

无人船在渔业智慧监管领域的研究与应用综述

李 明¹, 谈名名¹, 蒋朝伟¹, 臧奇颜¹, 张 键¹, 李宏然¹,
袁冬青¹, 刘进涛², 王晨钢², 张 恒^{1*}

(1. 江苏海洋大学计算机工程学院, 连云港 222000; 2. 连云港海关综合技术中心, 连云港 222042)

摘要: 随着智慧渔业的发展, 现代渔业中运用的无人船越来越多。近年来, 无人船凭借出色的自主航行和路径规划能力, 既实现了传统渔业监测和监管的功能, 又弥补了人工监管成本高、效率低的缺陷, 拓宽了无人船在渔业中的应用范围, 显示出巨大的应用潜力。该文系统阐述了无人船在渔业智慧监管中的应用, 包括自主航行、路径规划、水环境监测和水产养殖等方面的关键技术, 并分析了其未来研究方向。分析表明, 无人船搭载高分辨率传感器和智能系统, 可实现对渔船活动的实时监测和非法捕捞行为的自动识别, 提高监管效率和准确性, 同时减少人力需求和降低运营成本。在水环境监测中, 无人船提高了监测的实时性和精确度, 减少了设备投入和相关成本, 并在恶劣环境中表现出色。在水产养殖中, 无人船的智能投喂和施药技术提升了养殖效率和生物健康水平, 降低了养殖成本。最后讨论了无人船在渔业应用中的机遇和挑战, 认为其在低成本制备、多功能集成、新技术开发和应用场景挖掘等方面具有较大的发展潜力, 同时指出提高无人船在复杂条件下的稳定性和可靠性、设计多参数一体化检测系统、开发可靠的自供电模块和拓展应用场景是无人船在智慧渔业领域的重要发展方向。

关键词: 渔业; 监管; 无人船; 环境监测; 智能投喂

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406119

中图分类号: S969

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0015-11

李明, 谈名名, 蒋朝伟, 等. 无人船在渔业智慧监管领域的研究与应用综述[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 15-25. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406119 <http://www.tcsae.org>

LI Ming, TAN Mingming, JIANG Chaowei, et al. Unmanned vessels for smart monitoring and supervision of the fishing industry: Studies, application and challenges[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 15-25. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202406119 <http://www.tcsae.org>

0 引言

传统渔业监管主要依赖于人工巡查和卫星监测, 存在成本高、效率低、实时性差等诸多问题, 难以满足现代渔业管理的需求^[1]。近年来, 随着信息技术和自动化技术的发展, 智慧渔业监管逐渐成为解决渔业资源管理难题的新途径。智慧渔业监管利用先进的传感器技术、数据处理技术和通信技术, 实现对渔业活动的实时监测和管理, 从而提高渔业资源的利用效率, 减少非法捕捞行为, 保护海洋生态环境^[2]。无人船作为智慧渔业监管的重要工具, 因具有自主航行、实时监测和高效处理数据的能力, 得到广泛关注和应用^[3], 不仅扩大了监测范围和提高了监测精度, 还能显著降低监管成本, 提升监管效率, 为渔业管理提供了高效、经济的解决方案^[4]。

智慧监管利用大数据、云计算、人工智能、物联网

和区块链等现代信息技术, 实现高效市场监管, 通过高效处理和分析海量数据, 提前识别和防范潜在风险, 为管理者提供强大的决策支持工具, 并做出快速响应和调整策略, 从而提高监管的整体效率和效果^[5]。智慧监管的应用方向涵盖多个领域, 包括市场监管、环境监测、公共安全、交通管理和医疗卫生等。在渔业领域, 智慧监管可用于渔业资源监测、非法捕捞行为识别、环境监测及水产养殖管理等方面, 不仅提高了渔业资源的利用效率, 减少了非法捕捞行为, 还保护了海洋生态环境, 推动了渔业的可持续发展^[6]。

无人船是智慧渔业监管的重要组成部分, 涉及自主航行、路径规划、环境感知、数据处理和通信传输等多个方面。无人船通过搭载高精度 (global positioning system, GPS)、惯性导航系统和多种传感器, 实现自主航行和避障功能; 利用智能算法进行路径规划, 确保在复杂海洋环境中安全高效地完成任务; 通过高分辨率相机、雷达和声呐等设备实时获取海洋环境和渔业资源信息, 并通过边缘计算和云计算技术实时处理和分析数据; 通过无线通信网络, 将采集到的数据实时传输到地面控制中心^[7]。这些技术的综合应用使无人船能够显著提升渔业资源监测的覆盖范围和精度, 降低监管成本, 提升监管效率, 为渔业管理提供可靠的数据支持^[8]。随着自

收稿日期: 2024-06-18 修订日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61873106, 12401679); 江苏省杰出青年基金 (BK20200049); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (23KJB520006)

作者简介: 李明, 博士, 研究方向为农业数据处理。

Email: minglee2015@126.com

*通信作者: 张恒, 博士, 教授, 研究方向为人工智能。

Email: zhangheng@jou.edu.cn

动化和智能化技术的发展，无人船作为新兴的海洋监测工具，开始在智慧渔业监管领域得到应用^[9]。无人船通过集成导航定位、环境感知、数据处理和通信传输等技术，能够自主或半自主地执行海洋调查、监测、执法、水面垃圾及有害藻类清除等任务^[10]。例如，无人船可以搭载多光谱传感器和声呐系统^[11]，对海洋生物群落进行实时监测，自动识别非法捕捞行为，并及时将数据传输给监管部门^[12]。此外，还可以通过搭载垃圾收集网、机械臂或切割设备，自主或通过人工遥控收集水面上的漂浮垃圾和有害藻类等^[13]。

尽管无人船在智慧渔业监管中展现出巨大应用潜力，但实际应用仍面临诸多挑战，如设备技术限制、法规和标准化缺乏、数据安全问题等^[14]。此外，无人船在复杂海洋环境中的稳定性和可靠性也亟待提高。因此，有必要对无人船在渔业智慧监管中的应用进行系统研究，探讨其关键技术、应用现状及未来发展方向^[15-16]。本文首先对国内外渔业监管无人船的应用现状作系统归纳，对无人船辅助渔业环境监测、水产养殖监测和渔船管理方面进行阐述，然后从无人船结构组成、自主航行、路径规划、目标识别方面论述渔业无人船的关键技，最后分析渔业无人船应用所面临的挑战，并提出未来研究方向和发展趋势。

1 无人船在渔业监管中的应用

渔业无人船主要用于环境监测、饵料智能投喂和渔船智能监管。

1.1 渔业环境监测

在水产养殖过程中，优质的水环境是必不可少的，这直接关乎水产养殖动物的存活率和生长速度，进一步影响养殖成本和经济效益。因此，渔业环境监测在水产养殖中至关重要^[17]。传统的监测方法包括实验室分析、浮标监测和固定站点监测等，存在效率不高、成本昂贵、

