$

n)为等精度独立测量的数值(可以是 DVL 测量的速度、磁罗盘测量的角度、水声定位系统测量的距离和方位等信息),平均之后得均值 \bar{X} , 标准差 σ 可以按照贝塞尔公式进行计算。 3σ 准则定义为: 凡是残差大于 3 倍标准偏差的测量值判定为野值, 应进行剔除。表达如下:

$$\tilde{X}_b = |X_i - \bar{X}| > 3\sigma \quad (24)$$

σ 的计算公式(贝塞尔公式)如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \tilde{X}_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (25)$$

大量的测试和数值分析表明:“ 3σ 准则”可以成功地剔除大部分野值点。

相对方位角的观测信息(参考图 1 和式(15)中的 γ)就是从 AUV 的船向与主从 AUV 连线矢量(主 AUV 质心指向从 AUV 质心的矢量)之间的夹角。有 2 种计算方法:①由从 AUV 的航向角减去主从 AUV 连线矢量与地理北向的夹角(该夹角由测距定位系统得到);②由从 AUV 与主 AUV 的航向角之差、主从 AUV 连线矢量与主 AUV 船向的夹角(由测距定位系统得到)这两个角相减计算得到。本研究选用更加简便的方法①进行计算。正如前面的分析,本算法对磁罗盘、GPS、水声定位设备、水声通信设备等的输出进行野值判别。当传感器/设备的输出被判定为野值时, EKF 只进行时间更新而不进行量测更新。

主 AUV 的 DVL 测量的离底高度如图 6 所示。

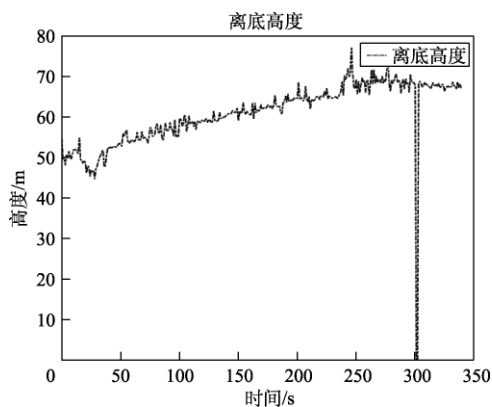


图 6 主 AUV 的 DVL 测量的离底高度

Fig. 6 Height from the lakebed measured by the DVL of the master AUV

图 6 中, 301s 处存在一个野值, 此时的测速信息也为一个野值, 在主 AUV 的 INS 的组合导航算法里、离线仿真中都剔除了这个野值。DVL 出现测速野值时, 主 AUV 的组合导航滤波器只进行时间更新, 不进行量测更新。除了为数不多的几个野值, DVL 的测速信息(AUV 在水面航行时)与 GPS 的测速信息基本吻合, 最大误差不超过 0.12m/s, 从而保证了 INS/DVL 较高的组合导航精度。



图 7 某款磁罗盘的照片

Fig. 7 Photo of a magnetic compass

图 7 是从 AUV 搭载的某款国产磁罗盘产品的实物照片, 其核心指标如下:

- (1) 方位角: 测量范围 $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$, 分辨率 0.01° , 精度 0.2° ;
- (2) 俯仰角: 测量范围 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ ($0^{\circ} \sim +180^{\circ}$), 分辨率 0.01° , 精度 $\pm 0.1^{\circ}$;
- (3) 横滚角: 测量范围 $-180^{\circ} \sim +180^{\circ}$, 分辨率 0.01° , 精度 $\pm 0.1^{\circ}$ 。

在实航试验中, 主和从 AUV 的时间系统都依靠各自惯导中的高精度晶振(两个晶振的精度相同), 同时在水面时还利用了 GPS 发送的时间信息和秒脉冲等进行校准, 所以保证了较高的时间同步性。试验中, INS 的惯性测量单元(IMU)的数据更新周期为 5 ms, GPS 和 DVL 和磁罗盘为 1s, 定位测距系统为 240s。主/从 AUV 内 INS 的卡尔曼滤波器的时间更新周期和量测更新周期分别为 5 ms 和 1s。协同导航的 EKF 滤波器的时间更新周期和量测更新周期分别为 1s 和 240s。当 GPS 等传感器的量测信息丢失或出现野值时, 卡尔曼滤波器只进行时间更新而不进行量测更新。从图 3 可知, 主 AUV 的组合导航精度较高, 轨迹几乎与 GPS 点航迹重合。而从 AUV 的惯导中惯性器件和 DVL 的精度比主 AUV 都低 1~2 个

数量级, 所以不依靠协同导航时, 从 AUV 的组合导航定位精度较差, 如表 1 所示。

从 AUV 的导航定位有 6 种方法:(1)从 AUV 进行自主航位推算。利用磁罗盘的航向角和 DVL 的测速信息进行航位推算。(2)从 AUV 进行自主 INS/DVL/磁罗盘组合导航。注意从 AUV 即使在水面接收到 GPS 信息, 也只是存储当作准确位置, 而不进行参与组合导航, 以模拟真实的从 AUV 长期水下航行无 GPS 信息的情况。(3)在

从 AUV 组合导航的基础上, 利用笛卡尔坐标系下的 EKF 模型和相对距离观测量进行协同导航, 记为 C-EKF1。(4)利用笛卡尔坐标系下的 EKF 模型以及相对距离+相对方位角观测量进行协同导航, 记为 C-EKF2。(5)利用极坐标系下的 EKF 模型和相对距离观测量进行协同导航, 记为 P-EKF1。(6)利用极坐标系下的 EKF 模型以及相对距离+相对方位角观测量进行协同导航, 记为 P-EKF2。离线仿真的结果见表 1。

表 1 仿真结果
Table 1 Simulation results

方法	总航程/m	8540s (1/3 时间) 的 误差/m	12810s (1/2 时间) 的 误差/m	17080s (2/3 时间) 的 误差/m	25620s (终点) 的 误差/m
从 AUV 航位推算		452.3	621.8	898.2	1251.3
从 AUV 组合导航		389.5	585.6	841.8	1078.9
C-EKF1	≈ 33530	221.3	274.5	310.8	621.1
C-EKF2		29.0	32.3	28.1	39.8
P-EKF1		158.9	191.1	182.4	391.5
P-EKF2		11.3	13.5	12.1	15.9

从 AUV 的准确位置选定为从 AUV 的 GPS 轨迹点。所以, 只有从 AUV 在水面运动时才能够计算定位误差大小。表 1 中选取的 4 个点都是从 AUV 在水面航行的时刻。表 1 中的从 AUV 总航程由水面 GPS 轨迹点+水下 P-EKF2 协同导航算法推算得到的。由表 1 的结果可知: 航位推算和组合导航算法都有误差随时间增大的特点。C-EKF1 算法依然服从这个误差随时间增大的规律, 只是误差大小得到了一定的抑制。C-EKF2、P-EKF1 和 P-EKF2 这 3 种算法的误差都不再随时间单调增加, 而是波动或保持大致恒定。特别是 P-EKF2 算法可以大大地减小误差。

以上离线仿真测试表明: 当主和从 AUV 频繁做曲线运动等各种机动时, 与基于相对距离的直角坐标系下的 EKF 算法 (C-EKF1) 相比, 基于相对距离+相对方位角观测量和曲线坐标系下协同导航算法 (P-EKF2) 可将从 AUV 的导航定位误差减小至 20m 以内。

6 结 论

以基于单领航者的主从式 AUV 集群为研究

对象, 利用 AUV 的运动学方程和量测方程建立了极坐标系下的协同导航模型, 设计了基于 EKF 的导航滤波算法。该算法适用于长时间机动航行的 AUV 集群。与常规的航位推算方法、低精度惯导的组合导航方法、基于距离信息的传统 (基于直角坐标系) 协同导航算法、基于距离+方位角信息的传统协同导航算法进行对比, 研究了基于距离信息的新式 (基于极坐标系) 协同导航算法、基于距离+方位角信息的新式协同导航算法。另外, 为了提高本算法的鲁棒性, 本文模型考虑了各个传感器输出存在野值问题。当某个输出被判定为野值时, EKF 只进行时间更新而不进行量测更新。这种技术有效克服了水声设备、磁罗盘等的异常量测噪声对于协同导航系统的影响。数值仿真验证了本文算法的有效性, 相对传统的从 AUV 自身进行航位推算方法, 本文提出的算法可以将误差减小至 1.27% (15.9m/1251.3m), 而基于距离信息的常规协同导航算法只能将误差减小至 49.6% (621.1m/1251.3m)。

参 考 文 献

- [1] 房旺, 李建龙, 孙晨. 基于距离测量的 AUV 协同导航最优队

- 形研究[J]. 控制工程, 2018, 25(9): 1679-1685.
- [2] 孙鑫. 基于距离信息的多 AUV 协同导航研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.
- [3] 史春昊. 主从式 AUV 协同定位算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [4] 朱亦峰. 多 AUV 协同作业中的互定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [5] 李闯白, 刘明雍, 张立川, 等. 单领航者相对位移测量的多自主水下航行器协同导航[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 1002-1007.
- [6] 房新鹏, 严卫生. 双领航多自主水下航行器移动长基线定位最优队形研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(8): 1020-1024.
- [7] 刘明雍, 张加全, 张立川. 洋流影响下基于运动矢径的 AUV 协同定位方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(11): 1632-1636.
- [8] 张立川, 徐德民, 刘明雍. 基于双水听器的多自主水下航行器协同导航方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1603-1606.
- [9] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于移动长基线的多 AUV 协同导航[J]. 机器人, 2009, 31(6): 581-585.
- [10] 高伟, 杨建, 刘菊, 等. 基于水声通信延迟的多 UUV 协同定位算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 539-545.
- [11] 姚尧, 徐德民, 张立川, 等. 通信延迟下的多 UUV 协同定位—基于航迹预测的实时更新算法[J]. 机器人, 2011, 33(2): 161-168.
- [12] 高伟, 史宏洋, 刘博, 等. 一种基于极坐标的 AUV 曲线运动状态下的协同定位方法: 中国, 201410195910.X[P]. 2014-05-19.
- [13] Safaei A, Mahyuddin M N. Adaptive cooperative localization using relative position estimation for networked systems with minimum number of communication links[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32368-32382.
- [14] 闵海根, 宋晓鹏, 程超轶. 车联网环境下车辆协同高精度定位研究进展[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 8-14.
- [15] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 1-8.
- [16] 邹佳运, 张文清, 曲泓玥, 等. 面向水下目标搜索的 USV&UUV 编队协同队形规划[J]. 无人系统技术, 2021, 4(2): 40-46.
- [17] 罗汝斌, 颜鹏. 无人行星车自适应协同探测方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 37-42.
- [18] 王伟平, 张允君, 董超, 等. 海洋无人系统跨域协同观测技术进展[J]. 无人系统技术, 2021, 4(4): 14-21.
- [19] 何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 1-13.
- [20] 尹昊, 侯婷婷, 李东光. 面向典型任务的有人/无人机协同效能评估[J]. 无人系统技术, 2021, 4(1): 62-70.
- [21] 李磊. 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析[J]. 无人系统技术, 2019, 2(3): 83-90.
- [22] 张博, 徐文, 李建龙. 基于粒子滤波的 AUV 组合导航方法[J]. 机器人, 2011, 34(1): 78-83.
- [23] 韩月, 陈鹏云, 沈鹏. 基于高斯和粒子滤波的 AUV 水下地形辅助导航方法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(1): 48-54.
- [24] 范世伟, 张亚, 郝强, 等. 基于因子图的协同定位与误差估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 499-507.
- [25] 李杨, 杜度, 范世伟, 等. 基于 M 估计的多 UUV 协同定位算法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 123-126, 130.
- [26] 刘明雍, 沈俊元, 张加全, 等. 一种基于无迹卡尔曼滤波的 UUV 协同定位方法[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 205-208.
- [27] 韩云峰, 孙大军, 张居成, 等. 基于一步状态估计和协方差估计的距离野值剔除方法: 中国, 107064875. A[P]. 2017-03-31.
- [28] 韩云峰, 孙大军, 崔宏宇, 等. 一种基于最小二乘法的速度信息野值剔除方法: 中国, 107092780. A[P]. 2017-08-25.
- [29] 高伟, 刘亚龙, 徐博. 基于双领航者的多 AUV 协同导航系统可观测性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2370-2375.

