

夏英凯, 朱明, 曾鑫, 等. 水产养殖水下机器人研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 85-97.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.010

# 水产养殖水下机器人研究进展

夏英凯<sup>1,2</sup>, 朱明<sup>1,2</sup>, 曾鑫<sup>1</sup>, 王懿偲<sup>1</sup>, 齐湘洪<sup>1</sup>

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

**摘要** 水产养殖是世界范围内食品领域发展最快的行业之一, 为人类提供了超过一半的水产品。但是, 水产养殖目前面临机械化、自动化程度较低以及产量及效率不高等问题, 因此迫切需要转型升级。水下机器人是一种机动灵活的水下作业装备, 与传统的水下作业手段相比, 在作业方式、范围、适应能力等方面具有明显的优势, 应用于水产养殖监测及作业后, 有望改变现有养殖模式, 推进水产养殖业向机械化、工程化、智慧化、智能化转型, 缓解水产养殖业的发展危机。尽管水下机器人近年来得到了蓬勃发展, 但是目前在水产养殖业的推广应用仍非常有限, 而且尚有诸多技术瓶颈未得到解决。本文面向水产养殖水下机器人的应用实际, 对水质监测、视频监控及传输、目标识别与定位、高精度水下导航、智能规划与控制、机器人-机械手系统精准作业等关键技术进行了详细分析, 并展望了未来的发展方向, 以期水产养殖水下机器人的研究和应用提供综合性参考。

**关键词** 精准水产养殖; 水下机器人; 水质监测; 目标识别定位; 智能规划控制; 图像捕捉与采集; 柔性机械手

中图分类号 TP 242 文献标识码 A 文章编号 1000-2421(2021)03-0085-13

水产养殖是增加人类优质蛋白质的重要渠道<sup>[1]</sup>, 对保障人类食品安全发挥了重大作用。近年来, 中国的水产养殖业发生了翻天覆地的变化, 养殖规模逐年递增, 产量稳居世界第一, 但仍面临着严峻的挑战, 包括水质污染严重、养殖效率低下、机械化及自动化程度低、人工危机<sup>[2-3]</sup>等。因此, 水产养殖业亟需从养殖模式、装备等方面进行全面的转型升级。

水下机器人作为水下工程装备中的一支生力军, 与潜水员等传统水下作业手段相比, 在作业范围、环境、模式等方面均有明显优势, 符合新型水产养殖装备的需求, 具有广阔的应用前景。发展水产养殖水下机器人是实现水产养殖业向资源节约、产出高效、生态安全、机器换人等方向发展的关键, 有望为中国水产养殖业带来新的发展机遇。

尽管水下机器人的研究及应用已日趋成熟, 在各行各业都取得了显著成效<sup>[4-5]</sup>, 但受养殖模式、成本、装备适应性问题限制, 水下机器人在水产养殖业的推广应用仍非常有限。本文将对水产养殖水下机器人的研究现状及关键技术进行综述, 并展望其未来发展趋势, 以期提供综合性参考。

## 1 水产养殖水下机器人应用现状

在水产养殖实践中, 水下机器人首先应用于水产养殖监测。通过搭载摄像机、声呐、水质传感器等设备, 借助水产养殖水下机器人机动灵活的运动能力, 可实现对养殖环境及对象的大范围监测, 典型的应用场景如图 1 所示<sup>[6-9]</sup>。Karimanzira 等<sup>[6]</sup>在水下机器人上搭载了导电率、溶氧等传感器, 并设计了任务规划及制导系统, 实现了大范围养殖水质监测。王润田等<sup>[10]</sup>提出了一种深水网箱养殖的声学监测方法, 将声呐传感器搭载于水下机器人, 根据深水网箱规格预设巡视路线, 实时监测并上报透鱼现象。Rundtop 等<sup>[11]</sup>将超短基线定位系统和多普勒测速系统集成在水下机器人上, 通过试验验证了其在水产养殖网衣检查中的表现。Fore 等<sup>[12]</sup>讨论了水下机器人在精准渔业养殖方面的优势, 并建议开发基于声学和视觉的导航系统, 以避免水下机器人在网箱中执行监视任务时碰撞养殖设施或鱼类。Forst 等<sup>[13]</sup>设计了一种用于水产养殖的 ROV (remotely operated vehicle), 其搭载了视频相机, 可通过自动图像处理实现养殖监测。除了上述应用外, 还可以借助水产养殖水下机器人, 完成水产品生长状态评估<sup>[14]</sup>、