设备部署困难和自动化水平有限等问题。而采用搭载监测设备的无人船进行移动式监测的方式具有明显优势。

与固定监测方式相比，无人船不仅提高了监测的实时性和精确度，避免了人工取样的不便，还能实现大范围的移动监测，减少设备投入和相关成本^[18-20]。文献[21-22]数据显示，无人船的初期购置成本约为200 000 美元，而传统固定站点和巡逻船的成本则高达 500 000 美元。此外，无人船的年度运营成本约为 10 000 美元，远低于传统方法的 100 000 美元。无人船系统具有低维护需求和高自动化水平，长期运营更加经济高效。无人船配备高度集成的传感器和数据采集设备，可以全天候自动运行，实时采集详细的水质数据，不仅提高了数据的实时性和准确性，同时减少了劳动力需求，从而进一步降低了运营成本。在监测精度方面，无人船的监测精度可达 95% 以上，而传统方法的监测精度仅为 70%^[23]。这提升了环境监测的准确性和效率，尤其在检测污染物扩散和海洋生态系统变化等方面表现更为出色，已被广泛应用于水质检测任务^[24]。表 1 总结了当下具有代表性的水环境监测无人船。此外，苗飞等^[25]设计的基于自主控制技术的水质监测无人船能够按预设航路进行自主航行、自动水样采集及水质检测分析，为城市河道水质自动监测提供了高效的解决方案。杨阳等^[26]研制的用于水质监测和水体表观光谱观测的无人船采用 CAN 通信网络体系结构，具有布线简洁、便于系统扩展等优势，且采用单体船型，相较于双体船型可提供更大的舱室空间，便于搭载相关设备。周昌海等^[27]设计了一种以数字信号处理技术为核心控制模块的水质检测无人船，在极端环境下也能正常工作。

综上，目前相关研究已取得一定成果，但具有较高智能程度的水质检测无人船仍然较少，很难兼顾一船多用、长续航、智能化及一体化、检测数据准确性及可靠性，这是制约环境监测型无人船普及应用的重要原因。

表 1 国内外用于渔业环境监测的无人船
Table 1 Unmanned vessels used for fishery environmental monitoring at home and abroad

名称 Name	主要用途 Main application	技术特点 Technical features	自主航行 Autonomous navigation	远海作业 Offshore operation	尺寸 Size	动力源 Power source	操作模式 Operating mode
S70A 全自动水质监测无人船	水质监测	作业效率高、超大设备搭载空间、配备水质传感器	是	否	中	电动	全自主
SL110 多功能无人艇	水质监测、水下地形地貌测量	一船多用、易于维护、高精度定位导航	是	否	大	电动	全自主
Sturgeon-C170	水文调查、水下测绘、水面侦察、数据采集	姿态控制精度高、抗扰动能力强	是	是	中	燃油	半自主
Springer	水质检测、水域环境测量	使用 SLAM 定位技术、可独立执行路径规划、避障和数据采集任务	是	否	小	电动	全自主
Hydrolab HL7	水质监测、水质数据测量及取样	多参数一体化、自动清洗、无二次污染、多波束声呐	是	否	小	电动	全自主
Otter USV	环境监测、地域物理测量	续航时间长、可重复进行测量任务、数据实时监控	是	是	中	燃油	半自主

1.2 饵料智能投喂

在水产养殖领域，饵料的精准饲喂是确保养殖效率和生物健康的关键环节。研究表明，在水产养殖中，投喂成本占总养殖成本的 40%~80%，是影响水产养殖效益的主要因素^[28-29]。然而，传统的人工投喂方式面临着

效率低、成本高以及作业安全风险大等问题。尤其是在高密度养殖环境中，均匀分布的投料对于维持水质稳定尤为重要。但这些活动通常在水面进行，不仅劳动强度大，而且难以确保投料和施药的均匀性，进而影响养殖效果^[30]。针对上述传统水产养殖管理中存在的问题，无

人船提供了创新的解决方案。无人船引入为饵料智能投喂提供了一种创新的解决方案,同时可以有效进行视频监控、水质监测和施药等关键养殖活动。自动投饵机不仅减少了过量投喂,还有效维护了水质,且投资回报周期较短,显著降低了饵料转换比和缩短养殖周期^[31]。西班牙 Fish Farm Feeder 公司的数据显示,自动投饵系统的

初期投资成本通常占生产周期总成本的 20%~40%,长期运营成本降低 30%^[32]。此外,自动投饵系统在投饵精度和效率方面较传统方法提高了 10%~20%,且能够实时监测水质参数和鱼群行为,动态调整投饵策略,确保最优的养殖环境^[33]。目前国内外专门用于饵料投放的无人船实例较少,相关应用实例如表 2 所示。

表 2 国内外用于智能投饵的无人船

Table 2 Comparison of unmanned boats used for intelligent bait throwing at home and abroad

名称 Name	主要用途 Main purpose	技术特点 Technical features	自主航行 Autonomous navigation	远海作业 Offshore operation	尺寸 Size	动力源 Power source	操作模式 Operating mode
叁拾叁智能投饵(药)无人船	饵料投喂、自动施药	巡航定位功能,均匀施药	是	否	中	电动	全自动
河蟹养殖智能投饵施药作业船	饵料投喂、自动施药	自动驻泊,均匀施药	是	否	中	电动	全自动
自动导航智能投饵船	饵料投喂、自动施药	多种控制方式,转弯半径小	是	否	中	电动	半自动
极臻科技智能水产无人船	饵料投喂、自动施药控制,周期性喂养,防缠绕设计	适用多类型饵料,路径-投料计划量	是	是	大	燃油	全自动
河豚-T800	饵料投喂、水环境消毒、水质净化	液体自动稀释,防缠绕设计,自动采集养殖数据	是	否	中	电动	全自动

尽管目前关于投饵无人船的实际应用相对有限,但该技术的研究与开发从未间断。北京工商大学和浙江省淡水水产研究所联合设计了一种基于发明问题解决理论 (theory of the solution of inventive problems, TRIZ) 的水产投饵作业船,利用金鱼法等 TRIZ 工具分别对船体结构、饵料抛撒机构、船体型线进行设计,提出“蝶阀定量供料-振动落料-气力输送与抛撒”作业方式^[34]。陈雷雷等^[35]提出一种针对虾蟹塘投饵船的三叶螺旋桨设计方法,旨在提高虾蟹塘投饵船投饵精确率,降低工作能耗,增加工作稳定性及可靠性。张丽珍等^[36]设计了一种船载专用精准投饵机,采用抖动下料方式,在下料口设计定量开门装置,采用单片机进行控制,同时通过超声波测距模块测距和 PID 控制方法修正误差,使投饵量误差在 0.3% 以下。

研发智能投饵无人船是推动养殖精准化、绿色化、无人化的一大助力^[37]。投饵无人船的研发包括船体、投饵仓、前进设备、机载设备,未来发展方向预计将包括实现平台的多功能集成化、加强多源信息融合处理能力,以及构建更为完善的投饵船远程监控系统。

1.3 渔船智能监管

随着海洋渔业资源日益紧张,近年来,非法、不报告及不受管制的捕捞 (illegal, unreported and unregulated fishing, IUU 捕鱼) 问题愈发严重,已成为全球海洋安全的主要威胁之一。IUU 捕鱼不仅加速了鱼类资源的枯竭,还对海洋生态系统造成了严重破坏,导致全球每年损失数百亿美元的合法渔业收入^[38]。因此,针对渔船的智能监管势在必行。传统渔船监管方式依靠水政监察人员船巡,效率低,人力物力耗费较大,时间和空间的连续性不足,对发生在偏远隐蔽、地形复杂区域以及一些游击式的违法行为难以发现^[39-40]。而无人船以其自主性强、机动性好、感知能力强、安全性高等优势,在渔船监管领域发挥着越来越重要的作用^[41]。