作者简介:



张溟酥 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 AUV 水下组合导航及协同导航技术。



王盛 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为综合导航系统。



王涛 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无人系统智能认知、多域无人系统协同控制。本文通信作者。



苗建明 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 AUV 及无人船的控制与导航技术。



龚喜 (1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 AUV 及无人船的控制技术。

[引用格式] 胥凤驰, 谢杨柳, 董洁琳, 等. 基于半实物仿真的水面无人艇测试系统构建方法[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 80-87.

基于半实物仿真的水面无人艇测试系统构建方法

胥凤驰, 谢杨柳, 董洁琳, 宋胜男, 骆福宇

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 水面无人艇是一种新型无人自主作战舰艇, 能够通过任务设定、预规划航路、搭载不同的任务载荷, 完成多种任务, 包括警戒巡逻、侦察监视、反潜反水雷等。由于水面无人艇对工作环境要求较高, 因此为了能够在实艇海上试验之前, 在实验室条件下进行充分的测试, 提出一种基于半实物仿真的水面无人艇测试系统构建方法, 测试系统基于由实物岸基航行任务指挥控制台、艇上信息处理设备组成的航行任务系统, 以及利用仿真的无人艇综合导航模拟器、任务载荷模拟器, 结合可靠性、安全防护性能测试等配试工具, 搭建实验室条件下的测试用例运行环境, 开发测试用例生成工具、测试用例分类存储工具、测试用例抽取工具、测试环境配置工具、测试数据分析、评估等工具, 完成测试系统的搭建。结果表明本文构建的半实物仿真测试系统能够达到对无人艇的测试效果, 并提高测试的效率。

关键词: 水面无人艇; 仿真测试系统; 任务载荷模拟器; 任务功能测试场景构建; 可靠性测试; 安全性测试

中图分类号: V279

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2022)01-80-08

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.009

Construction Method of Unmanned Surface Vessel Test System Based on Hardware-in-the-loop Simulation

XU Fengchi, XIE Yangliu, DONG Jielin, SONG Shengnan, LUO Fuyu

(CSSC System Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: The unmanned surface vessel is a new type of unmanned combat ship, which can accomplish many tasks, such as alert patrol, reconnaissance and surveillance, anti-submarine and anti-mine, by task setting, pre-planning route and carrying different task loads. Due to the high requirement of working environment for unmanned surface vessel, in order to be able to carry out full testing under laboratory conditions before the real craft is tested at sea, in this paper, a test system for unmanned surface vessel based on semi-physical simulation is presented. The test system is based on a navigation mission system which is composed of a real shore-based navigation mission command and control console and information processing equipment on board, and by using the simulated unmanned craft integrated navigation simulator, mission load simulator, and test tools such as reliability and safety protection performance test, the test case operating environment under laboratory conditions is set up, a test case generation tool, a test case classification and storage tool, a test case extraction tool, a test environment configuration tool, a test data analysis and evaluation tool are developed. The results show that the hardware-in-the-loop simulation test system constructed in this paper can achieve the test effect and improve the test efficiency.

Key words: Unmanned Surface Vessel; Simulation Test System; Task Load Simulator; Task Function Test Scenario Construction; Reliability Testing; Safety Testing

1 引言

水面无人艇是一种具有自主航行与路径规划能力,可搭载不同的任务载荷,并且能够完成设定任务的小型水面舰艇。它具有体积小、航速高、智能化、无人员操控等优点,被广泛应用于海洋空间资源探测、海底测绘、应急救援、情报收集、反潜反水雷等领域。通常,水面无人艇具备在自主控制状态下完成复杂环境下环境感知及自主避碰、复杂海况下精准跟踪以及航行任务一体化控制能力^[1];具备对海域环境的实时探测、感知和重构能力,对水面目标完成感知、定位和识别,对水下目标完成感知、定位,以及能够对本艇平台搭载的传感器信息及来自外部的环境信息进行态势融合,建立任务区域环境态势^[2],并能将环境态势信息经通信链路回传至控制端;具备在复杂海洋环境下自主航行及避障能力,具备任务规划执行能力及航行任务自主控制能力,具备载荷设备模块化换装的能力,应能够根据任务背景搭载不同载荷,完成水面警戒巡逻任务、水下目标探测任务、水面目标跟踪监视任务等多种作战任务^[3]。另外,针对不同的使命任务,水面无人艇要基于各种基础应用算法制定相应的任务策略,满足任务需求。策略主要包括航行控制、任务执行两大类。航行控制策略保证无人艇在作战任务下的航行控制,任务执行策略保证无人艇能够完成各种作战任务。任务策略由各种基础应用算法组合而成,并具有灵活的可扩展能力。水面无人艇支持高速航行、典型航迹跟踪及避障、水面多目标感知及规避、水下目标感知和水面运动目标跟踪监视等作战任务。

为了验证无人艇的基础功能、平台综合性能及各项技术指标是否满足上述技术要求,完成对无人艇平台性能、自主航行控制能力、通信和载荷的可靠性,以及对突发情况的紧急处置等相关测试,设计相关验证试验。国外已有无人机的仿真模拟测试系统,能够对飞行控制进行简单测试,但是对于任务功能的测试还达不到时间和精度方面的要求。目前,在实验室条件下对水面无人艇

航行任务系统的测试只能测试一部分与航行状态无关系的简单任务功能测试,而对于较复杂的航行控制与任务功能测试则需要采用外场测试的方法,由于水面无人艇工作环境的复杂性和海上环境的不确定性,导致系统测试需要消耗很高的时间和成本,为水面无人艇的系统测试增加难度。另外,通过模拟不同传感器返回目标报文的方式能够实现对任务功能的测试,但是往往同一目标的不同传感器的目标报文格式相差很大,报文构建过程复杂,涉及水面、水下以及广泛海域不同海况下的任务功能测试,生成报文的人工工作量较大。由于不同传感器模拟生成的目标报文之间互不联系,无法结合传感器本身的特性实现传感器信号的模拟,也无法模拟目标在特定海洋环境下的运动状态,导致模拟测试效果与实艇测试相差较大,无法通过仿真测试达到验证实艇任务功能的目的。以上所有的方法均无法灵活、全面地对水面无人艇航行任务系统的功能和性能进行测试^[4]。

本文设计了一种基于半实物仿真的水面无人艇测试系统构建方法,该测试系统利用无人艇的组成设备模拟器和实物共同搭建水面无人艇系统测试环境,不仅能够在实验室条件下对航行任务系统的功能和性能进行全面测试,而且可以对实际航行任务中多种复杂条件下的水面无人艇的自主能力进行充分考量,通过对测试数据的分析统计,提早发现潜在的系统缺陷,提高系统的安全性和可靠性。半实物仿真测试系统适用于包含无人机、无人车、无人艇在内的多种无人装备的系统测试^[5]。

2 基于半实物仿真的水面无人艇测试系统组成

测试系统基于由岸基航行任务指挥控制台、艇上信息处理设备组成的航行任务系统,利用无人艇综合导航模拟器、任务载荷模拟器,结合可靠性、安全防护性能测试等配试工具,搭建实验室条件下的测试用例运行环境,开发测试用例生成工具、测试用例分类存储工具、测试用例抽取

工具、测试环境配置工具以及测试数据分析、评估等工具，完成测试系统的搭建。

该测试系统可以灵活、快捷地建立适合各种场合、各种环境的无人艇系统测试，能够有效地为无人艇系统提供功能测试、可靠性测试、安全防护性能测试等，并能够提供功能有效性、系统

可靠性和无人自主性等的测试评价。该测试系统有良好的扩展性，根据模拟器的不同，可支持对无人艇单艇及无人艇协同的测试。采用开放的技术框架，以保证测试系统可与其他系统或设备进行功能集成和设备集成。基于半实物仿真的水面无人艇测试系统组成图如图 1 所示。

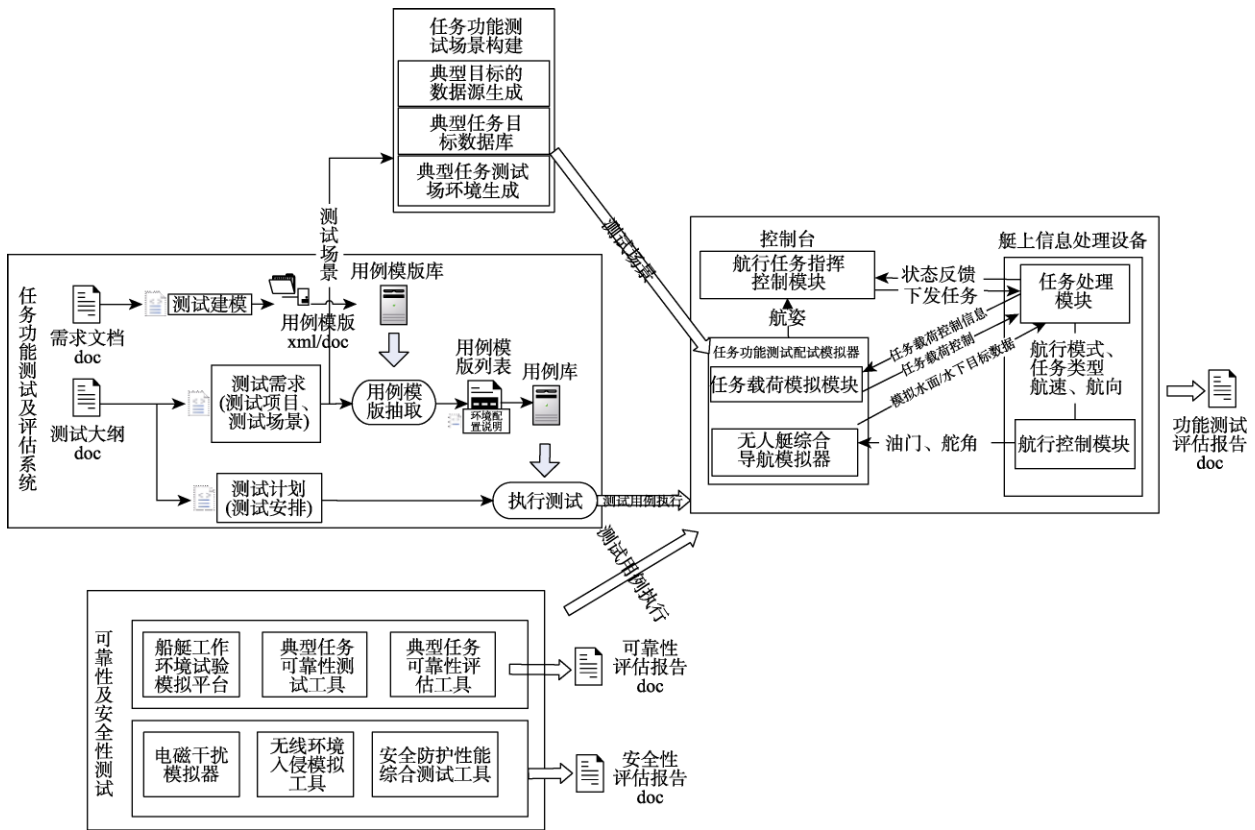


图 1 基于半实物仿真的水面无人艇测试系统组成图

Fig. 1 Composition diagram of unmanned surface vehicle test system based on hardware-in-the-loop simulation