收稿日期: 2020-06-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2662020GXQD003); 国家自然科学基金项目(52001132)

夏英凯, E-mail: ykxia@mail.hzau.edu.cn

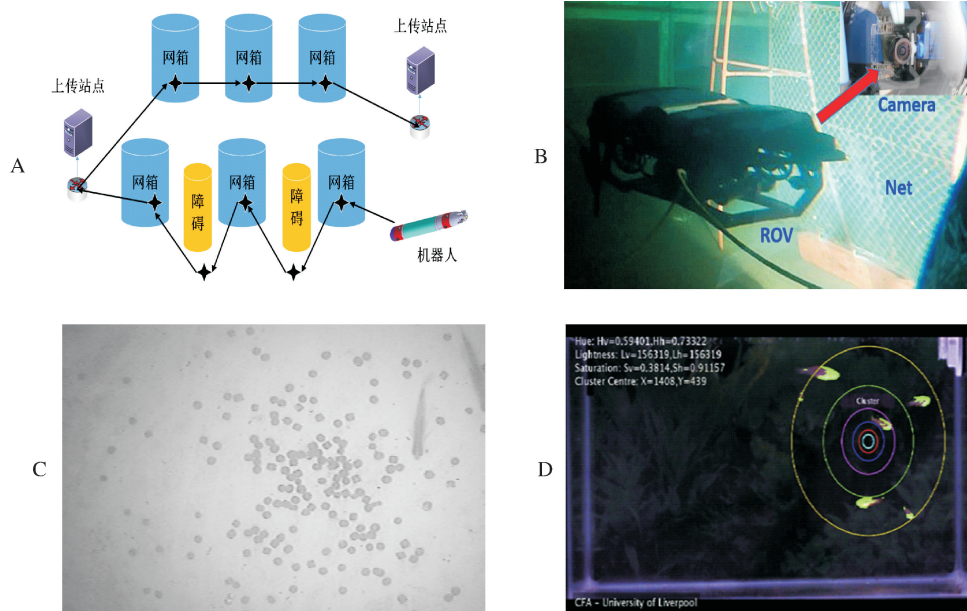
行为研究<sup>[15]</sup>、摄食预测<sup>[16]</sup>等水产养殖监测工作。

其次,水产养殖水下机器人可搭载机械手、捕捞网、清洗装置等工具,基于作业目标识别与定位、制导与控制,完成养殖产品收获、网箱清洗、死鱼捡拾、漏洞检测及修补等复杂任务。房熊等<sup>[17]</sup>设计了不同形式的水产养殖水下机器人模型,搭载了水下机械手、捕捞网等,可用于捕捞作业。卜力群<sup>[18]</sup>设计了一种水下养殖作业机器人,搭载了2个机械手臂、饵料存储箱及投料捕获执行机构,具备多种作业能力。周建龙<sup>[19]</sup>设计了可实现饲料投喂及水草切割的新型水产养殖机器人。刘冠灵等<sup>[20]</sup>设计了一种履带式深海网箱清洗机器人,依靠反冲装置和2组三角履带轮实现贴附网衣表面行走,同时清洗网衣,清洗效果良好。

此外,水产养殖水下机器人还可与其他的水面、

水下、空中平台(如水面船舶、水下探测节点、无人机等)灵活组网,并借助地面基站、卫星等通信设备,构建“水陆空天”一体化监控系统。在此系统中,水产养殖水下机器人根据规划路径大范围移动,并采集养殖设施及其他水下节点的信息,将其上传至监控网络,从而实现对于大范围水产养殖区域的长效动态监控,同时还可根据实际需求开展多种养殖作业。