无人船机动性好、突击能力强、巡查范围广,在执

法过程中发挥了不可替代的作用,显著提升了渔业管理效果^[42]。广州工业智能研究院研发的“海鹰”巡逻执法无人船搭载了视频监控、AI 智能识别、远程喊话等系统,在执法过程中能够快速靠近目标,拍摄现场周围环境,并实时回传高清图像至指挥中心,为执法人员锁定目标提供即时资料,也是之后指挥行动的重要参考依据。此外,该无人船配备星光级云台相机,并搭载声光报警和红外系统,能够进行夜间巡逻工作,解决了执法人员夜间工作的安全问题。美国国家海洋和大气管理局的数据显示,采用无人船进行监控后,鱼类资源的恢复速度明显加快,在实施无人船监控和严格限制捕捞措施的区域,鱼类种群数量增加了 20% 以上^[43],非法捕鱼活动减少了约 70%。

综上,无人船在渔船智能监管中的应用,不仅扩大了监管范围,提高了监测精度,还降低了对人力的依赖和成本。随着技术的进一步发展,无人船将在海洋监控和环境保护中发挥更为重要的作用,推动渔业可持续发展和保护海洋生态系统。

2 渔业无人船关键技术研究现状

根据渔业无人船的应用,用于渔业监管的无人船技术研究涉及控制理论、图像处理、通信原理等多个领域,关键技术包括自主航行、数据计算与航线规划、环境感知与目标识别技术等^[44]。

2.1 自主航行技术

自主航行技术是无人船的核心技术之一,通过自主航行技术,无人船可根据预设的航线或任务目标,利用各种传感器实时感知周围环境,识别障碍物并进行避障和调整航向^[45]。针对无人船自主航行技术的研究,首先要进行无人船系统架构的研究。无人船系统架构是实现自主航行的基础,涉及无人船的各个关键技术组成部分,包括感知系统、导航系统、控制系统、通信系统、动力系统、任务载荷、主控系统开发、结构设计以及安全与

冗余设计等。无人船的典型系统结构如图 1 所示。

徐力等^[46]提出一种应用多维信息统一采集、船-岸-海协同测量与模块化设计的无人船自主航行综合监测系统。该系统具有系统配置、数据实时采集与显示、数据存储与回放、船岸通信等功能, 船-岸-海协同测量技术可以实现无人船与岸上监测中心的信息互通与协同操作, 使监管部门可以更快速、及时做出响应, 加强了对违规渔船的监管与处置能力。姜宽舒等^[47]设计了一种基于开源地面站和 GNSS (global navigation satellite system) 结合的自主导航作业船, 装置由明轮动力船、ARM (advanced RISC machine) 导航控制系统、远程测控系统组成, 在自动导航模式下可实现路径寻迹、精准投料、水质监测等全水域自主航行作业功能。HAN 等^[48]提出了一种针对 USV(unmanned surface vehicle) 自主导航算法的并行测试与评估方法, 该方法结合虚拟现实技术建立了并行测试系统, 并设计了适应多场景和任务的 USV 自主导航算法测试系统。ZOU 等^[49]提出了一种水岸线检

测方法, 弥补了当前研究主要关注直线水岸线的不足。表 3 为目前现有代表性的自主航行技术汇总。

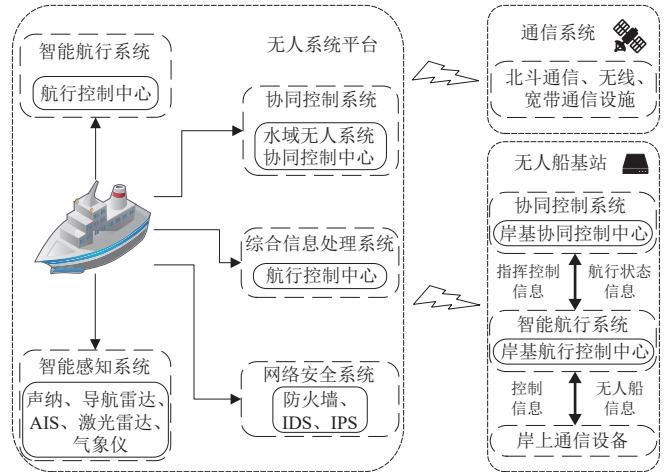


图 1 无人船系统架构

Fig.1 Architecture of unmanned ship system

表 3 现有无人船自主航行技术

Table 3 Existing autonomous navigation technology for unmanned ship

年份 Year	文献 Literature	关键技术 Key technology	主要优势 Main advantages	局限 Limitations
2022	[50]	deep Q-network(DQN) 算法	首次将 ALOS 的动态调整视线点的能力与 DQN 的强化学习结合起来, 实现了路径跟随的自适应优化	结合 DQN 的控制策略学习需要较大的计算资源, 可能对实时系统的实现构成挑战
	[51]	因子图模型、增量平滑数据融合算法、Lora 自组网	提出 USV 集群合作导航算法基于因子图, 通过去中心化结构和信息共享提高了 USV 集群的导航精度和系统鲁棒性	因子图模型和去中心化结构的引入增加了系统的设计和实现复杂性
	[52]	紧耦合集成导航、扩展卡尔曼滤波 (EKF)	提出并验证了紧耦合和松耦合 INS/GPS 集成导航模型在 USV 中的应用, 特别是在卫星不足的情况下	紧耦合结构相较于松耦合需要考虑更多的误差模型 (如接收器时钟偏移), 增加了系统设计和实现的复杂性
	[53]	Rao-Blackwellized 粒子滤波算法、同时定位与建图	展示了基于 ROS 的自主 USV 导航系统的开发, 包括 SLAM、路径规划和避障功能	系统对外部传感器 (如激光雷达和摄像头) 的依赖度较高, 在极端天气或环境下, 传感器性能可能受限
	[54]	动态领域可调快速行进方格、有限控制集模型预测控制	提出一种基于分布式控制策略的 USV 编队自主导航系统。能够有效引导和控制 USV 编队, 并根据环境安全状况自适应调整编队形状	DTFMS 和 FCS-MPC 算法增加了系统的计算复杂度和实时性要求
2023	[55]	改进海洋捕食者算法 (MPA)、漂角估计与补偿	提出一种基于漂角估计的智能避碰方法, 并结合改进海洋洋捕食者算法进行避碰决策优化	改进的算法引入了漂角估计和多目标优化, 增加了系统的计算复杂性和实现难度
	[56]	随机模型预测控制 (SMPC)、状态不确定性传播	提出一种基于随机模型预测控制的自主船只路径跟踪和避障算法, 通过考虑不确定性和扰动因素, 确保了船只在复杂环境中的安全性	假设船只的纵向速度恒定, 不适用于所有船只类型和情况, 限制了方法的普适性
	[57]	非线性干扰观测器、动态自适应视线法 (LOS)、反馈线性化控制器	提出一种基于非线性干扰观测器的 USV 与 AUV 协同控制策略, 通过改进的视线法和级联系统分析, 实现了复杂环境中的稳定编队控制	系统依赖于 USV 和 AUV 之间的有效通信和环境感知, 实际应用中可能受到环境因素的影响, 如延迟和丢包
2024	[58]	多注意力强化学习 (MARL)、两阶段调度方法	提出的基于强化学习算法的两阶段无人船调度方法在提升码头集装箱转运效率方面表现出色	高度依赖于历史数据的质量和多样性, 可能在数据不足或偏差较大时影响结果
	[59]	伪雅可比矩阵 (PJM) 估计、紧格式动态线性化 (CFDL)	提出一种基于数据驱动的无人船轨迹跟踪控制策略, 通过反步法和 CFDL 方法实现了对无人船期望轨迹的有效跟踪	控制器设计依赖于系统的 I/O 数据, 在数据不足的情况下, 影响控制效果
	[60]	视距 (LOS) 导航算法、模糊 PID 控制器	提出一种基于 LOS 导航算法和模糊 PID 控制的无人船路径跟踪控制方法, 提高了路径跟踪精度	模糊 PID 控制器的设计和调试相对复杂, 需要大量的调试工作以确保控制系统的稳定性和响应速度
	[61]	Unity、3D	开发无人船避障导航算法仿真测试平台, 不仅提供了实验过程的复现能力, 还能够直观展示算法效果	需进一步验证在真实环境中的效果