2.1 任务功能测试及评估系统

任务功能测试及评估系统由任务试验方案生成模拟软件、典型任务试验评估软件、运行状态监控软件、安全防护设计测试及评估服务器和任务功能测试支撑服务器组成。任务功能测试及评估系统用于根据无人艇的不同任务类型，形成典型任务试验方案，配置生成测试环境，能够用于无人艇试验方案的筹划，支持试验方案、测试需求、测试用例和测试计划生成，支持测试用例脚本和自动执行和测试数据自动收集存储。在测试完成后给出评估结果，并能够在试验过程中实时

监控软硬件工作状态。

2.2 任务功能测试配试模拟器

任务功能测试配试模拟器主要包括：无人艇综合导航模拟器和任务载荷模拟模块。

2.2.1 无人艇综合导航模拟器

由于无人艇在海上执行任务过程中，受到复杂海洋环境的影响，不可避免地产生振动运动^[6]。因此，模拟无人艇航行状态，对于保障无人艇安全航行，提高船舶任务工作能力等有着重要意义。针对水面无人艇系统测试需求，设计和实现水面无人艇综合导航模拟器软件，模拟器是用来实现

在实验室条件下对无人艇系统进行测试的重要配试设备。无人艇综合导航模拟器能够模拟不同海洋及气候条件下的无人艇定位、航向、航速、纵横摇和 AIS 等信息,为无人艇系统测试提供综合导航信息。

综合导航模拟器的工作流程如下:

(1) 根据测试需求,在任务功能测试场景构建工具中设置测试场景,制定无人艇的初始位置、试验场景海洋环境等信息,为无人艇综合导航模拟器提供外部环境输入;

(2) 将任务下发给艇上综合信息处理设备,艇上综合信息处理设备的任务处理模块接收任务规划,并将任务规划中的速度、航向转换为油门、舵角等信息输入到无人艇综合导航模拟器中;

综合导航模拟器利用动力学原理计算速度、航向,并结合试验场景中提供的海洋及气候条件,更新无人艇的定位、航向、航速、纵横摇等信息^[7],按照通信协议要求发送给航行控制模块,从而模拟无人艇航行的效果,实现对航迹跟踪、路径规划、避障和目标探测等任务的测试。

综合导航模拟器支持同时运行多个可执行程序,利用试验导调台设置无人艇集群测试场景及多个无人艇的初始位置,实现多艇集群协同任务测试。

2.2.2 任务载荷模拟模块

针对水面无人艇系统测试需求,设计和实现水面无人艇任务载荷模拟模块软件,为无人艇系统测试环境搭建提供配试设备保障。任务载荷模拟器是用来实现在实验室条件下对无人艇系统进行测试的重要配试设备,包括导航雷达模拟器、声呐模拟器和光电模拟器等。无人艇任务载荷模拟模块能够模拟无人艇上配置的探测设备,能够根据综合导航或对应模拟器的信息、接收来自任务功能测试场景构建工具提供的测试场景设置及不同海洋气候条件,能够支持不同海洋及气候条件的运动目标轨迹的模拟^[8],向艇上综合信息处理设备提供对应条件下的小目标数据,包括目标批数、批号、距离、方位、相对航向、相对航速、

绝对航向、绝对航速和航迹形成时刻等。

无人艇任务载荷模拟模块的工作流程如下:

(1) 根据测试需求,在任务功能测试场景构建工具中设置测试场景,制定试验场景海洋环境信息、设定目标类型、目标运动轨迹和目标出现时刻等,为任务载荷模拟模块提供外部环境输入;

(2) 无人艇任务载荷模拟模块根据测试场景设置和通信接口协议,生成对应的水面及水下目标数据,并根据任务载荷模拟模块参数设置,将模拟目标数据发给任务处理模块,从而验证无人艇任务处理模块对目标的处理功能。

2.3 任务功能测试场景构建工具

结合实艇测试经验,由于实际情况下传感器就是从环境中读取相关内容,完成感知。所以在仿真测试下,需要构建一个仿真的测试场景,这个测试场景无限接近实际环境,分析多种任务下测试环境的构成后,抽象出海洋环境和场景中的目标,通过将海洋环境和场景中的目标元素进行封装^[9],提高多任务配置效率,再根据结合设置的海洋环境数据,生成目标数据及轨迹,完成仿真测试场景的构建。这个测试场景接近真实环境,解决了仿真测试与实艇测试差距大的问题。将测试场景提供给多传感器模拟器作为输入,各自读取场景中的数据并输出目标报文,能够简单有效地解决多模拟器互不连通带来的效果差的问题,因此提出任务功能测试场景构建工具。

任务功能测试场景构建能够对测试场景的数据进行管理,包括测试场环境数据管理,可产生不同场景下的典型任务测试场;目标数据管理构建典型任务目标数据库,存储和管理海上目标、水下目标和水面障碍物等目标数据;目标数据源生成,基于典型任务目标数据库生成典型目标,可模拟动目标的运行轨迹。另外,任务功能测试场景构建能够对测试场景进行配置,根据测试需求中的测试场景要求配置典型任务试验的测试方案,包括典型任务目标模拟和典型任务测试场环境模拟等,对典型任务试验的测试场景进行规划、设置、导调和监控等,构建满足典型任务试验需

求的测试环境。主要对海上目标、水下目标、海洋环境条件等进行配置，以支持训练警戒、侦察监视和水下小目标探测等典型任务的场景配置。任务功能测试场景构建工具功能分解图如图 2 所示。任务功能测试场景构建数据处理流程如图 3 所示。

2.3.1 海上目标配置

根据巡逻警戒、侦察监视典型任务的测试场景需求，配置海上目标的种类、数量和运动轨迹等情况，配置的目标种类主要有水面快艇、渔船和大型舰船等。目标运动轨迹显示界面如图 4 所示。

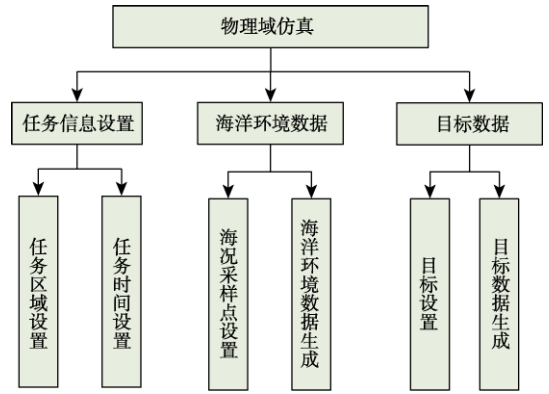


图 2 任务功能测试场景构建工具功能分解图
Fig. 2 Functional decomposition diagram of task functional test scenario building tool

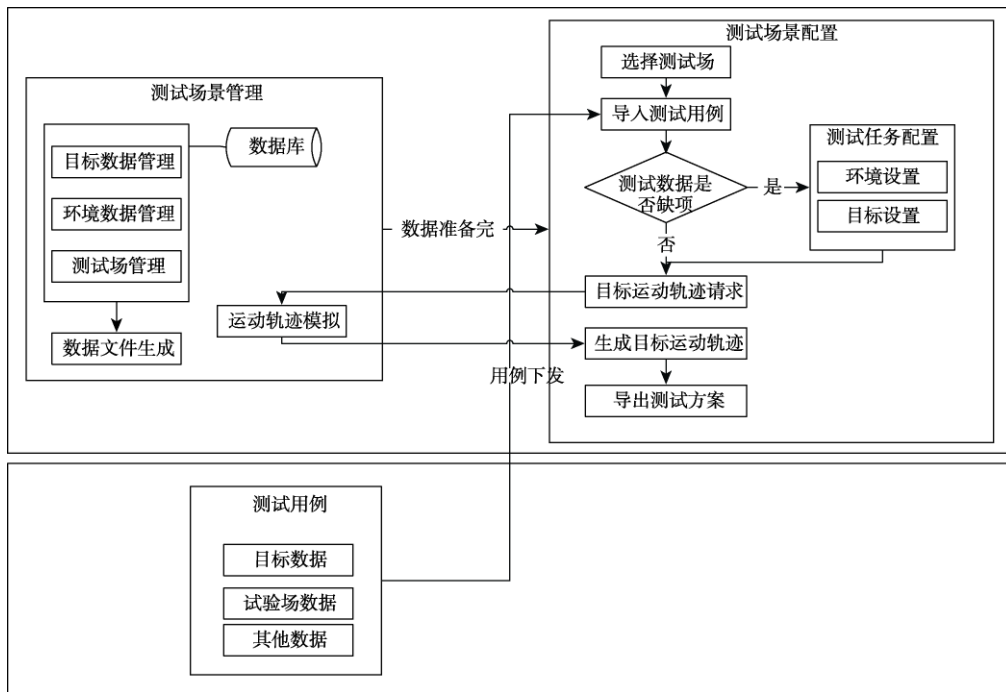


图 3 任务功能测试场景构建数据处理流程
Fig. 3 Task function test scenario builds data processing flow

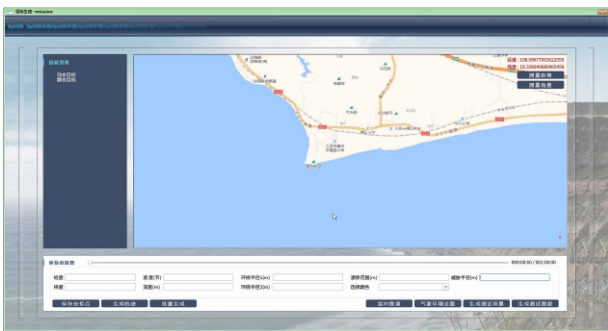


图 4 目标运动轨迹显示界面
Fig. 4 Target trajectory display interface

2.3.2 水下目标配置

根据水下小目标探测典型任务的测试场景需求，配置水下目标的种类、数量、运动轨迹等情况，配置的目标种类主要有锚雷、沉地雷、蛙人和潜航器等。

2.3.3 海洋环境条件配置

根据巡逻警戒、侦察监视、水下小目标探测典型任务的测试场景需求，配置典型任务的测试场景水域大小、海况等级、季节和昼夜等情况。海

洋气象环境设置界面如图 5 所示。

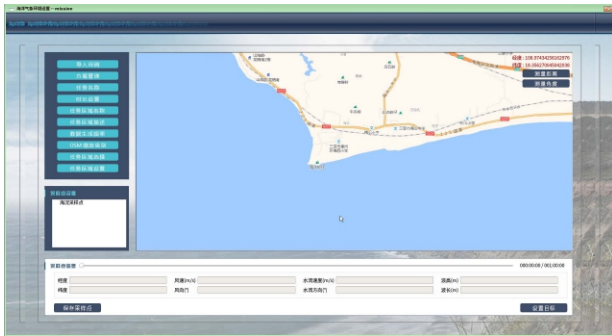


图 5 海洋气象环境设置界面

Fig.5 Marine meteorological environment settings interface

2.4 典型任务驱动的可靠性测试

由于水面无人艇需要长期自主执行任务, 并且需要完成一些复杂的海上任务, 就要求水面无人艇具备较高的可靠性^[10]。通过分析巡逻警戒、侦察监视和水中小目标探测等典型任务条件的任务剖面, 基于船艇工作环境模拟平台提供的温度、湿度和摇摆环境, 与接入的艇上信息处理设备交互, 典型海上任务能力驱动的可靠性测试设备能够将生成的可靠性测试用例输入艇上信息处理设备执行测试, 并记录工作时长、故障类型、故障次数等可靠性模拟试验数据, 为艇上信息处理设备可靠性评估提供基础。支持艇上信息处理设备连通和及时可靠性定量分析, 同时对设计和实验中的发生故障信息进行定性分析, 输出可靠度预计结果、设计改进措施和设计准则; 能够在任务软件运行条件下, 生成艇上信息处理设备可靠性试验测试用例, 对艇上信息处理设备进行可靠性测试, 并收集设备故障信息; 能够对故障信息进行分析处理, 融合多源产品故障信息对产品的可靠性进行评估。