尽管水下机器人已经逐步被应用在水产养殖中,但其发展趋势仍然较慢,推广程度远不如其他领域。在欧美等发达地区和国家,水产养殖水下机器人研究水平相对较高,少数公司甚至推出了系列产品。国内起步较晚,相关研究较少,一些基础性问题仍有待解决。下文将对水产养殖水下机器人的关键技术进行分析。



A:大范围水质监测<sup>[6]</sup> Wide-range water quality monitoring; B:渔网监测<sup>[7]</sup> Fish net monitoring; C:剩余饵料监测<sup>[8]</sup> Residual fishing bait monitoring; D:鱼类行为监测<sup>[9]</sup> Fish behavior monitoring.

图1 典型水产养殖监测场景

Fig.1 Typical aquaculture monitoring scenario

## 2 水产养殖水下机器人关键技术

在弱光照、多扰动、强耦合、时变、非结构化的水下环境下,利用水产养殖水下机器人开展高效、精准的水产养殖监测及作业,通常需解决水质监测、视频监控及传输、水产目标识别与定位、水下导航、智能规划与控制、水下机器人-机械手协同作业等关键技术问题,如图2所示。

### 2.1 水质监测

水产养殖水质易受生物、物理、化学、水文气象和人类生产活动等多因素交叉影响,作用机制复杂,具有多变量、非线性、模糊不确定等特点<sup>[21]</sup>,直接影响着水产品的产量与品质<sup>[22]</sup>,因此,开展水质监测意义重大。传统的人工观察或采样监测等方式时效性差、可靠性低、监测范围有限,不能及时反馈水质的问题,严重影响水产品的成活率,可能造成不可挽

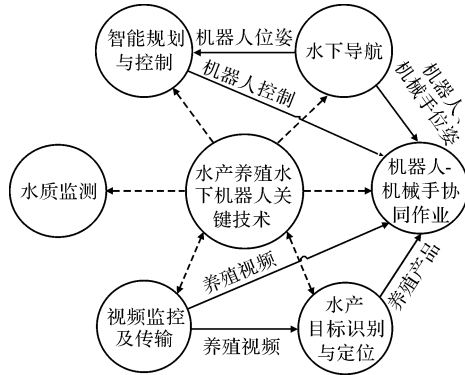


图 2 水产养殖水下机器人关键技术  
Fig.2 Key technologies of aquaculture  
underwater vehicles

回的经济损失<sup>[23]</sup>。随着科技的进步,网络化、自动化的监测方式逐渐成为研究热点<sup>[24]</sup>。但对于大型养殖水域而言,采用传感网络的监测方式存在机动性不足、采样区域有限的问题。

利用水产养殖水下机器人开展水质监测作业,能够大大提升水质监测的机动灵活性、效率与监测范围。但是在机器人狭小的空间内,所能安装的水质传感器数目有限,必须解决水质传感器的有效性及配置优化问题。随着使用时间延长,水质探头上会附着各种污渍及杂物,使探测准确性变差,甚至无法使用,需要定期清洗乃至更换。在水下机器人上集成后,水质传感器的清洗及更换会更加麻烦,因此需要设计自动清污装置,对水质探头进行定期清洗<sup>[25]</sup>。此外,为了解决传感器设备故障问题,还可在空间允许的前提下,采用多传感器配置方式<sup>[26]</sup>,以提升水质监测的可靠性。

除了提升传感器的可靠性外,还需解决水质数据分析及处理问题。受复杂养殖环境等因素影响,水质传感器采集的数据面临缺失、失真、冗余、异常波动、噪声干扰大等诸多问题。因此,需要根据实际需求对传感器采集的数据进行降噪、特征提取、修复、重构等处理<sup>[27]</sup>,才能得到准确的水质分析结果。樊春春<sup>[28]</sup>设计了一套基于物联网的水产养殖智能监控系统,采用小波变换算法对采集到的参数进行降噪处理,并采用基于 RBFNN 的模糊控制算法解决了数据滞后的问题。刘双印<sup>[29]</sup>针对水质监测数据缺失和噪声问题,通过线性插值法、相似数据的水平和垂直处理均值法对数据进行修复,并采用改进小波分析方法进行降噪和特征提取。Yu 等<sup>[30]</sup>采用