2.2 路径规划技术

路径规划技术对无人船的自主航行和任务执行至关重要, 它可以保障无人船在多情形水域环境中安全、高效地完成各种任务。SANG 等^[62]提出了一种实现速度变化和全局优化的 A*算法, 通过在地图建模过程中包含时

间维度实现速度变化 (即加速/减速/停止) 达到避障, 解决了现有全局路径规划方法在路径规划与 USV 控制阶段之间相互独立的局限性。陈宇文等^[63]提出基于混合蚁群算法的无人船航行路径自主规划方法, 采用栅格法构建无人船工作环境模型, 由上至下、由左至右对栅格进行

编号, 划分安全区域与障碍物区域。林志健等^[64]设计了一种基于差速转向的水产养殖智能导航无人船系统, 采用模块化设计, 通过组合导航信息融合处理, 进行路径规划和路径跟踪控制, 完成巡航和避障、水质检测、水面异物检测、物料投放等任务。符运来等^[65]提出一种改进 P-RRT* 算法的无人船航迹规划方法, 通过对 P-RRT* 算法采样策略和连接约束条件的改进, 明显减少 P-RRT* 算法的运行时间和迭代次数。此外, 对初始路径进行剪

枝和平滑处理, 使路径紧贴障碍物边缘, 缩短了路径长度。但该方法仅适用于静态环境, 如何应对实际航行时的风浪水流、不规则障碍物与未知障碍物等环境因素仍是未来的研究重点。

总体而言, 无人船路径规划技术主要基于算法层面的改进, 主要集中在模型简化、模块化设计、算法优化、环境适应性等方面, 以适应复杂的海洋环境和多样化的任务需求, 相关技术研究如表 4 所示。

表 4 现有无人船路径规划技术
Table 4 Existing unmanned ship path planning technology

年份 Year	文献 Literature	关键技术 Key technology	主要优势 Main advantages	局限 Limitations
2021	[66]	多子域分组、粒子群优化算法	基于区域分解的思想提出一种多子域分组的 PSO 算法, 有效提高算法的收敛精度和搜索速度	没有考虑风、浪、流等因素对 USV 的耗电量的影响
	[67]	A* 算法、AIS 信息服务平台	在 A* 算法中引入速度变化(加速、减速、停止)和时间维度、在建模中加入人工势场法	计算复杂度较高、对 AIS 数据依赖性强、局部最优陷阱问题
	[68]	启发式算法、强化学习、DQN 算法	利用深度神经网络近似 Q 函数、双 DQN 算法解耦目标 Q 值的动作选择和动作评估	仿真环境限制, 仿真中采用了离散动作输出而不是连续输出
2022	[69]	A* 算法、禁忌搜索法	禁忌搜索算法确保路径规划的全局最优、全局性和高效性优于 A* 算法和人工势场法	计算复杂度高、实际表现需进一步验证
	[70]	改进遗传算法、动态船舶领域	在满足 COLREGs 的基础上, 可有效提高无人船在实时路径规划时的动态避碰能力	没有考虑多个目标船距离比较近的情形
	[71]	DQN 算法、树状优化采样机制	提出的基于树采样机制的决斗 DQN 算法通过优先采样策略, 提高了算法的收敛速度, 减少了训练时间	未结合实际无人船进行测试
2023	[72]	改进蚁群算法	基于路径长度对初始信息素浓度进行合理分配, 提高算法搜索效率与收敛速度。	实际表现仍需进一步验证
	[73]	粒子群算法、人工蜂群算法	引入了粒子拥挤度因子的概念、融入了人工蜂群的思想	在更为复杂的环境下存在成功率较低、搜索时间长等问题
	[74]	动态窗口法、速度障碍法	融合了改进动态窗口法与速度障碍法、提出新的动态窗口法评价函数	实际表现仍需进一步验证
2024	[75]	A* 算法、动态窗口法	实现了在复杂环境下选择最优路径完成路径规划的问题	实际表现仍需进一步验证
	[76]	RIME 优化算法、混沌映射	考虑了三维 USV 路径规划和全局优化的多策略改进, 结合了 RIME 优化算法和混沌映射技术	算法的实现复杂度和计算资源需求较高、实际应用中的表现需要进一步验证。
	[77]	A* 算法、修正启发式函数	通过引入对角线斜率的平方作为启发式函数的修正系数, 减少了路径规划中的绕路现象。	缺乏实际应用场景的实验验证、只关注路径长度和平滑性
	[78]	Q-Learning 算法、径向基函数(RBF)	提出了一种基于策略优化的 Q-Learning (SO-QL) 算法, 提高了算法的效率和路径规划的准确性	算法依赖于环境信息的获取

尽管某些研究成果已经展现出良好的应用效果, 但要将这些成果有效转化为实际应用仍面临众多挑战。在未来, 无人船路径规划技术的进步需要更多关注实际应用需求, 涉及算法创新、模型简化、系统模块化集成、环境变化适应性提升, 以及应用领域的进一步拓展。

2.3 目标识别技术

目标识别不仅有助于对合法渔船进行有效监管, 更是识别和追踪非法、未报告和无管制渔船的重要手段。精确的目标识别技术可使无人船在多情形水域环境中迅速定位并区分目标, 提高渔业执法效率和响应速度。

当前针对水域环境下的目标识别技术大多基于机器学习算法, 通过大量的图像数据训练, 不断提高识别的准确性和鲁棒性。机器学习算法能够从数据中学习并提取特征, 而无需人为设计复杂的特征提取规则。例如, 深度学习技术, 尤其是卷积神经网络(convolution neural network CNN), 已在图像识别领域展现出卓越的性能。通过使用深度学习算法, 无人船的识别系统能够自动地从图像中学习并识别出不同类型的目标, 包括船只、浮标、以及其他海洋障碍物。此外, 随着技术的进步, 无人船的目标识别系统开始集成多种传感器数据, 如雷达、

声纳和光学传感器, 以提高识别准确度。

为了解决智能无人船水面漂浮物识别和定位精度不高的问题, 李国进等^[79]提出基于 Faster R-CNN 的改进算法, 采用 Faster R-CNN 算法对水面漂浮物进行初识别和定位, 引入多层特征融合提升模型对小目标的检测能力。但该方法对硬件资源依赖较大, 限制了在实际复杂环境中的应用。张堡瑞等^[80]结合激光雷达与视觉信息实现了水面目标的多传感器融合检测, 通过优化数据融合策略, 有效提升了目标的检测精度与鲁棒性。然而, 传感器异质性带来的数据同步与标定问题仍需进一步解决。冯喜惠等^[81]将深度学习技术应用于船舶停泊监测, 试验表明该方法在复杂环境中仍能保持较高的检测率和识别率, 但模型的泛化能力有待进一步进行验证。程良等^[82]针对水下人员识别提出了一种基于卷积神经网络的解决方案, 通过引入时空特征的深度挖掘, 提升了水下复杂背景中的识别精度。针对船舶识别, 张上等^[83]优化了 YOLOv7-tiny 算法, 其轻量化设计与高效的检测框架使得算法在实时性和准确性之间取得了较好的平衡, 但在处理密集目标时仍存在误检和漏检。为了解决多目标跟踪精度问题, 金久才等^[84]基于 SiamRPN 结构, 通过多