典型可靠性测试工具根据任务软件可靠性测试用例生成与执行软件工具中记录的内外场试验中发生的故障数据进行故障定性分析, 确定设计准则、改进和使用补偿措施; 典型可靠性评估工具根据任务软件可靠性测试用例生成与执行软件工具中判定的试验故障信息进行系统和设备的可靠性评估。

2.5 安全防护攻击与监测

水面无人艇采用无线通信的方式与岸基指挥控制中心交换信息, 因此对信息安全性要求较高^[11]。安全防护综合测试工具应包含攻击测试模块和监测分析模块。攻击测试模块负责实现对公共服务基础架构的攻击测试用例构建、模拟攻击测试发起、测试结果反馈呈现。监测分析模块通过收集公共服务基础架构中的网络防护交换板信息, 来实现对公共服务基础架构的安全态势进行建模分析, 给出安全状况报告和攻击威胁告警。利用电磁干扰模拟器, 模拟艇上信息处理设备的外部输入, 向艇上信息处理设备植入病毒, 以发现艇上信息处理设备存在的安全隐患, 验证外部协议与接口的安全性; 利用无线环境入侵模拟工具发起网络攻击, 模拟无数据库访问权限的设备访问数据库, 以发现非法侵入的隐患, 验证数据库的安全性; 通过下发远程数据销毁指令, 下发规划航迹并模拟反馈无人艇航迹等; 分析无人艇安全防护架构设计工具监控到的数据, 检查艇上信息处理设备的病毒检测、数据加密、网络攻击提示、远程数据销毁和数据访问权限管理等能力。

安全防护性能综合测试工具采用事件触发模型^[12], 通过用户事件驱动攻击脚本及攻击工具进行攻击模拟, 并监测艇上信息处理设备中的网络防护交换板的日志, 从而得到攻击防护效果并反馈用户。安全防护性能综合测试工具包含两个模块: 攻击测试模块和监控评估模块; 用户的一次事件会触发安全防护性能综合测试工具进行两个动作: 一是攻击测试模块运行攻击脚本进行攻击模拟操作; 二是监控评估模块收集艇上信息处理设备中的网络防护交换板的日志信息进行攻击效果比对, 并输出。

3 基于半实物仿真的水面无人艇测试实例

为了验证半实物仿真的水面无人艇测试系统的时效性和准确性, 我们设计了水面多目标规避能力测试试验。

3.1 试验目的

考核被试艇水面静态障碍探测和定位能力及规避能力。

3.2 试验方法

在海面上设置由 4 个边界点 $F01\sim F04$ 围成的 $3000\text{ m}\times 2000\text{ m}$ 矩形区域，并设置水面浮标测试时被作为水面障碍，并在矩形区域中心位置设置过航点 $T01$ ，如图 6 所示，水面静态障碍具有不同的颜色辨识，红色颜色标识的水面障碍威胁半径 $R1$ 为 200 m ，蓝色颜色标识的水面障碍威胁半径 $R2$ 为 150 m ，绿色颜色标识的水面障碍威胁半径 $R3$ 为 100 m ，设置矩形进场区域 A 、出场区域 B 。

接到开始命令后，切换自主航行模式，对水面静态障碍进行探测和定位，期间需经过指定过航点 $T01$ ，探测完成后到达出场区域 B ，试验结束。试验过程中，检查各项设备是否处于正常工作状态，测量环境是否满足试验要求。

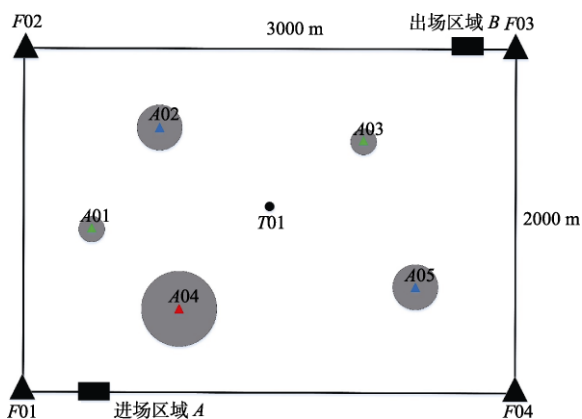


图 6 水面多目标规避能力测试航路规划图

Fig. 6 Route planning of surface multi-target evasion capability test

3.3 考核要求

(1) 被试艇操作员按上述步骤要求操控被试艇；

(2) 试验过程中，被试艇不得驶出 $F01\sim F04$ 坐标点所围成的矩形区域，试验过程中不得进入各水面静态障碍的威胁半径范围内；

(3) 被试艇在试验航行过程中，必须经过指定过航点 $T01$ ；

(4) 被试艇需在 45 min 以内完成探测和定

位，并到达出场区域 B ；

(5) 针对障碍物的颜色及位置识别，被试艇的岸基处理设备应具备输出识别结果的专用显示区域。

针对试验题目要求，在仿真测试场景中和海上设置相同的测试区域及障碍物，分别采用仿真测试和实艇验证的方式进行测试，记录任务完成总时间及过必过点时间用来验证仿真测试系统的时效性，记录绕障碍物的距离以及过必过点的精度，验证仿真测试系统的准确性。时间和精度的对比见表 1、表 2。

表 1 时间对比

Table 1 Time comparison

试验次数	仿真任务完成时间/min	实艇任务完成时间/min	仿真过 $T01$ 时间/min	实艇过 $T01$ 时间/min
1	41.36	41.4	19.54	19.61
2	41.04	41.02	19.12	19.2
3	41.17	41.32	19.33	19.56

表 2 精度对比

Table 2 Accuracy comparison

试验次数	仿真过 $T01$ 精度/m	实艇过 $T01$ 精度/m	仿真绕障碍物的平均距离/m	实艇绕障碍物的平均距离/m
1	0.13	0.98	193.72	202.6
2	0	0.3	156.48	161.52
3	2.59	5.81	166.2	173.51

从时间和精度上来看，仿真较实艇的用时更短一些，并且精度更好。考虑是由于实艇转弯机动造成的，未来将通过改善仿真系统的水动力模型，以提高综合导航模拟器的仿真精度以及时间和精度的准确性。

4 结 语

本文在实验室条件下，利用无人艇综合导航模拟器、任务载荷模拟器，结合可靠性、安全防护性能测试等配试工具，搭建半实物无人艇仿真测试环境，把实艇测试项目提前至陆上系统测试中，可以对航行控制、任务处理流程和算法进行充分测试。另外，设计多种航行任务控制软件测试用例，利用场景构建工具模拟多种海上复杂环

境下的水面/水下目标数据及海洋环境,可以提高算法的鲁棒性,减少在实际应用中的问题。通过对艇上重要任务载荷的模拟,可以验证整个任务执行流程的正确性,提高系统测试效率。

参 考 文 献

- [1] 刘建. 水面无人艇路径规划技术的研究[D]. 南京: 江苏科技大学, 2014.
- [2] 彭艳, 葛磊, 李小毛, 等. 无人水面艇研究现状与发展趋势[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, 25(5): 10.
- [3] 刁海龙. 反水雷、反潜、反导和反恐的利剑——无人水面艇系统[J]. 水雷战与舰船防护, 2011, 19(1): 1-5.
- [4] 刘延斌, 金光. 半实物仿真技术的发展现状[J]. 光机电信息, 2003(1): 27-32
- [5] 徐平, 王伟, 林德福, 等. 基于无人机平台的制导控制半实物仿真系统研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2012(4): 74-78.
- [6] 吴恭兴, 邹劲, 孙寒冰, 等. 高速无人艇的运动建模及其视景仿真[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(1): 9-13.
- [7] 陈铭. 高速无人艇模型及航速/航向解耦控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [8] 张凯, 姜静, 张树团, 等. 基于 VC 的某型无人机半实物仿真器设计[J]. 仪表技术, 2015 (3): 35-37.
- [9] 李云鹏, 刘勇. 一种沙盒测试环境构建系统及构建方法: 中国, 103699479B[P]. 2018-02-02.
- [10] 边信黔, 牟春晖, 严浙平, 等. 基于故障树的无人潜航器可靠性研究[J]. 中国造船, 2011, 52(1): 71-79.

- [11] 丁水汀, 鲍梦瑶, 杜发荣. 无人机系统适航与安全性分析方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 233-240.
- [12] Lehmann D, Henriksson E, Johansson K H. Event-triggered model predictive control of discrete-time linear systems subject to disturbances[C]. Control Conference, Zurich, July 17-19, 2013.

作者简介:



胥凤驰 (1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人系统仿真测试方向。本文通信作者。



谢杨柳 (1984-), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水面无人艇整艇建造、系统设计、无人装备智能化。



董洁琳 (1997-) 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人系统仿真测试方向。



宋胜男 (1994-) 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无人系统仿真测试方向。



骆福宇 (1979-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为水面无人艇整艇建造、系统设计、无人装备智能化。

[引用格式] 朱鹏祥, 李培正, 马赛男, 等. 考虑浮绳联结的双无人船艇系统协同控制策略研究[J]. 无人系统技术, 2022, 5(1): 88-97.

考虑浮绳联结的双无人船艇系统协同控制策略研究

朱鹏祥^{1,2}, 李培正³, 马赛男³, 骆曹飞³, 马勇^{1,2}

(1. 武汉理工大学航运学院, 武汉 430063; 2. 内河航运技术湖北省重点实验室, 武汉 430063;
3. 浙江嘉蓝海洋电子有限公司, 舟山 316000)

摘要: 针对青岛等海域浒苔泛滥成灾的问题, 开展了由浮绳柔性连接两艘水面无人船艇构成的双无人船艇系统协同控制策略研究, 通过双无人船艇系统清扫浒苔, 并将其拖运至海岸。考虑系统中的无人船艇动力、浮绳力矩和水流产生的干扰力矩, 建立了欠驱动无人船艇三自由度动力学模型, 提出了基于距离的包含编队和跟踪两个模式的协同控制策略。双无人船艇系统作业时, 结合系统受力、距离关系等智能选择合适的协同模式。相比于其他类似控制策略, 本文控制策略的稳定性明显提高并拥有一定的抗干扰能力。仿真实验给出双无人船艇协同控制系统可胜任浒苔清扫任务, 证实了上述控制策略的有效性。

关键词: 浒苔泛滥; 水面无人船艇; 协同控制; 目标围捕; 两船艇浮绳联结模型; 浮绳形态模拟

中图分类号: U664.82 文献标识码: A 文章编号: 2096-5915(2022)1-88-10

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2022.1.010

Research on Cooperative Control of Surface Unmanned System Platform

ZHU Pengxiang^{1,2}, LI Peizheng³, MA Sainan³, LUO Caofei³, MA Yong^{1,2}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; 3. Zhejiang Jialan Ocean Electronics Company Limited, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Aiming at the problem that Enteromorpha proliferate in Qingdao and other sea areas, the cooperative control strategy of double unmanned boat system composed of two surface unmanned boats flexibly connected by floating rope is studied. Enteromorpha prolifera is cleaned and towed to the coast by double unmanned boat system. A three degree of freedom dynamic model of underactuated unmanned boat is established by considering the dynamics of unmanned boat, the moment of floating rope and the interference moment caused by water flow; A distance based cooperative control strategy including formation and tracking modes is proposed. During the operation of the double unmanned boat system, the appropriate cooperation mode is selected intelligently in combination with the force and distance relationship of the system. Compared with other similar control strategies, the stability of the control strategy in this paper is significantly improved and has a certain anti-interference ability. The simulation results show that the dual unmanned boat cooperative control system can win the task of Enteromorpha prolifera cleaning, which proves the effectiveness of the above control strategy.