融合小波分析和独立分量分析方法对水质参数进行了特征提取,有效减少了噪声干扰。

水质预测是水质监测中的另一关键环节,是根据已掌握的资料和监测数据,对水质在未来空间和时间上的变化规律及发展趋势进行估计和推测,为防止养殖水质进一步恶化和制定水质改善措施提供决策依据<sup>[31]</sup>。目前,应用较多的方法包括以经典数学为基础的传统预测方法及以计算智能为基础的现代预测方法等。传统预测方法主要包括:Markov 法<sup>[32]</sup>、回归分析预测法<sup>[33]</sup>、时序分析预测法<sup>[34]</sup>及函数模型预测法<sup>[35]</sup>等。传统的预测方法自适应能力较弱,且部分方法在建模时需要庞大的数据量支撑,严重影响了预测的效率和精度。结合计算智能的现代预测方法有效地解决了传统方法存在的问题,常见的现代预测方法包括灰色理论法、人工神经网络法、最小二乘 SVR 预测法等。考虑到不同水质参数之间具有很高的耦合性,作用机制难以简单分析,应用单一的预测方法可能存在局限性,因此基于计算智能的组合预测法将成为未来的重要发展趋势。

综上,利用水产养殖水下机器人开展水质监测时,必须妥善解决传感器优化配置与清污、数据融合分析以及水质预测等问题。

## 2.2 弱可视条件下视频监控及传输

传统水产养殖业的增氧、投饲、用药等几乎全部依靠经验,对工人的素质要求较高,实际生产中往往为了达到较好的效果,多增氧、多投饲、多用药,造成了不必要的浪费,也影响了水产品的健康品质。利用水产养殖机器人开展水下视频监控,能够有效监测水产品成活率、生长情况及养殖环境,及时发现水产品逃逸或死亡情况,以及残留饲料,底质腐臭、板结、青苔和其他池塘污染问题,从而有的放矢地采取相关措施。同时,借助于水下机器人灵活的运动能力,可实现移动式全方位的视频监控,对于水产养殖业而言意义重大。但是,利用水产养殖水下机器人开展视频监控作业,不仅需克服弱光照、浑浊水质以及水产品随机运动等困难,实现图像准确捕捉及采集,还需适应不同传输介质,实现高效、高质量、高可靠性的水下视频传输。

在水下图像捕捉及采集方面,利用视频采集系统可以直接对目标实现高速成像且图像细节清晰、分辨率高,能够获得丰富的目标特性和水下环境特



性,相对于声学手段而言更加直观,近年来在水产养殖业上得到越来越多的应用。张金泉等<sup>[36]</sup>设计了一种搭载视频监控系统的框架式 AUV (autonomous underwater vehicle),用于海上网箱网衣检测,可获得清晰的视觉图像,从而方便地判断网衣破损情况。但是由于水对光的吸收特性使得光在传输过程中能量发生严重的衰减,造成成像质量下降,因此视频监控技术适合近距离水产目标信息的获取<sup>[37]</sup>。此外,水有较强的散射特性,导致水下图像中水产品目标和背景的对比度降低,造成图像模糊<sup>[38]</sup>,同时光学图像也会受到弱光照条件及浑浊养殖环境的影响,因此利用水下视频监控获取高质量的水下光学图像面临很大的挑战,不仅需要改进、补光等硬件设备进行改进,还需设计合理的图像处理算法<sup>[39]</sup>。