层特征共享与目标分辨率优化，在提高跟踪精度的同时降低了模型的计算复杂度。

3 技术挑战与展望

无人船凭借先进的导航定位、环境感知、数据处理和通信传输技术，在智慧渔业领域展示了广阔的应用前景。然而，相关研究和实际应用大多还处于初级阶段，仍存在诸多挑战，包括船载设备的技术限制、法规与标准化的缺失、成本效益问题、实用性问题以及数据安全与隐私问题等，这些都影响了无人船的广泛应用和商业化进程。在实际应用中，用于智慧渔业监管的无人船还有许多研究方向可以突破，需要进一步探索和研究。

1) 船载设备限制。无人船在渔业智慧监管领域的应用通常依赖于搭载的船载设备，这些设备的技术指标、稳定性和兼容性对于确保整个系统的有效性至关重要。然而，目前这些船载设备面临，包括监测参数的覆盖范围有限、传感器的精确度和数据的可靠性面临挑战，以及不同设备之间集成困难和通信兼容性问题等。此外，现有的无人船大多仅能支持单一任务的设备搭载，这限制了它们的作业效率，使得其难以进行多功能集成和高效率的监管作业。

2) 法规与标准化缺失。在渔业智慧监管的应用实践中，无人船虽具有显著的潜力，但当前法规与标准化的不足对其广泛部署和效能发挥构成了显著制约。具体而言，在无人船智慧监管的应用中，现行的国际海事法规缺失，导致跨国作业面临法律适用难题。这不仅妨碍了监管政策的统一执行，也可能引发法律争议，损害渔业资源的可持续管理。因此，亟需制定和完善相关的国际海事法规，确立统一的标准体系，以促进无人船在渔业智慧监管中的规范化应用，确保监管的高效性和法律的严谨性。

3) 成本效益问题。在渔业智慧监管的背景下，无人船的应用受限于其经济性考量，尤其是成本效益问题。无人船的购置成本相对较高，加之其运行和维护阶段所需的持续投入，对许多渔业监管机构和小规模渔业经营者而言，可能超出了其财务承受能力。此外，无人船的维护工作不仅技术要求高，而且由于海上环境的恶劣条件，维护频率和成本可能会进一步增加。当前，无人船的运行效率和任务多样性尚未达到可以完全替代传统渔船作业的要求，这在一定程度上限制了其在经济效益方面的竞争力。因此，为了提高无人船的吸引力和市场竞争力，必须通过技术创新和成本控制措施来降低总体使用成本。

4) 落地实用性问题。无人船在渔业智慧监管领域的应用前景虽然充满希望，但其在实际操作层面的实用性问题亟待解决。技术应用的复杂性要求监管人员必须掌握高水平的技术和专业知识，这对于目前以中老年劳动力为主的渔业从业人员而言，无疑是一个不小的挑战。此外，无人船在海洋渔业方面下的性能和稳定性尚未得到充分的实际验证，其在应对恶劣天气和海况时的可靠

性需要进一步提高。同时，海上环境中的维护和修理工作难度较大，一旦无人船发生故障，可能因为难以及时救援和维修而导致任务中断或失败。因此，为了提高无人船在渔业监管中的实用性和可靠性，有必要加强技术研发，提升其操作简便性和环境适应性，并通过系统的培训和教育提高渔业从业人员的技术水平。

5) 数据安全与隐私问题。在渔业智慧监管的领域内，无人船的应用虽然极大地提升了监管效率，但随之而来的数据安全及隐私保护问题也成为了不可忽视的挑战。无人船在执行任务过程中采集的海量海洋数据，其安全性和隐私性保护尤为关键。当前，海上通信的不稳定性可能导致数据在传输过程中遭遇未授权访问，增加了数据泄露和篡改的风险。此外，个人隐私的保护同样重要，尤其是在处理涉及渔民作业细节和渔船活动的敏感信息时。因此，亟需制定和实施更为严格的数据保护措施，利用加密技术强化数据传输的安全性，并依法明确数据的归属和使用权限，以保障渔业数据的安全和个人隐私的不受侵犯。同时，监管人员的数据安全意识提升和专业培训也显得尤为重要，以确保在整个数据生命周期内均能妥善处理数据保护的相关事宜。

综上所述，尽管无人船在渔业智慧监管领域具有广阔的应用前景，但仍面临着诸多挑战。船载设备的局限性、法规与标准化的缺失、成本效益问题以及数据安全与隐私保护的关切，均为该技术在渔业监管中的实际部署和效能提升提出了具体要求。为克服这些挑战，需要跨学科研究的努力、政策支持、技术创新与国际合作，共同推动无人船在渔业智慧监管中的规范化、高效化和安全发展。通过这些措施，可以期待无人船在未来渔业资源保护与管理中发挥更重要的作用，实现渔业资源的可持续利用与海洋生态环境的保护。

[参考文献]

- [1] 吴京原, 裴兆斌. 海洋渔业资源可持续捕捞法律制度研究[J]. *黑龙江水产*, 2023, 42(4): 285-288.
WU Jingyuan, PEI Zhaobin. Research on legal system of sustainable fishing of marine fishery resources[J]. *Northern Chinese Fisheries*, 2023, 42(4): 285-288. (in Chinese with English abstract)
- [2] PAULY D , ZELLER D . Comments on FAOs state of world fisheries and aquaculture (SOFIA 2016)[J]. *Marine Policy*, 2017, 176-181.
- [3] 马健, 李乐, 黄博等. 我国海洋渔业资源保护制度的生态贡献分析[J]. *海洋开发与管理*, 2023, 40(8): 77-83.
MA Jian, LI Le, HUANG Bo, et al. The Ecological Contribution of Marine Fishery Resources Protection System in China[J]. *Ocean Development and Management*, 2023, 40(8): 77-83. (in Chinese with English abstract)
- [4] 巩沐歌, 孟菲良, 黄一心, 等. 中国智能水产养殖发展现状与对策研究[J]. *渔业现代化*, 2018, 45(6): 60-66.
GONG Muge, MENG Feiliang, HUANG Yixin, et al. Research