Key words: Enteromorpha Prolifera; Surface Unmanned Boat; Collaborative Control; Target Rounding Up; Two

收稿日期: 2021-08-29; 修回日期: 2021-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(52022073, 62073251); 湖北省自然科学基金(2020CFA055)

Ship Floating Rope Connection Model; Shape Simulation of Floating Rope

1 引 言

山东青岛附近海域再次遭受了浒苔侵袭, 目前当地已经组织人员打捞了 24 万吨, 今年已经是连续第 15 年遭受浒苔灾害。通常的解决措施是人工乘坐船舶在海里打捞浒苔再转运到海岸, 但这种方法效率很低, 而且打捞成本较高^[1]。若浒苔不加处理, 大量的浒苔相互堆积, 会导致水体发臭, 危害当地生态环境。

美国、以色列等国较早地开展了无人船艇技术研究的国家, 推动了无人船艇技术的快速发展^[2-4]。当前, 越来越多的国家和地区投入到无人船艇的研制工作中。考虑到无人船艇具有机动灵活、操纵性好和自主航行等优点^[5], 拟由一根浮绳连接两艘欠驱动无人船艇, 形成双无人船艇系统, 将浒苔拖至海岸。此类具有物理连接的双无人船艇系统可承担清理海上溢油和水面垃圾、清除核生化污染、建设浮船坞, 以及救助落水人员与失事船只等任务^[6-8]。双无人船艇系统相对于单艘无人船艇, 其容错性能、协同导航水平和搭载能力等优势明显^[9], 可承担更为复杂的任务。

在多无人船艇协同系统的研究方面, 国内学者的研究主要侧重在船艇体性能设计与多船艇协同导航算法方面, 较少关注协同运动控制及行为决策等方面的研究^[10]。文献[11]开展了多无人船艇协同编队控制的基础理论研究。文献[12]研究了多个动态领航船的欠驱动无人船艇的包含控制问题, 提出了静态和动态领导者的包含控制算法, 设计了跟踪控制器。文献[13]开展了多无人船艇编队算法和避障策略的工作。文献[14]设计了一种适用于特定响应的多无人船艇导航、制导和控制框架。文献[15]总结了多机器人定位的协同算法和技术、多机路径规划及冲突避免方法和并行任务的分配方法。

在存在连接体的无人船艇相关协同控制研究方面, 文献[16]以带有浮绳连接的两艘无人船艇为研究对象, 基于零空间协同的行为控制策略考

虑了浮绳力矩对船艇的干扰, 完成了溢油回收任务。文献[17]开展了连接水下电缆的多无人船艇动力学建模与运动仿真工作。文献[18]模拟了一个多无人船艇的数字海洋环境, 设计了一种行为驱动的人工免疫模糊分类器。

本文重点关注欠驱动双无人船艇系统的协同控制策略, 考虑系统的作业约束及运动学约束, 借鉴现有的多水面无人船艇或多机器人编队控制策略^[11-15], 体现欠驱动特性, 以设计出基于距离的协同运动控制策略, 进而解决双无人船艇系统协同作业清理浒苔问题。

2 双无人船艇系统作业约束条件

如图 1 所示, 在浒苔清理任务中, 可通过两艘水面无人船艇与浮绳联结形成双无人船艇系统, 由系统协同作业清理浒苔, 并将其拖运海岸。

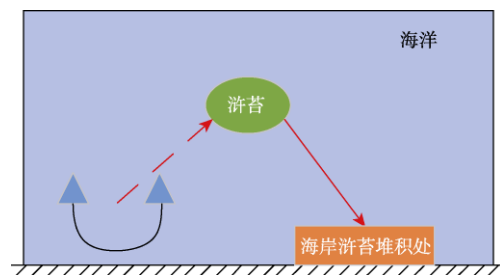


图 1 双无人船艇系统清理水面浒苔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cleaning water surface Enteromorpha by double unmanned boat system

由浮动柔性绳联结的双无人船艇系统结构如图 1 所示, 为了浒苔被有效捕获, 需考虑如下约束条件, 以实现协调运动。

- (1) 作为编队, 必须控制系统的核心位置即两船艇的重心, 实时获取编队的位置。
- (2) 假设一艘无人船艇向左, 另一艘船艇向右, 通过控制编队的角度和前进方向, 来确保系统以正确的方向接近浒苔。
- (3) 两无人船艇之间的距离必须小于绳索的长度, 同时必须保持一定的距离, 避免相互碰撞。

(4) 系统应协调运动, 左船艇需要谨慎向右转向、右船艇需要谨慎向左转向, 避免撞向后方的浮绳。

3 水面无人船艇三自由度运动模型

船舶位姿可参考造船与轮机工程学会 (SNAME) 推荐的符号体系, 如表 1 所示。

表 1 船舶位姿符号体系
Table 1 Ship pose symbol system

自由度	名称	力矩	线(角)速度	位置与欧拉角
1	纵荡	X	u	x
2	横荡	Y	v	y
3	垂荡	Z	w	z
4	横摇	K	p	Φ
5	纵摇	M	q	θ
6	艏摇	N	r	φ

考虑到浒苔清扫作业为水平面运动, 故无人船艇采用三自由度运动模型, 仅计及纵荡、横荡与艏摇运动, 即 $\eta = [x \ y \ \varphi]^T$, $v = [u \ v \ r]^T$ 。通常, 无人船艇无侧向推进器, 如图 2 所示, 能够输入控制变量的为纵向推进力 F_u 与回转力矩 T_r [16]。

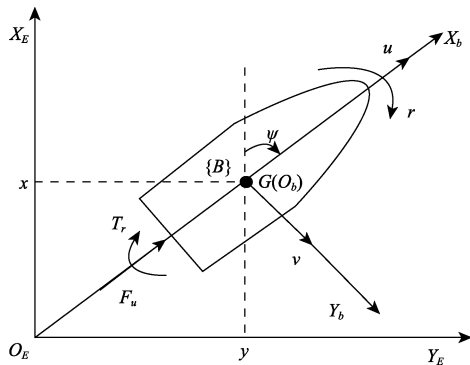


图 2 无人船艇三自由度运动模型 [16]

Fig. 2 Three degree of freedom motion model of unmanned boat [16]

式(1)给出无人船艇三自由度数学模型:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau_e + \tau_c + \tau_f \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\eta = [x \ y \ \varphi]^T$, $v = [u \ v \ r]^T$, $\tau_c = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$, τ_e 为无人艇受到的风、浪、海流等环境的干扰力, τ_f 为浮缆在水中的拉力, m 为无人艇质量。

M 为惯性质量矩阵; $C(v)$ 为向心力和科氏力系数矩阵; $D(v)$ 为阻尼矩阵; M 、 $C(v)$ 、 $D(v)$ 表示为:

$$D(v) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & 0 \\ 0 & 0 & I_z - N_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv + Y_v v \\ 0 & 0 & mu - X_u u \\ mv - Y_v v & -mu + X_u u & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4 双无人船艇系统协同策略设计

4.1 双无人船艇重心

用于清扫浒苔任务的双无人船艇系统受力分析图如图 3 所示。两艘无人船艇的中点为系统的重心 O , 以重心 O 为协同策略中的虚拟导航点。式(5)为其位置方程:

$$O_{x,y} = f(PL, PR) = \left(\frac{PL_x + PR_x}{2}, \frac{PL_y + PR_y}{2} \right) \quad (5)$$

式中, PL 和 PR 分别为左右无人船艇的位置, PL_x , PL_y , PR_x , PR_y 分别为左无人船艇横坐标、左无人船艇纵坐标、右无人船艇横坐标和右无人船艇纵坐标。

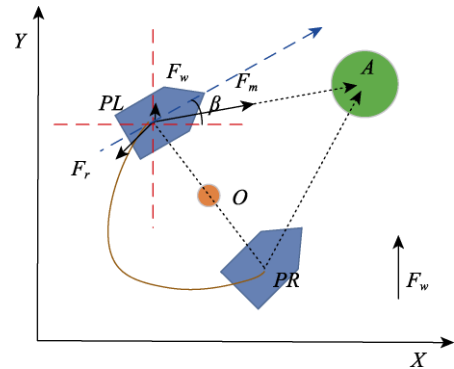


图 3 无人船艇清扫浒苔

Fig. 3 Unmanned boat cleaning Enteromorpha prolifera

4.2 双无人船艇间距

控制两艘无人船艇距离的目的是避免无人船艇距离太近发生碰撞或防止无人船艇距离过远将浮绳拽断, 因此, 必须控制两艘无人船艇间距在合适的阈值内。如图 3 所示, 该函数的表示式为:

$$\sqrt{(PL_x - PR_x)^2 + (PL_y - PR_y)^2} < (a, b) \quad (6)$$

式中, (a, b) 为两艘无人船艇间距的阈值, 在后续模式切换中, 引入状态缓冲值 c , 用来提高系统的稳定性。

4.3 水流干扰

为了针对实际情况对无人船艇航行过程进行模拟, 本文利用无人船上的水流流速流向传感器探测无人船航行位置, 实时记录水流的流速和流向, 并根据水流的流向绘制出图 4 所示包含水流信息的栅格地图^[19]。每个栅格内都有一个代表水面上水流方向的箭头, 可以看出相邻两个栅格间水流方向虽然有一定差异, 但是差异较小。图 4 中间有两个栅格水流方向与周围差异很大(无人船艇必经过这两个栅格), 这是为了测试系统能够满足特殊水流的情况。



图 4 水流栅格地图
Fig. 4 Flow grid map

4.4 无人船艇艏向角

计算无人船艇艏向角, 如图 3 所示, β 为无人船艇前进方向与水平方向的夹角, 而无人船艇前进方向应是作用于无人船艇的合力方向, 合力包括水流阻力、浮绳拉力和无人船艇动力。取此时的水流方向垂直向上, 以 PL 无人船艇为例, 因此, 艏向角的函数被定义为:

$$F_{temp} = \sqrt{F_m^2 + F_w^2 + 2F_m F_w \cos(w - m)} \quad (7)$$

$$F_{all} = \sqrt{F_{temp}^2 + F_r^2 + 2F_{temp} F_r \cos(r - \alpha - m)} \quad (8)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{F_w \sin(w - m)}{F_m + F_w \cos(w - m)}\right) \quad (9)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{F_r \sin(r - \alpha - m)}{F_a + F_r \cos(r - \alpha - m)}\right) \quad (10)$$

式中, F_m 、 F_w 、 F_r 和 F_{all} 分别为无人船艇的动力、水流对无人船艇的阻力、浮绳的拉力和无人船艇受到的合力, w 为水流角度, m 为无人船艇动力角度, r 为浮绳拉力角度, α 为无人船艇动力和水流的合力, β 为三个力的合力, 即一艘无人船艇的艏向角。所有的角度都是以 X 轴正方向开始逆时针到力方向的夹角。