水下视频传输是水产养殖视频监控的另一个关键环节。实时、清晰、稳定的视频传输将会给水产养殖监控带来极大的便利。针对 ROV 和 AUV 这两种不同类型的水产养殖水下机器人<sup>[40]</sup>,视频传输的处理方式有所不同。ROV 采用有线工作模式,其水下载体与岸基之间通过光电复合缆连接,水下视频信息可借助光电复合缆进行实时、可靠、稳定、长期的传输。典型的 ROV 视频光纤传输系统主要包括水下摄像机、照明灯、艇载控制单元、艇载光端机、水面光端机、水面控制单元等,如图 3 所示。艇载控制单元可根据养殖水体中的可视条件完成灯光亮度调节、摄像机调焦和聚焦控制等<sup>[41]</sup>,从而弥补水质混浊和光线暗淡的影响。AUV 与水面支持系统之间没有光电复合缆相连,因此水下视频只能通过无线传输。一般而言,AUV 多采用水声传输,但是水声信道具有时变多径特性且易受噪声影响,带宽较窄,容易产生误码。为达到实时的效果,必须将图像数据在传输之前进行大幅度压缩<sup>[42]</sup>,并进行抗误码处理<sup>[43]</sup>。早期的水声信道图像传输系统,多采用静态图像压缩方法,压缩比不高,一般一帧图像需要几秒来完成传输<sup>[44]</sup>。在视频动态压缩编码方法的研究方面,文献<sup>[45]</sup>提出一种基于小波变换的压缩算法,水声信道传输速率 20 kbps,以 10 帧/s 的速率传输 144 像素×176 像素的灰度图像;文献<sup>[46]</sup>研制的水下视频传输系统,水声信道的数据传输速率可达 128 kbps,采用 MPEG-4 压缩,速率为 10 帧/s。

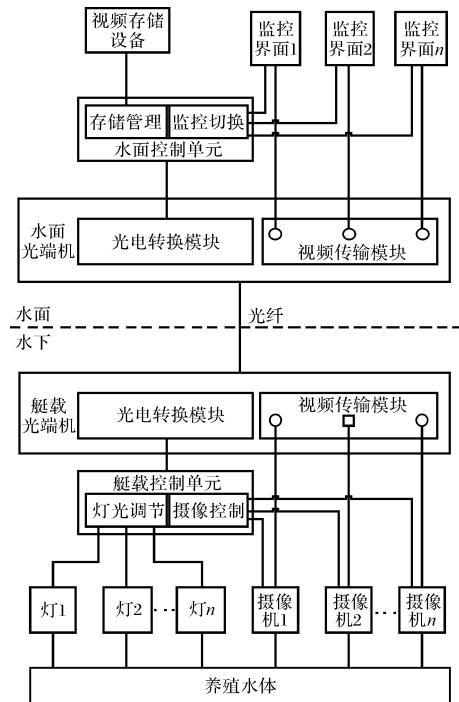


图 3 典型的 ROV 视频光纤传输系统

Fig.3 Typical video optical fiber transmission system of ROV

### 2.3 多扰动下水产目标准确识别与定位

水产目标的准确识别与定位是养殖作业的基础。要实现高效、精准的养殖作业,必须准确、快速识别水产品的种类及生长状态等。但是,在水产目标的准确识别定位过程中,往往面临以下问题:(1)养殖产品状态随机性强,无规律可循,难以捕捉及预测目标动态;(2)养殖产品往往处于快速运动状态,对目标识别及定位的实时性提出了较高要求;(3)养殖产品生长状态参差不齐,外形差异较大,难以用统一的标准来评估及识别;(4)水体环境差,受饲料残渣、粪便等众多干扰物及水体散射作用影响,图像采集效果差,质量不稳定,会产生多阴影、噪点多及对对比度下降等不利效果,影响目标定位识别。总之,上述因素可能导致水下机器人“看不清”“找不到”“抓不准”,为水产目标的准确识别与定位带来巨大的困难。