- on development status and countermeasures of intelligent aquaculture in China[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(6): 60-66. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张艺馨, 周二磊. 人工智能视角下市场智慧监管模式研究[J]. *行政科学论坛*, 2024, 11(5): 58-63.
- [6] 孟庆琨, 梁明. “标准化+大数据”构建智慧监管新体系[J]. *中国标准化*, 2023(2): 40-42.
- MENG Qingkun, LIANG Ming. Standardization plus big data build a new system of smart regulation[J]. *China standardization*, 2023(2): 40-42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郭爽. 强化渔业监管筑牢渔业生产安全防线[J]. *农民致富之友*, 2018(10): 241.
- [8] JENSEN F, FROST H, ABILDTRUP J. Fisheries regulation: A survey of the literature on uncertainty, compliance behavior and asymmetric information[J]. *Marine Policy*, 2017, 81: 167-178.
- [9] 白盼鑫, 张恒, 王哲, 等. 基于动态事件的水面无人船故障检测[J]. *控制工程*, 2023, 30(12): 2192-2198.
- BAI Panxin, ZHANG Heng, WANG Zhe, et al. Dynamic event-based fault detection for unmanned surface vehicles[J]. *Control Engineering of China*, 2023, 30(12): 2192-2198. (in Chinese with English abstract)
- [10] SCOTT A. Development of Economic Theory on Fisheries Regulation 1[M]//*Fisheries Economics*. US: Routledge, 2019: 197-213.
- [11] 联合国粮农组织《2024年世界渔业和水产养殖状况》报告[J]. *世界农业*, 2024 (7): 145.
- [12] BAI P, ZHANG H, ZHANG J, et al. Usv control with adaptive compensation under false data injection attacks[C]//IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). New York, USA: IEEE, 2022: 1-2.
- [13] SAMANTARAY A, YANG B, DIETZ J E, et al. Algae detection using computer vision and deep learning[EB/OL]. (2018-11-18). <https://arxiv.org/abs/1811.10847>
- [14] MATSUSHITA Y, ONUMA A, TAKESHITA C, et al. Unmanned surface vehicle (USV) with a fish attraction lamp to assist the purse seine operations[J]. *Fisheries Science*, 2024, 90(3): 357-367.
- [15] ZHANG H, WU L, ZHI Y, et al. Throughput maximization for usv-enabled underwater wireless networks under jamming attack[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 24(14): 21987-21996.
- [16] WAI A W M, LONG C J, SHEN K H, et al. Fuzzy-based control system of unmanned surface vehicle (USV) for floating garbage collection[C]//2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 1-6.
- [17] LIU B, ZHUANG J, WEI G. Recent advances in the design of colorimetric sensors for environmental monitoring[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7(8): 2195-2213.
- [18] SRAVANTHI R, SARMA A S V. Automatic navigation of USV for floating aquatic weed removal in lake[J]. *Advances and Applications in Mathematical Sciences*, 2021, 20: 3205-3218.
- [19] BOYD C E. General relationship between water quality and aquaculture performance in ponds[M]. San Diego, CA: Academic Press, 2017: 147-166.
- [20] LI M, CHAI J, Li C. Remote water quality monitoring: an IoT and USV-based study[C]//Ninth International Symposium on Sensors, Mechatronics, and Automation System (ISSMAS 2023). Beijing, China: SPIE, 2024: 921-926.
- [21] WRIGHT C. Cutting carbon, cutting costs: The USP of USVs[EB/OL]. *Energy Voice*, (2024-02-19)[2024-08-08]. <https://efwd.energyvoice.com/insights/technology/cutting-carbon-cutting-costs-the-usp-of-usvs>.
- [22] MAHONEY M. New report highlights challenges, opportunities, and cost-modeling of electronic fisheries monitoring programs[EB/OL]. EDFish, (2016-11-29)[2024-08-08]. <https://blogs.edf.org/edfish/2016/11/29/new-report-highlights-challenges-opportunities-and-cost-modeling-of-electronic-fisheries-monitoring-programs/>.
- [23] MADEO D, POZZEBON A, MOCENNI C, et al. A low-cost unmanned surface vehicle for pervasive water quality monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(4): 1433-1444.
- [24] 陈学凯, 董飞, 彭文启, 等. 无人水面船在水环境监测领域中的应用进展[C]//2023 中国水利学术大会. 郑州: 黄河水利出版社, 2023: 57-62.
- [25] 苗飞, 张波, 刘杨. 在线水质监测无人船的设计与实现[J]. *船舶工程*, 2022, 51(4): 20-24.
- MIAO Fei, ZHANG Bo, LIU Yang. Design and implementation of the online water quality monitoring unmanned ship[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2022, 51(4): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [26] 杨阳, 耿巍麟, 李天博, 等. 多功能水体环境监测水面无人艇的设计[J]. *船舶工程*, 2020, 49(1): 15-18.
- YANG Yang, GENG Weilin, LI Tianbo, et al. Design of unmanned surface vehicle for multi-functional water environment monitoring[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2020, 49(1): 15-18. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周昌海, 杨烨, 马计划, 等. 基于 DSP 的无人船水质检测系统设计[J]. *科技与创新*, 2022(17): 24-26.
- [28] 郭子淳, 黄家怿, 王水传, 等. 智能投饵船研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 385-396, 404.
- GUO Zichun, HUANG Jiayi, WANG Shuichuan, et al. Research and prospect of intelligent bait-dropping boat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S1): 385-396, 404. (in Chinese with English abstract)
- [29] 雷高辉, 刘峰, 董小宁, 等. 水产养殖智能投饵技术研究进展[J]. *饲料工业*, 2024, 45(14): 132-144.
- LEI Gaohui, LIU Feng, DONG Xiaoning, et al. Research progress of intelligent feeding technology in aquaculture[J].

- Feed Industry, 2024, 45(14): 132-144. (in Chinese with English abstract)
- [30] 赵思琪, 赵三琴, 国振淇, 等. 池塘水产养殖精准投喂系统研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(22): 27-34.
ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, GUO Zhenqi, et al. Development of the precise feeding system for pond culture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(22): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [31] JACKSON L. Rise of the machines: Aquaculture's robotic revolution[EB/OL]. Global Seafood Alliance, (2017-02-13)[2024-08-08]. <https://www.globalseafood.org/advocate/rise-of-the-machines-aquacultures-robotic-revolution/>.
- [32] REIS J, WELDON A, ITO P, et al. Automated feeding systems for shrimp: Effects of feeding schedules and passive feedback feeding systems[J]. *Aquaculture*, 2021, 541: 736800.
- [33] 郑思宁, 刘强, 郑逸芳. 规模化水产养殖技术效率及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 229-235.
ZHENG Sining, LIU Qiang, ZHENG Yifang. Analysis of scale aquaculture production efficiency and analysis of its determinants[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transaction of the CSAE)*, 2016, 32(20): 229-235. (in Chinese with English abstract)
- [34] 彭飞, 宋雨龙, 张丽梅, 等. 基于 TRIZ 理论的水产养殖投饵船创新设计[J]. *饲料工业*, 2023, 44(9): 8-13.
PENG Fei, SONG Yulong, ZHANG Limei, et al. Innovative design of aquaculture bait carrier based on triz theory[J]. *Feed Industry*, 2023, 44(9): 8-13. (in Chinese with English abstract)
- [35] 陈雷雷, 冉胡泽, 胡庆松, 等. 虾蟹塘投饵船三叶螺旋桨设计及水动力仿真分析[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 893-904.
CHEN Leilei, RAN Huze, HU Qingsong, et al. Hydrodynamic simulation analysis of three-blade propeller of shrimp and crab pond feeding boat[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(5): 893-904. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张丽珍, 刘单寒, 陈雷雷, 等. 虾塘养殖船载精准投饵机设计[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5): 203-206, 210.
ZHANG Lizhen, LIU Danhan, CHEN Leilei, et al. Design of precision feeding machine on board for shrimp pond culture[J]. *Machine Design & Research*, 2021, 37(5): 203-206, 210. (in Chinese with English abstract)
- [37] 朱明, 张镇府, 黄凰, 等. 鱼类养殖智能投喂方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(7): 38-47.
ZHU Ming, ZHANG Zhenfu, HUANG Feng, et al. Research progress on intelligent feeding methods in fish farming[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 38(7): 38-47. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张明华. 基于机器学习的智能渔船监控系统研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
ZHANG Minghua. Research on Intelligent Fishery Supervision System Based on Machine Learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [39] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的远洋渔业发展[N]. 人民日报, 2023-10-25 (14) .
- [40] 张衡, 张瑛瑛, 叶锦玉. 中国远洋渔业发展的新思路及建议[J]. *渔业信息与战略*, 2019, 34(1): 30-35.
ZHANG Heng, ZHANG Yingying, YE Jinyu. New ideas and suggestions for the development of Chinese oceanic fisheries[J]. *Fisheries Information & Strategy*, 2019, 34(1): 30-35. (in Chinese with English abstract)
- [41] 骆明慧. 无人船在水域安全防控市场的应用与前景[J]. *中国安防*, 2022(8): 50-53.
- [42] 张健. 警用无人船技术应用研究[J]. *法制博览*, 2017(34): 237-238.
- [43] WAGNER K. Status of the stocks: Record-low number of stocks on overfishing list in 2023[EB/OL]. NOAA,(2024-05-02)[2024-08-21]. <https://www.noaa.gov/news-release/status-of-stocks-record-low-number-of-stocks-on-overfishing-list-in-2023>.
- [44] 陈映彬. 无人船发展现状及其关键技术综述[J]. *科学技术创新*, 2019(2): 60-61.
- [45] LAZAROWSKA A, ŹAK A. A concept of autonomous multi-agent navigation system for unmanned surface vessels[J]. *Electronics*, 2022, 11(18): 2853.
- [46] 徐力, 陈天宇, 许凯玮, 等. 基于综合监测系统的无人船自主航行能力评价[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(20): 83-86.
XU Li, CHEN Tianyu, XU Kaiwei, et al. Evaluation of autonomous navigation capability of unmanned surface vehicles based on a comprehensive monitoring system[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(20): 83-86. (in Chinese with English abstract)
- [47] 姜宽舒, 于泓, 高菊玲, 等. 基于 Mission Planner 的多功能水产养殖作业船自主导航控制系统设计与实现[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(8): 148-155.
JIANG Kuanshu, YU Hong, GAO Juling, et al. Design and implementation of autonomous navigation and control system for multi-functional aquaculture operation ship based on Mission Planner[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(8): 148-155. (in Chinese with English abstract)
- [48] HAN X, LIU H, FAN Y. Research on testing and evaluation of USV autonomous navigation algorithms based on virtual reality fusion[C]//2022 41st Chinese Control Conference (CCC), Changsha, China. IEEE, 2022: 4329-4336.
- [49] ZOU X, XIAO C, ZHAN W, et al. A novel water-shore-line detection method for USV autonomous navigation[J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1682.
- [50] WEI G, YANG J. Path following optimization of unmanned ships based on adaptive line-of-sight guidance and Deep Q-Network[C]//2022 International Conference on Machine Learning and Intelligent Systems Engineering (MLISE). Wuhan,