在运动过程中, 无人船艇的航向角与目标点的夹角可能非常大。通常, 无人船艇的艏向角 β 不能瞬间变大。因此, 需要考虑无人船艇转向率, 让 β 逐渐趋于目标点。

4.5 双无人船艇系统浮绳分析

图 5 表示浮绳拖曳力对单无人船艇航行的影响, 其中 ψ 为浮绳拖曳力 F_r 与随体坐标系 X 轴形成的夹角, 在大地坐标系下, 可由无人船艇的艏向角推出。 F_x 、 F_y 为 F_r 分别分解到随体坐标系 X 轴、 Y 轴上的力, 设定 T_m 为无人船艇本身能够提供的最大回转力矩。 F_x 可以被无人船艇推进器产生的推力抵消掉, 但会影响到无人船艇的航行速度; 而 F_y 在船艇产生的回转力矩会随着 ψ 的增大而增大, 若产生的 F_y 超过 T_m 的值, 则即使无人船艇提供最大的回转力矩, 无法平衡拖曳力 F_r , 所以产生了横向分离效应。削弱横向分离效应的影响, 不仅需要无人船艇自身提供的回转力要足够大, 还要实时控制艏向角, 避免无人船艇船艏与浮绳力的夹角过大。

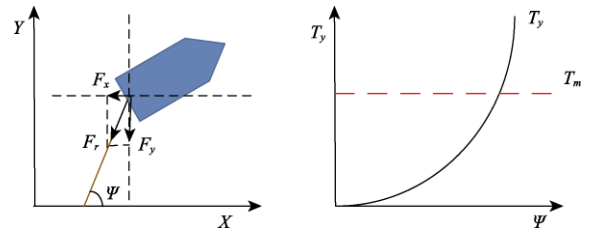


图 5 浮绳力矩分析
Fig. 5 Moment analysis of floating rope

忽略柔性浮绳在运动中的拉伸形变,当浮绳在水中处于张紧状态时,可将浮绳形状近似成悬链,悬链的形状通常可以类比成在空气中一段链状物只受重力影响的情况。根据文献[20]所述,水流中的阻力使浮绳发生形态变化,与悬链挂在空气中因为重力产生形态变化的情况相似。无人船艇在恒定流速的水流中稳定航行,假设柔性浮绳与水流速度方向成恒定角度,浮绳的形状可以近似表示为一段悬链,悬链曲线在坐标系中可以表示为:

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (11)$$

此曲线表示了等高悬链方程的一般形式,其中, a 为常数,是曲线顶点到横坐标轴的距离。如图 6 所示,水流速度 w 的方向为 Y 轴正方向,设定此坐标轴的原点为两艘无人船艇的队形中心,故水流速度与无人船艇队形中心的运动速度方向相反。

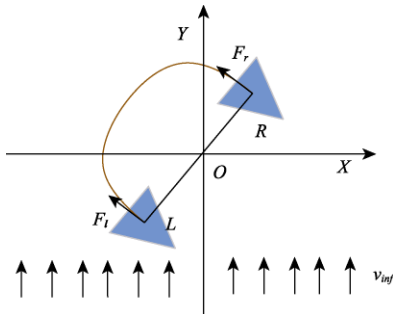


图 6 浮绳的形状曲线

Fig. 6 Shape curve of floating rope

在无人船艇运动过程中,两船艇间的距离不断变化。因此,浮绳也应是不断变化的,为了模拟该场景,需要根据无人船艇的位置反解出 a 的数值,即求出不断变化的具体函数。由于此反解过程涉及超越函数,因此采用泰勒展开式逼近解析,最后求解一元多次方程得到 a ,求解过程如下:

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{a} - 1\right) \quad (12)$$

$$t \frac{y_0}{x_0} = 1 + \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!} + \dots + (-1) \quad (13)$$

式中, $t = \frac{x_0}{a}$, $t \neq 0$, x_0 和 y_0 为无人船艇的位置坐标。

4.6 基于距离的协同控制策略实现

基于两船艇距离的协同控制策略分为编队模式和跟踪模式。编队模式:在无人船艇航行中,当船艇间距在合适阈值内时,每艘无人船艇向目标点航行,当船艇间距不在合适阈值内,抑制距目标点近的无人船艇动力,组成捕获目标的编队;跟踪模式:在无人船艇航行中,虚拟导航点(两船艇重心)实时跟踪目标点,两船艇保持与导航点相同的艏向角。其中,两种模式都遵循相同的间距控制策略。

参考式(6),间距控制策略是当两船艇间距小于 a 时,无人船艇动力 F_m 向左侧调整 30° ,导致分力拉开两船艇间距。同理,另一艘无人船艇向右侧调整 30° 。此时,引入状态缓冲值 c ,两船艇间距合适的阈值调整为 $(a+c, b)$,即两船艇间距大于 $a+c$ 时,无人船艇恢复原先的艏向角。当两船艇间距大于 b 时,处理方式与上述描述相反。由于两艘无人船艇拥有同一个目标(编队模式)或者相同的艏向角(跟踪模式),故间距不易扩大,只有在特殊水流干扰和浒苔阻力过大时,才可能扩大间距。

编队模式切换到跟踪模式的条件:当两船艇与目标点的距离相等且两船艇间距离保持在合适阈值内时,系统由编队模式进入跟踪模式,表示为式(6)和下式:

$$\sqrt{(A_x - PL_x)^2 + (A_y - PL_y)^2} = \sqrt{(A_x - PR_x)^2 + (A_y - PR_y)^2} \quad (14)$$

跟踪模式切换到编队模式的条件:当两船艇与目标点的距离之差大于固定值且两船艇间距离不在合适阈值内时,系统由跟踪模式进入编队模式。

通过以上特殊名词的解释,并基于距离的协同控制策略,浒苔清扫任务可以描述为以下 3 个步骤:

(1) 根据浒苔分布于海边的特征,可以通过手持式 GPS 测量仪测得浒苔泛滥处的位置;

(2) 根据双无人船艇、浒苔和海岸浒苔回收处的位置以及双无人船艇完成任务时的位姿约束条件, 规划无人船艇的航迹。在水流的影响下, 浒苔的位置不断变化, 故无人船艇的航迹也应不断变化, 浒苔变化的位置可以通过放置在浒苔中的 GPS 发射器获得;

(3) 对所述的航迹进行路径跟踪, 由于两船艇距浒苔的距离不相等, 为了更方便捕获浒苔, 控制策略首先切换到编队模式, 调整双无人船艇编队, 等满足条件时, 进入跟踪模式, 提高系统稳定性, 之后两种模式不断切换, 直到两船艇包裹住浒苔, 并拖动浒苔驶向海岸浒苔回收处, 完成浒苔清扫任务。其中, 间距控制策略作用于整个过程。

文献[16]分析了柔性连接式双无人船艇完成溢油围捕任务过程中两艘无人船艇的具体行为: 轨迹跟踪、保持队形、溢油围捕、速度动态调整等行为, 并设定行为的优先级; 使用零空间策略 (Null-Space-Base, NSB) 按照行为的优先级进行行为融合, 计算出两艘无人船艇的实时期望航向。与文献[16]相比, 本文提出的控制策略无须将行为排序, 且依据无人船艇的结果反馈控制艏向角。其优势体现在, 不同模式切换间的状态缓冲和跟踪模式下不改变无人船艇动力方向, 使得系统稳定性明显提高。

5 仿真结果及分析

5.1 双无人船艇系统清扫浒苔过程

本文仿真基于 Python 的 pyglet 模块模拟实现, 仿真中设定无人船艇动力 70 PS、空载浮绳拉力 5 kN、满载浮绳拉力 30 kN、无人船艇最大转向角 30° 、浮绳深度 150 m、船艇间距离下限 80 m、船艇间距离上限 100 m、状态缓冲值 10 m 等, 双无人船艇系统基于两船艇距离的协同控制策略完成浒苔清扫任务的大致过程如图 7 所示。

图 7(a)表明任务开始, 两船艇进入编队模式, 调整双无人船艇位置; 图 7(b)表明完成编队模式进入跟踪模式, 两船艇的艏向角同虚拟导航点相

同, 图中可以发现两船并没有指向同一方向, 是由于水流的干扰导致间距变化, 从而间距控制策略发挥作用, 拉开两船艇间距; 图 7(c)表明两船艇已包围浒苔; 图 7(d)表明两船艇拖动浒苔进入编队模式, 并且浮绳的拉力逐渐增加, 直到 30 kN 为止; 图 7(e)表明浮绳在最大负载下两船艇由编队模式再次进入跟踪模式; 图 7(f)表明两船艇拖动浒苔到达海岸浒苔回收处, 完成本次浒苔清扫任务。

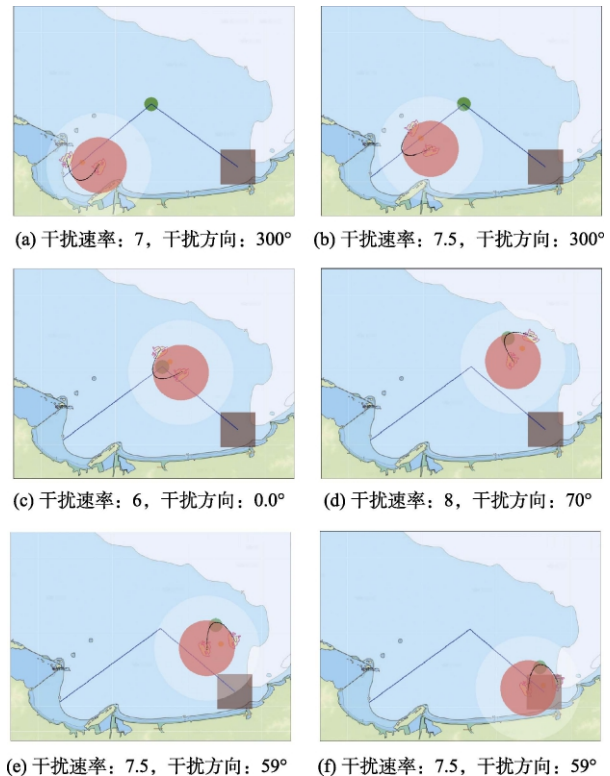


图 7 系统执行浒苔清扫任务 (a~f 顺次执行)

Fig. 7 System performs Enteromorpha cleaning task (a-f in sequence)

5.2 双无人船艇系统轨迹

图 8 为通过浮绳连接两艘水面无人船艇构成双无人船艇协同, 由协同系统清扫浒苔并将其拖运至海岸的航迹曲线。从图 8 和图 7 可以得出, 本文提出的控制策略能够完成浒苔清扫任务。图 9 为文献[16]中无人船艇的行驶轨迹曲线, 对比图 8 可以看出, 在本文控制策略下执行跟踪模式的轨迹相比于文献[16]中的轨迹更加平滑, 几乎未发生转向。因此, 本文的控制策略能够提高系统的稳定性。