水产目标的准确识别与定位总体上可分为目标信息获取及识别定位 2 个环节。在目标信息获取方面,常用的手段主要有视觉、水声、激光等。视觉依赖于水体的可见度,在清水环境中,最大可视距离可达 10 m 左右,但在混浊的水域,最大可视距离往往会大幅缩短。水声作业距离远、分辨率高,目前仍是水下目标定位的主要方法,但容易受到复杂水体环

境干扰,增加了目标识别的难度。激光是近年来发展起来的新方法,体积、功耗都较小,比较适合水下机器人使用,但目前尚不成熟。由于采用单一的目标获取手段均有一定的缺陷,在实际应用中,可以采用多手段融合的探测方法<sup>[47]</sup>。

在有限的探测手段基础上,设计良好的识别定位方法是提升水产目标识别能力的关键。一般的水下目标识别与定位流程包括图像滤波、边缘提取、特征量提取和目标识别判断等<sup>[48]</sup>。图像滤波一般分为线性滤波和非线性滤波两类。线性滤波原理简单、易于实现,但当图像中含有信号与噪声彼此相关的非叠加性噪声时,线性滤波方法不再适用,此时需依赖于非线性滤波技术。皮志锋<sup>[49]</sup>针对海参捕捞任务,设计了改进中值滤波算法,并对图像进行模糊增强,提升了图像处理的效果。特征提取及匹配是目标识别过程中的另一重要环节,其通过计算机提取图像上的关键信息点进行特征分析,并依据分析结果对目标进行匹配、识别和分类<sup>[50]</sup>。由于水下特殊的成像环境,纹理特征和颜色特征损失严重,因此通常采用基于形状特征的目标识别方法<sup>[51]</sup>。并且,随着图像识别等技术的发展,近年来深度学习、机器视觉等新方法开始逐步应用到水下目标识别领域。王卫华等<sup>[52]</sup>研究了如何在海底管线检测维修工作中,应用机器视觉实现管线快速识别与精确定位。

Kim等<sup>[53]</sup>提出了一种面向多帧不交叠R标序列图像识别的Snake跳跃模型,在叠加应用识别中能完成对快速移动物体的判别。

尽管水下目标识别技术近年来已取得了长足的进步,但其在针对动态移动目标的在线识别方面还存在一定的缺陷。尤其对于水产养殖业而言,不仅会面临动、静态多目标的快速识别及特征精确分析任务,而且还面临弱光照、时变浪/流影响、复杂水质、机器人不确定状态等多源复合扰动影响,难度更大。综合利用多源融合探测手段,结合水产品特性开展目标识别技术研究,是在多扰动环境下实现水产目标准确识别与定位的关键。

#### 2.4 复杂养殖环境中水下机器人高精度导航技术

导航是水产养殖水下机器人的关键技术。机器人的水下定位、跟踪控制、养殖作业等都依赖于精确的导航参数。但是,考虑到未知、非结构化的水下养殖环境,以及复杂的水产养殖任务,实现长效而精确的导航定位难度很大。考虑到水对电磁信号的衰减作用,陆基常用的导航技术在水下并不完全适用,使得水下导航成为了一项颇具挑战的课题<sup>[54-55]</sup>。现有的水下导航技术,主要包括船位推算、声学导航、惯性导航、视觉导航、地球物理导航等。这些导航技术都可以单独应用于水下机器人开展水产养殖作业,但它们各有优缺点<sup>[56-58]</sup>,如表1所示。