- China. IEEE, 2022: 288-291.
- [51] LIU J, GUO H, LIU X, et al. USV Cluster Cooperative Navigation Algorithm based on factor graph[C]//2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Nanning, China. IEEE, 2022: 955-959.
- [52] SI K, WEI J, HE X, et al. Integrated Navigation Algorithm for USV with Insufficient Satellites[C]//2021 7th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). Nanchang, China. IEEE, 2021: 743-748.
- [53] ZAKARIA W N W, MAHMOOD I A T, SHAMSUDIN A U, et al. ROS-based SLAM and Path Planning for Autonomous Unmanned Surface Vehicle Navigation System[C]//2022 IEEE 5th International Symposium in Robotics and Manufacturing Automation (ROMA). Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE, 2022: 1-6.
- [54] ZHOU P, GAO D. A Path Planning Strategy for Unmanned Ships Based on Improved A Algorithm[C]//2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Zhengzhou, China. IEEE, 2022: 5892-5897.
- [55] 张荣翔, 戴永寿, 李立刚, 等. 基于漂角估计的无人船智能避碰方法[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(12): 65-70, 90. ZHANG Rongxiang, DAI Yongshou, LI Ligang, et al. Intelligent collision avoidance method for unmanned ship based on sideslip angle estimation[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(12): 65-70, 90. (in Chinese with English abstract)
- [56] PARK K, LEE C, KIM J. Robust Path Tracking and Obstacle Avoidance of Autonomous Ship using Stochastic Model Predictive Control[C]//2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). Seoul, South Korea. IEEE, 2023: 179-182.
- [57] 于特, 刘佳鹏, 吴超, 等. 基于非线性干扰观测器的无人船与自主水下航行器协同运动控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(S1): 114-123. YU Te, LIU Jiapeng, WU Chao, et al. USV and AUV cooperative control strategy based on nonlinear disturbance observe[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(S1): 114-123. (in Chinese with English abstract)
- [58] 郭兴海, 李紫萌, 计明军, 等. 基于强化学习算法的两阶段无人船协同调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(10): 3434-3450. GUO Xinghai, LI Zimeng, JI Mingjun, et al. Two-stage unmanned vessels co-scheduling method based on the reinforcement learning algorithm[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2024, 44(10): 3434-3450.. (in Chinese with English abstract)
- [59] 王维坤, 刘加朋, 王保防, 等. 基于数据驱动的无人船轨迹跟踪自适应控制[J/OL]. 中国舰船研究, 2024, 1-10[2024-09-21].<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03503>.
- WANG Weikun, LIU Jiapeng, WANG Baofang, et al. Data-driven unmanned surface vehicles trajectory tracking adaptive control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 1-10[2024-09-21].<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03503>. (in Chinese with English abstract)
- [60] 李少鹏, 黄利华, 张磊, 等. 基于 LOS 导航算法的无人船路径跟踪控制[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(5): 109-114. LI Shaopeng, HUANG Lihua, ZHANG Lei, et al. Unmanned vessel path tracking control based on LOS navigation algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(5): 109-114. (in Chinese with English abstract)
- [61] 张乐乐, 戴永寿, 李立刚. 无人船避障导航算法仿真测试平台设计与开发[J]. 电子设计工程, 2024, 32(4): 17-21, 26. ZHANG Lele, DAI Yongshou, LI Ligang. Design and development of simulation test platform for obstacle avoidance and navigation algorithm of USV[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(4): 17-21, 26. (in Chinese with English abstract)
- [62] SANG T, XIAO J, XIONG J, et al. Path planning method of unmanned surface vehicles formation based on improved A* algorithm[J][J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 176.
- [63] 陈宇文, 徐照. 基于混合蚁群算法的无人船航行路径自主规划[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(22): 93-96. CHEN Yuwen, XU Zhao. Autonomous planning of unmanned ship navigation path based on hybrid ant colony algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(22): 93-96. (in Chinese with English abstract)
- [64] 林志健, 李冀晖. 水产养殖领域智能导航无人船关键技术研究[J]. 软件, 2024, 45(1): 38-40. LIN Zhijian, LI Jihui. Research on key technologies of intelligent navigation unmanned ships in aquaculture[J]. Software, 2024, 45(1): 38-40. (in Chinese with English abstract)
- [65] 符运来, 王魏, 刘妙男, 等. 基于改进 P-RRT*算法的无人船路径规划[J/OL]. 控制工程, 1-8. [2024-08-08].<https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20231049> . FU Yunlai, WANG Wei, LIU Miaonan, et al. Path planning algorithm for unmanned vessel based on improved P-RRT* algorithm[J/OL]. Control Engineering of China, 1-8. [2024-08-08].<https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20231049>. (in Chinese with English abstract)
- [66] 黄兴旺. 基于多子域分组粒子群优化算法的小型无人船路径规划[J]. 船舶工程, 2021, 43(12): 158-165. HUANG Xingwang. Multi-area grouping-based particle swarm optimization for path-planning of small unmanned surface vehicle[J]. Ship Engineering, 2021, 43(12): 158-165. (in Chinese with English abstract)
- [67] YU K, LIANG X, LI M, et al. USV path planning method with velocity variation and global optimisation based on AIS service platform[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109560.
- [68] HUANG Z, LIN H, ZHANG G. The USV path planning based