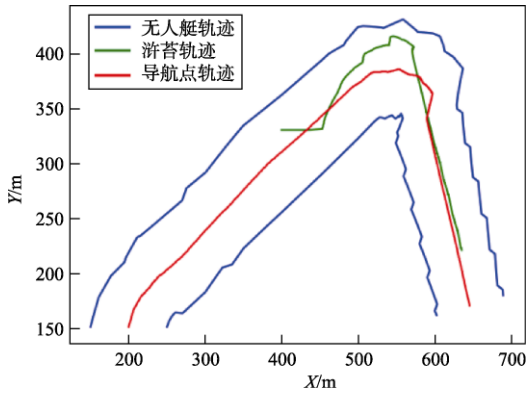


图 8 无人船艇围捕浒苔轨迹

Fig. 8 Tracking of *Enteromorpha prolifera* encircled by unmanned boats

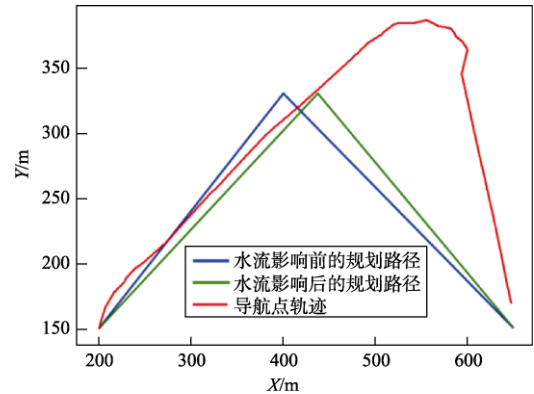


图 10 误差曲线图

Fig. 10 Error curve

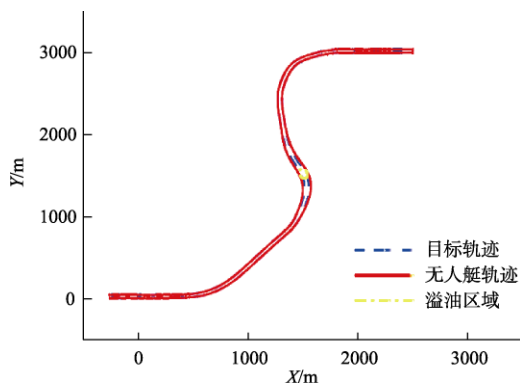


图 9 无人船艇的行驶轨迹^[16]

Fig. 9 Trajectory of unmanned boat^[16]

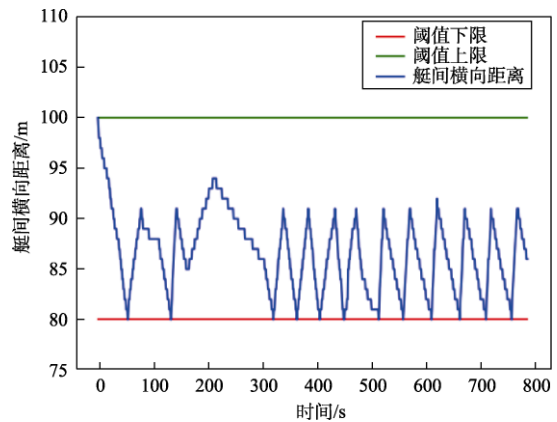


图 11 双无人船艇间横向距离

Fig. 11 Lateral distance between two unmanned boats

图 10 为误差曲线图，由于水流的影响，规划路径不断变化。蓝色折线为任务开始时的规划路径，绿色折线为浒苔被拖动后的规划路径，折点为浒苔位置。双无人船艇从任务开始到拖动浒苔的时间里，浒苔在水流的影响下，从蓝色折点流到绿色折点。由图 10 可知，在双无人船艇拖动浒苔之前，导航点（两船艇重心）一直在两条规划路径内，符合期望轨迹；在无人船艇拖动浒苔后，由于无人船艇有限的转向角和惯性作用，无人船艇转向轨迹为弧形，而规划路径没有考虑这些。从图 7 和图 8 可知，该协同系统能够完成浒苔清扫任务。

5.3 双无人船艇间距

两艘无人船艇纵向距离随时间的变化关系如图 11 所示。任务开始时，两船艇处于编队模式且拥有同一个目标。因此，其距离不断拉近，当两者距离等于 80 m 时，调整左船艇艏向角向左侧

偏移 30°，使无人船艇动力分出一个垂直于另一艘无人船艇的分力，拉开两船艇距离。同理，调整右船艇艏向角向右侧偏移 30°。此时，引入状态缓冲值为 10 m，扩大船间阈值，让两船艇继续拉开船间距离，直到 90 m 为止。由于同一个目标，两船艇距离会再次等于 80 m，之后继续拉开，此过程往返进行，直到任务结束。在图 11 中，大约 220 s 处（设置了与无人船艇运动相垂直的急速水流），船艇间横向距离达到了 95 m，之后又回到 90 m 以内，此处是为了测试系统稳定性。由图可知，该系统仍然可以正常运行。因此，该控制策略拥有一定的抗干扰能力。

两艘无人船艇纵向距离随时间的变化关系如图 12 所示。纵向距离是目标点距两船艇之间距离的差值，此图可反应出两船艇的编队是否适合围捕浒苔。例如，船艇间纵向距离约等于 0 m 时，

说明两船艇距目标点的距离近似相等, 即两船艇的垂直平分线近似穿过目标点, 也就是两船艇的艏向角和船艇间距离能够围捕目标。在图 12 中, 大约 300s 处, 双无人船艇开始拖动浒苔(图 7(c)), 此时目标点由浒苔转为岸边的浒苔回收处, 两船艇间的纵向距离突然增大。此时, 控制策略中的编队模式开始调整双无人船艇编队, 使之逐渐形成拖动浒苔的编队。

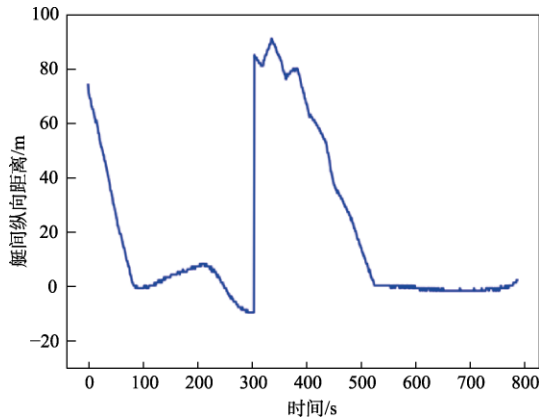


图 12 双无人船艇间纵向距离
Fig. 12 Longitudinal distance between two unmanned boats

图 13 表示两艘无人船艇艏向角随时间变化的曲线, 其中以正上方为 0°, 顺时针增加角度。由于水流的影响和横轴时间跨度小导致图中双无人船艇艏向角一直在明显地变化, 在 400 s 处右船艇的艏向角变化巨大, 是因为浮绳拉力太大, 又处于编队模式中, 从而右船艇不断调整艏向角, 但从图 13 的 150~300 s 处可以看出, 本文控制策略中跟踪模式的优势, 提高系统的稳定性。相比于图 14 所示的无人船艇艏向角实时变化曲线^[16], 本文的控制策略仍有可取之处。

5.4 浒苔阻力对协同系统的影响

以左船艇为例, 作用于无人船艇力的变化如图 15 所示。由于图中无人船艇动力 F_m 、水流阻力 F_w 和浮绳拉力 F_r 不是线性关系, 因此合力 F_{all} 并不是上述 3 个力线性叠加的结果。但是通过此图可以看出, 无人船艇动力的大小保持不变, 水流的阻力变化较小, 浮绳拉力随着浒苔的变化而变化, 合力开始时受水流影响逐渐增加, 直到双

无人船艇拖动浒苔时, 浒苔阻力的不断提高, 导致合力逐渐下降。通过图 15, 合力大小的变化可大致反应出无人船艇速度的变换, 由快转慢。

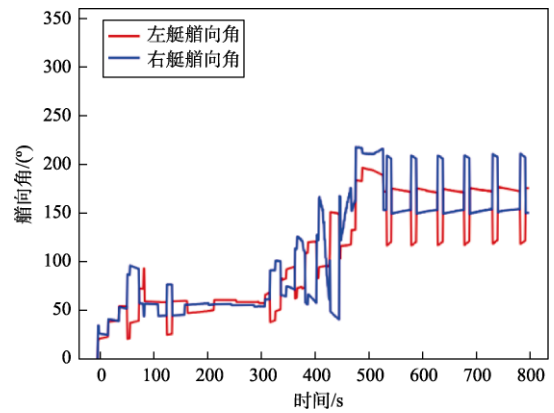


图 13 无人船艇艏向角
Fig. 13 Heading angle of unmanned boat

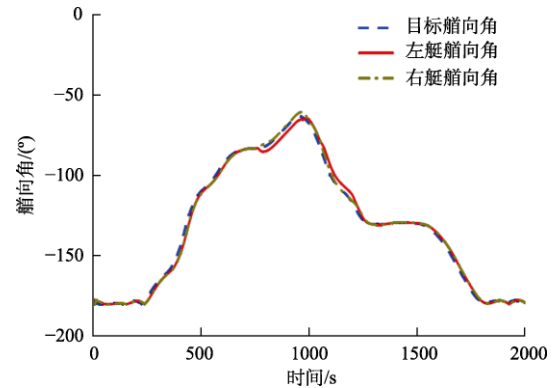


图 14 无人船艇艏向角
Fig. 14 Heading angle of unmanned boat

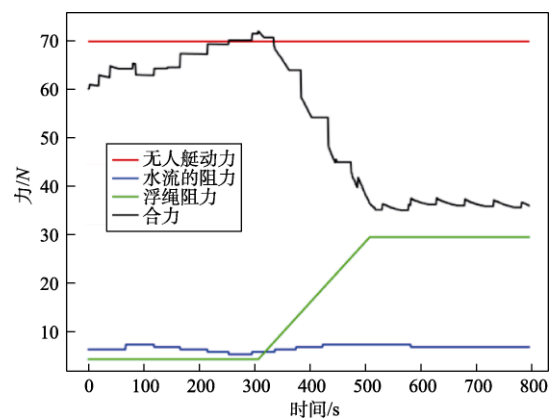


图 15 作用于无人船艇力的变化
Fig. 15 Change of force acting on unmanned boat

两艘无人船艇速率随时间的变化如图 16 所示。在双无人船艇开始任务和拖动浒苔时, 右船

艇距目标点的距离一直小于左船艇距目标点的距离, 为形成捕获浒苔的编队, 控制策略切换到编队模式, 抑制右船艇的速率, 即把右船艇原有的动力 70 PS 降为 23.3 PS; 在其他过程中, 控制策略切到跟踪模式, 导致双无人船艇的速度近乎相等。在图 16 中还可发现, 在 300 s 之前 (浮绳空载阶段) 的平均速度大于 600 s 之后 (浮绳完全拖动浒苔) 的速度, 可见浒苔阻力对双无人船艇系统的影响。

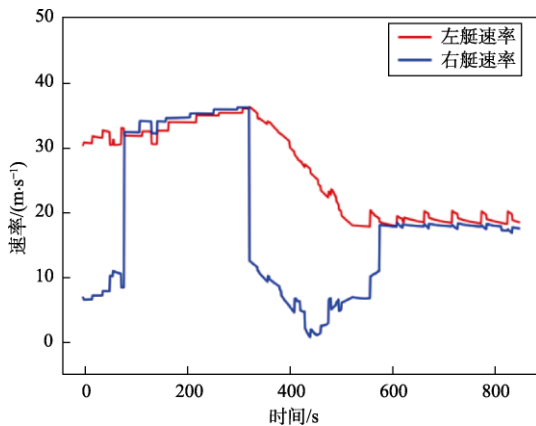


图 16 双无人船艇速率的变化

Fig. 16 Change of speed of double unmanned boat

6 结 论

通过分析双无人船艇协同系统执行浒苔清扫任务的步骤, 设计出基于距离的混合协同控制策略, 解决了系统需要执行多个行为情况下的决策问题, 得到融合控制后输出的艏向角及航速, 搭建了双无人船艇协同系统的仿真试验平台。经验证, 提出的控制策略保障了双无人船艇系统有效协同围捕浒苔。