表1 常用的单一水下导航技术

Table 1 The commonly used single underwater navigation technology

导航技术 Navigation technology	组成 Components	优势 Advantages	劣势 Disadvantages
船位推算 Reckoning	测速仪、姿态仪及深度传感器等 DVL, attitude indicator, depth sensor, etc.	算法简单,实现方便 Simple algorithm, easy to implement	船位推算精度不高 Low precision
声学导航 Acoustic navigation	长基线、短基线、超短基线、声呐等 LBL, SBL, USBL, sonar, etc.	探测距离远 Long detection range	图像声纳受噪声影响大 Huge noise impact
惯性导航 Inertial navigation	捷联惯导、光纤惯导等 SINS, FOGSINS, etc.	自主性好、短时间精度高 Good autonomy, high precision in short time	定位误差随时间累积严重 Serious time cumulative positioning error
视觉导航 Visual navigation	水下摄像、激光等 Underwater camera, laser, etc.	直观、清晰 Intuitive and clear	在水中传播损耗较大 Large transmission loss in water
地球物理导航 Geophysical navigation	地形匹配、重力场、地磁场等 Terrain matching, gravity field, geomagnetic field, etc.	无源性、精度高、不受时间限制、隐蔽性强 Passivity, high precision, no time limit, strong concealment	传感器精度要求高,尚不成熟 High sensor precision requirement, immature

在上述水下导航技术中,惯性导航因其突出的技术优势,往往被用作水产养殖水下机器人的核心导航技术。但是,惯性导航装置只能维持短时间内的低精度测量,在执行长时间水产养殖作业任务时,定位误差随时间延长而累积严重,因此需要其他导

航传感器(如DVL、GPS、APS等)的辅助<sup>[59-60]</sup>,并进行多传感器组合导航。借助卡尔曼滤波、粒子滤波等融合算法<sup>[61-62]</sup>,有效融合不同导航传感器数据,不仅可以取长补短,大大提高导航精度,提升系统可靠性和容错能力,而且可以适当降低单一传感器的精

度要求,降低设备成本和技术难度,目前已在水下机器人中广泛应用。Liu 等<sup>[63]</sup>利用 DVL 对惯性导航系统进行定期修正,以弥补惯性导航的误差累积影响,仿真结果表明,SINS/DVL 组合导航比纯惯性导航有更高的定位精度。LÜ 等<sup>[64]</sup>为了提高导航的鲁棒性并避免 DVL 数据丢失的影响,基于最优极限学习方法提出了一种智能速度模型来辅助导航。Zhang 等<sup>[65]</sup>提出了一种基于声音的测距和定位方法,通过不同工况下的误差分析准确补偿航位推算误差,提高了导航精度。Sun 等<sup>[66]</sup>提出了一种基于反向超短基线的 AUV 导航系统,具备多用户容纳、隐蔽巡航、长航程有效等诸多优势。

尽管多传感器组合导航技术显著提升了导航的精度,然而对于水产养殖而言,水产养殖水下机器人导航技术不仅涉及机器人沿预定路径行进过程中的导航问题,还包括水产养殖作业问题。以网衣监测和水产品捕获为例,水产养殖水下机器人在执行此类作业任务时,需依据作业目标实时调整运动轨迹和姿态,因此需要兼顾水产养殖水下机器人特性、环境影响及作业目标影响。视觉同步定位与映射(VSLAM)<sup>[67]</sup>是一种新兴的导航定位技术,对于水产养殖水下机器人而言,将 VSLAM 技术与常用的水下组合导航技术相结合,可以在提升导航精度的

同时兼顾水产品的视觉感知,将有助于动态养殖作业任务的实现,是未来重要的发展方向。此外,一般而言,光纤惯性导航的精度与其内部光纤陀螺的尺寸成正比,想要获得高精度的导航数据,需要相对较大的惯性导航设备,这与水产养殖业对机器人小型化、低成本化的需求相矛盾。因此,小型化、低成本、高精度的导航设备研发将是水产养殖水下机器人导航技术的另一重要研究方向。

## 2.5 内外环境强扰动下水下机器人智能规划与控制

在开展水产养殖监测及捕捞作业过程中,为了使机器人的行进路径覆盖关键的监测区域,并使其位置、姿态、速度等满足准确捕捞的作业需求,需要对机器人的运动参数进行严格约束,因此水产养殖水下机器人必须具备良好的规划及控制能力。但是,考虑到水下机器人存在强交叉耦合、非线性、参数摄动等特性,与复杂养殖环境交互时还面临着时变且不易观测的持续浪、流等外部干扰,同时在作业过程中还必须准确感知并避开养殖产品及设施,实现准确的规划与控制非常不易。根据水产养殖作业需求及工作环境,可将水产养殖水下机器人的规划与控制划分为路径规划、运动控制及动态避障等 3 个环节,其逻辑关系如图 4 所示。