- on an improved DQN algorithm[C]//2021 International Conference on Networking, Communications and Information Technology (NetCIT), Changsha, China. IEEE, 2021: 162-166.
- [69] 玄世龙, 许志远, 孙帅, 等. 基于禁忌搜索算法的无人船路径规划[J]. 船舶工程, 2022, 44(4): 8-13, 37.
XUAN Shilong, XU Zhiyuan, SUN Shuai, et al. Path planning of unmanned ship based on the tabu search algorithm[J]. Ship Engineering, 2022, 44(4): 8-13, 37. (in Chinese with English abstract)
- [70] 靳磊磊. 基于改进遗传算法和避碰规则的无人船路径规划研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022: 10-20.
JIN Leilei. Research on Unmanned Surface Vessel Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm and Collision Avoidance Rules[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022: 10-20. (in Chinese with English abstract)
- [71] HUANG Z, LIU S, ZHANG G. The USV path planning of Dueling DQN algorithm based on tree sampling mechanism[C]//2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC). Singapore. IEEE, 2022: 971-976.
- [72] 王桐, 马恺. 基于改进蚁群算法的受限水域无人船路径规划[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(11): 120-124, 128.
WANG Tong, MA Kai. Path planning of unmanned ships in restricted waterways based on improved ant colony algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(11): 120-124, 128. (in Chinese with English abstract)
- [73] 徐小强, 刘静雯, 冒燕. 基于改进粒子群算法的无人船全局路径规划研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(3): 131-138.
XU Xiaoqiang, LIU Jingwen, MAO Yan. Global path planning of usv based on improved PSO[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(3): 131-138. (in Chinese with English abstract)
- [74] 谭智坤, 张隆辉, 刘正锋, 等. 融合改进动态窗口法与速度障碍法的无人船局部路径规划[J]. 船舶力学, 2023, 27(3): 311-322.
TAN Zhikun, ZHANG Longhui, LIU Zhengfeng, et al. Local path planning for USVs based on the fusion algorithm of improved dynamic window approach and velocity obstacle algorithm[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(3): 311-322. (in Chinese with English abstract)
- [75] 王征, 杨洋, 周帅, 等. 基于 A*-动态窗口法的无人船动态路径规划算法[J]. 海军工程大学学报, 2024, 36(2): 13-18.
WANG Zheng, YANG Yang, ZHOU Shuai, et al. Dynamic path planning algorithm of unmanned ship based on A*-dynamic window approach[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2024, 36(2): 13-18. (in Chinese with English abstract)
- [76] GU G, LOU J, WAN H. A multi-strategy improved rime optimization algorithm for three-dimensional USV path planning and global optimization[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 12603.
- [77] ZHENG S, LUO L, XIAO Y. Global Path Planning for USV Using A-Star Algorithm with Modified Heuristic Function[C]//2024 IEEE 4th International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA). Wuhan, China. IEEE, 2024: 147-151.
- [78] WANG Y, LU C, WU P, et al. Path planning for unmanned surface vehicle based on improved Q-Learning algorithm[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116510.
- [79] 李国进, 姚冬宜, 艾矫燕, 等. 基于改进 Faster R-CNN 的水面漂浮物识别与定位[J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2021, 34(2): 292-299.
LI Guojin, YAO Dongyi, AI Jiaoyan, et al. Detection and localization of floating objects via improved Faster R-CNN[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 34(2): 292-299. (in Chinese with English abstract)
- [80] 张堡瑞, 肖宇峰, 郑又能. 基于激光雷达与视觉融合的水面漂浮物检测[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 619-628.
ZHANG Burui, XIAO Yufeng, ZHENG Youneng. Detection of floating objects on water surface based on fusion of lidar and vision[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 619-628. (in Chinese with English abstract)
- [81] 冯喜惠, 李光正, 王波, 等. 基于深度学习的图像识别技术在渔船监管中的应用[J]. 珠江水运, 2022(23): 19-22.
- [82] 程亮, 吴兴辉, 江云华, 等. 基于无人船视觉的水域人员类别识别算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 43-51.
CHENG Liang, WU Xinghui, JIANG Yunhua, et al. Person category identification algorithm in water environment based on unmanned ship vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [83] 张上, 熊中越, 王恒涛. 基于通道剪枝的改进 YOLOv7-tiny 船舶识别算法[J/OL]. 电光与控制, 1-8.[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20240606.1532.006.html>.
ZHANG Shang, XIONG Zhongyue, WANG Hengtao. Improved YOLOv7-tiny ship recognition algorithm based on channel pruning [J/OL]. Electro Optics & Control, 1-8.[2024-08-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1227.TN.20240606.1532.006.html>. (in Chinese with English abstract)
- [84] 金久才, 张家林, 刘德庆, 等. 基于改进 SiamRPN 的高速无人船海上目标视觉跟踪研究[J]. 海洋科学进展, 2024, 42(3): 545-554.
JIN Jiucai, ZHANG Jialin, LIU Deqing, et al. Visual tracking of maritime targets for a high-speed unmanned surface vehicle based on improved siamese region proposal network[J]. Advances in Marine Science, 2024, 42(3): 545-554. (in Chinese with English abstract)

Unmanned vessels for smart monitoring and supervision of the fishing industry: Studies, application and challenges

LI Ming¹, TAN Mingming¹, JIANG Chaowei¹, ZANG Qiyan¹, ZHANG Jian¹, LI Hongran¹, YUAN Dongqing¹, LIU Jintao², WANG Chengang², ZHANG Heng¹✉

(1. College of Computer Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, China; 2. Lianyungang Customs Integrated Technology Center, Lianyungang 222042, China)

Abstract: Unmanned vessels have been ever-increasing in modern fisheries in recent years. Fishery monitoring and supervision can be expected to improve the quality and efficiency with cost savings in smart fisheries, due mainly to their outstanding autonomous navigation and path planning. The promising potential application can also be found in future fishery. In this study, a systematic analysis was provided for the unmanned vessels in intelligent fish farming. Several technologies were given in aquaculture systems, including autonomous navigation, path planning, water environment monitoring, and their integration. Among them, the current status was critically examined to identify the technological gaps for the potential research directions, in order to enhance the efficacy of unmanned vessels in smart fishery. The results show that unmanned vessels significantly enhanced the precision and efficiency of fishery supervision when equipped with high-resolution sensors and intelligent systems. It was very crucial to maintain the real-time monitoring of fishing activities and the automatic identification of illegal fishing practices in the sustainable fishery. Moreover, unmanned vessels were deployed to reduce manual operation, leading to low labor intensity and high overall efficiency. Furthermore, unmanned vessels also shared superior performance in water environment monitoring. The real-time acquisition of environmental data enhanced the monitoring accuracy in aquatic ecosystems. Capital expenditure was also reduced to minimize the extensive investment of equipment under harsh environmental conditions in modern fisheries. The intelligent feeding and medicating technologies were integrated into unmanned vessels, leading to the high operational efficiency in aquaculture. The optimal feeding schedules and precise medication dosages greatly contribute to the better health of aquatic species. Consequently, the overall cost of aquaculture operations was reduced for more sustainable and economically viable farming. Numerous opportunities and challenges were concluded for the broad application of unmanned vessels in fisheries. Several key areas were identified with promising potential applications, including low-cost production, multifunctional integration, new technologies, and innovative scenarios. Moreover, the stability and reliability of unmanned vessels were highlighted in complex and dynamic environmental conditions. It was also required for the integrated multi-parameter detection and the reliable self-powered modules to support long-term autonomous operations. The application scenarios were then extended to deploy the unmanned vessels in a wider scope of smart fisheries.

Keywords: fisheries; monitoring; unmanned surface vehicle; environmental monitoring; intelligent feeding