本文结合协同行为控制提出了基于距离的混合控制策略, 实际作业中需要准确预测浒苔位置、精确浮绳拉力随浒苔数量的变化而变化以及复杂水流等作业环境扰动, 上述工作将是今后进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] 刘春兰. 青岛浒苔暴发因素的探讨及对策[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(4): 1695-1698.
- [2] Shao G, Ma Y, Malekian R, et al. A novel cooperative platform design for coupled USV - UAV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 4913-4922.
- [3] Ma Y, Zhao Y, Incecik A, et al. A collision avoidance approach via negotiation protocol for a swarm of USVs[J]. Ocean Engineering, 2021, 224(5):108713.
- [4] 何玉庆, 秦天一, 王楠. 跨域协同: 无人系统技术发展和应用新趋势[J]. 无人系统技术, 2021 (4): 1-13.
- [5] Arrichiello F, Heidarsson H, Chiaverini S, et al. Cooperative caging using autonomous aquatic surface vehicles[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2010.
- [6] Jimenez J F, Giron-Sierra J M. USV based automatic deployment of booms along quayside mooring ships: Scaled experiments and simulations[J]. Ocean Engineering, 2020, 207: 107438.
- [7] Chandurkar K, ParinayLavatre D, Bawane N. An improved river cleaning system[J]. Annals of the Romanian Society for Cell Biology, 2020, 24(2): 333-339.
- [8] Mansor H, Norhisam M H, Abidin Z Z, et al. Autonomous surface vessel for search and rescue operation[J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2021, 10(3): 1701-1708.
- [9] Ma Y, Hu M, Yan X. Multi-objective path planning for unmanned surface vehicle with currents effects[J]. ISA Transactions, 2018, 75: 137-156.
- [10] Zhang X, Wang C, Jiang L, et al. Collision-avoidance navigation systems for maritime autonomous surface ships: A state of the art survey[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: 109380.
- [11] 刘彬. 多无人艇协同编队控制理论及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [12] 刘伟. 多无人艇包含控制问题研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [13] Yan X, Jiang D, Miao R, et al. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi-USV system based on virtual structure and artificial potential field[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 161.
- [14] Mina T, Singh Y, Min B C. Maneuvering ability-based weighted potential field framework for multi-USV navigation, guidance, and control[J]. Marine Technology Society Journal, 2020, 54(4): 40-58.
- [15] 张辰, 周乐来, 李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2020(2):1-8.
- [16] 李彦莹. 柔性连接式双无人艇自主协同控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [17] Hong S M, Ha K N, Kim J Y. Dynamics modeling and motion simulation of USV/UUV with linked underwater cable[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(5): 318.
- [18] Nantogma S, Pan K, Song W, et al. Towards realizing intelligent

coordinated controllers for multi-USV systems using abstract training environments[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(6): 560.

- [19] 张琪. 全区域覆盖自主移动无人船路径规划研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [20] Sonnenburg C R, Woolsey C A. Modeling, identification and control of an unmanned surfaced vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(3): 371-398.

作者简介:



朱鹏祥 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能航行系统与多智能体协同控制。



李培正 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为船舶通信导航技术、无人艇技术。



马赛男 (1984-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电子与信息工程/无人艇总体设计/智能航行控制。



骆曹飞 (1984-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为智能船舶/无人艇通信技术、航行控制技术。



马勇 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶智能航行理论与技术、智能海事保障技术。本文通信作者。

《无人系统技术》

第一届理事会

理事长单位

中国航天科工飞航技术研究院

副理事长单位

北京海鹰科技情报研究所

谷满仓 / 所长

西北工业大学无人系统技术研究院

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

符文星 / 副院长

海鹰航空通用装备有限责任公司

马洪忠 / 党委书记 / 董事长

哈尔滨工业大学航天学院

郭继峰 / 副院长

理事单位

北京特种机械研究所

吴向阳 / 副所长

成都飞机工业（集团）有限责任公司

肖良华 / 主任设计师

湖南航天机电设备与特种材料研究所

王文鹏 / 副所长

贵州航天天马机电科技有限公司

董超 / 机器人分公司副总经理

航天科工深圳（集团）有限公司

于道林 / 总工程师 / 创新院院长

航空工业新航集团 116 厂

杨书华 / 总工程师

中国工程物理研究院总体工程研究所

冯高鹏 / 主任

内蒙古北方重工业集团有限公司装备研究所

武宝军 / 所长

北京青云航空仪表有限公司

秦乐 / 飞控设计部部长

河北太行机械工业有限公司

李增良 / 总经理

■ **西南计算机有限责任公司**

易图明 / 副总经理

■ **中国船舶重工集团公司第七一三研究所**

吴幼冬 / 集团公司首席专家

■ **北京机电工程总体设计部**

钟世勇 / 部主任

■ **中国人民解放军第五七一八工厂**

文永明 / 军民融合产业园总指挥

■ **中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所**

王合龙 / 副所长 / 总工程师

■ **成都陵川特种工业有限公司**

刘 玮 / 副总经理

■ **西北工业集团有限公司**

李文革 / 副总经理

■ **中国兵器工业导航与控制技术研究所**

李跃军 / 智能化技术研究室主任

■ **四川九洲电器集团有限公司**

李 捷 / 副总工程师

■ **凯迈（洛阳）测控有限公司**

刘志广 / 研发部部长

■ **柳州长虹航天技术有限公司**

唐卫国 / 董事长

■ **哈尔滨第一机械集团有限公司**

余 斌 / 董事长

■ **中电科技集团重庆声光电有限公司**

汤劲松 / 集团首席专家

■ **北京理工大学机电学院**

余庆波 / 教授

■ **中国久远高新技术装备有限公司**

陈兴无 / 研发中心主任

■ **泰安航天特种车有限公司**

禹东方 / 副总经理

■ **西南技术物理研究所**

任 刚 / 副总经理

■ **天航星云国际防务技术研究院（北京）有限公司**

李承云 / 董事长

■ **中国航发控制系统研究所**

季春生 / 副总工程师

■ **哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所**

乔立岩 / 副所长

■ **上海航天控制技术研究所**

李同顺 / 所长

■ **中科航星科技有限公司**

杨晓洁 / 常务副总经理

■ **航天时代飞鸿技术有限公司**

郭 茜 / 副总经理

■ **中国电科网络通信研究院
（中国电子科技集团第五十四研究所）**

文运丰 / 院长

■ **中电防务科技有限公司**

张志辉 / 研究院副院长

共同

战“疫”

【工作场所篇】

勤通风 常清洁
戴口罩 少聚集
手勤洗 别大意

特别提示:

积极配合工作场所疫情防控各项要求，如有发热、乏力、干咳等症状，应及时报告并就医。

中宣部宣教局、国家卫生健康委宣传司 指导
中国健康教育中心 制作



征稿启事

《无人系统技术》期刊

《无人系统技术》期刊是由中国航天科工集团有限公司主管，北京海鹰科技情报研究所主办，中国无人系统产业联盟（筹）、西北工业大学无人系统发展战略研究中心、西北工业大学无人系统技术研究院联合协办的学术期刊。现诚挚地向无人系统技术研究领域的专家学者、学术带头人以及致力于无人系统理论与技术创新研究的科技工作者约稿。

◆ 约稿方向

稿件内容以综述、研究论文、技术报告、专题研讨和科技评述等形式为主，广泛报道无人空中系统、无人地面系统、无人水面水下系统、智能机器人等研究领域的理论研究成果、技术创新、学术见解和经验总结。主要包括无人系统平台技术、自动控制技术、信息技术以及人工智能、通信、传感器等技术在无人系统领域的新应用。同时，也包括无人系统自主技术、协同技术、跨域同步技术、智能无人系统伦理及其与有人系统的关系等。

◆ 投稿方式

通过期刊采编系统进行投稿，网址：<http://umst.cbpt.cnki.net/>，或直接搜索“无人系统技术”。

◆ 投稿要求

1. 本刊选录稿件主要视其是否有创新点及其价值大小，并综合考虑：立题的科学 / 工程意义；对科研进展的了解和引用；方法或其应用的创新性；方法和论证的科学性；结论 / 结果的合理可信性和写作质量。
2. 投稿时须提交电子版“保密审查证明”，稿件正式录用后请将“保密审查证明”“版权转让协议”原件邮寄至：北京 7254 信箱 4 分箱《无人系统技术》编辑部，邮编：100074，电话：010-68191488。

◆ 写作要求

1. 来稿应含中英文题目、中英文摘要（说明研究目的、创新试验方法、研究成果和最终结论等，重点是方法创新和成果结论。中英文摘要对应，英文摘要在 250 个实词左右）、关键词（5 ~ 8 个）。引言应说明课题的背景，引述该领域的国内外同行已经取得的进展，以说明本文的选题意义和创新点所在。
2. 量和单位应符合国家规定。外文字符要分清大小写、正斜体，上下角字符的位置高低应区别明显。图、表应提供中英文图题、表题。
3. 参考文献引用应遵循“最新、关键、必要和亲自阅读过”的原则；在正文中顺次引述；数量以不少于 20 篇为宜，未公开发表的资料一般不宜引用。
4. 需提供全部作者简介，内容包括：姓名、出生年、性别、学位、职称、研究方向、照片等。

◆ 关于稿酬

暂不收取版面费、审稿费，稿件一经录用，将按照字数和文章质量情况，向作者一次性支付稿酬。

顾 问

李德毅 封锡盛 李伯虎 徐德民 刘永才 费爱国 樊邦奎 陈 杰
魏毅寅 向锦武 王长青 王飞跃

第二届编委会

主 任 李风雷

副 主 任 谷满仓 符文星 宋 斌 张 涛

常务委员 (按姓氏拼音排序)

邓宏彬 郭继峰 李东光 潘 泉 王宏伦 徐 昕

委 员 (按姓氏拼音排序)

昂海松 陈 斌 陈家斌 程 进 戴江勇 方 浩 冯伟强 符小卫 黄长强

姜 梁 李必军 李伟杰 李贻斌 林 平 刘 莉 刘培志 麻广林 马洪忠

孟凡彬 牛轶峰 裴 丽 齐俊桐 任 章 时兆峰 苏玉民 孙富春 孙智孝

陶 溢 田大新 万 帅 韦锦峰 吴向阳 夏元清 谢少荣 徐海刚 颜国正

薛建儒 杨宏晖 于林宇 张 宁 张卫平 赵 杰 朱小燕 Dan ZHANG

Simon X.YANG Yang SHI Youmin ZHANG

无人系统技术

2018 年创刊 (双月刊)

主管单位: 中国航天科工集团有限公司

主办单位: 北京海鹰科技情报研究所

协办单位: 中国无人系统产业联盟 (筹)

西北工业大学无人系统发展战略研究中心

西北工业大学无人系统技术研究院

主 编: 张冬青

副 主 编: 蔡顺才 孙柏原 李东光 陈少春

执行主编: 王一琳

编辑出版: 《无人系统技术》编辑部

地 址: 北京7254信箱4分箱 (100074)

电 话: 010-68191488 (编辑部)

010-68375084 (发行部)

邮 箱: chinauas310@163.com

网 址: <http://umst.cbpt.cnki.net>

国内发行: 北京海鹰科技情报研究所

印刷单位: 北京博海升彩色印刷有限公司

Administrated by: China Aerospace Science & Industry Corporation Limited

Sponsored by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Co-organized by: Association for Unmanned Vehicle Systems of China

Research Center for Unmanned System Strategy Development, NWPU

Unmanned System Research Institute, NWPU

Editor-in-Chief: ZHANG Dongqing

Associate Editor: CAI Shuncai SUN Baiyuan LI Dongguang CHEN Shaochun

Executive Editor: WANG Yilin

Edited&Published by: Editorial Office of Unmanned Systems Technology

Add: P.O. Box 7254-4, Beijing 100074, China

Tel: (8610) 68191488 (Editorial)

(8610) 68375084 (Circulation)

E-mail: chinauas310@163.com

Website: <http://umst.cbpt.cnki.net>

Distributed by: Beijing HIWING Scientific and Technological Information Institute

Printed by: Beijing BOHS Colour Printing Co., Ltd.

本期责任编辑: 李 志

ISSN 2096-5915

CN 10-1565/TJ

国内定价: 30 元 / 期