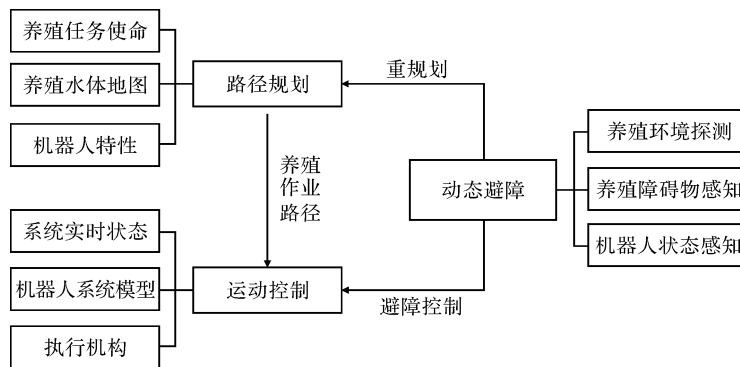


图 4 水产养殖水下机器人规划与控制

Fig.4 Planning and control of aquaculture underwater vehicle

在路径规划方面,水产养殖水下机器人需结合养殖作业任务、水体环境及机器人特性,设计覆盖关键养殖区域的合理路径。在设计路径时,需考虑空间约束、机器人运动约束、水流扰动、空间遍历性、不重复性及能源消耗等多重因素。目前,水下机器人路径规划算法总体上可分为三类:几何模型搜索、人工势场法以及人工智能方法<sup>[68]</sup>。几何模型搜索方法需在建立环境模型的基础上设计搜索策略,对环

境模型的精细程度依赖性强。环境建模方法包括可视图、Voronoi 图、单元分解法等,常用的搜索策略包括 A\*、D\* 算法<sup>[69]</sup>等。其中,A\* 算法比较适合静态路径规划,在规划空间范围较大时,A\* 算法搜索效率不足,D\* 算法比较适用于进行动态路径规划。人工势场法是创建一个虚拟的力场,并通过建立引力场函数、斥力场函数来进行路径规划,其优点是规划的路径一般比较平滑,算法模型实现简单,但当地



形过于复杂时,完全遍历路径规划有可能陷入局部最优解,从而产生遗漏区域<sup>[70]</sup>。人工智能算法参考动物行为进行寻优设计,目前主流的人工智能规划算法包括粒子群算法、蚁群算法、进化计算、遗传算法、神经网络、机器学习等<sup>[71]</sup>,采用智能算法不需要精确的环境模型,搜索能力强且能够得到全局最优解。

在运动控制方面,水产养殖水下机器人往往面临如下难题<sup>[72]</sup>:模型高度非线性和时变水动力特

性;变负载影响;附加质量大,运动惯性大;精确的水动力系数难以获取;复杂养殖环境带来时变扰动且难以直接测量等。为了克服上述内外环境强扰动,运动控制器设计必须兼具良好的制导<sup>[73]</sup>以及鲁棒控制<sup>[74]</sup>能力。常用的运动控制算法包括PID控制、自适应控制、滑模控制、反演控制、模糊专家控制、神经网络控制等,如表2所示。由于每种算法都存在不足之处,在运动控制器设计过程中往往根据实际养殖作业需要,将各种算法融合使用。

表2 常用的水产养殖水下机器人运动控制算法

Table 2 The commonly used motion control algorithm for aquaculture underwater vehicle

运动控制算法 Motion control algorithm	优势 Advantages	劣势 Disadvantages
PID控制 PID control	算法简单,实现方便 Simple algorithm, easy to implement	参数整定难,干扰应对不足,控制精度不高 Difficult parameter setting, weak anti-jamming ability, low control accuracy
自适应控制 Adaptive control	适用于参数不确定或缓慢变化场合 Suitable for the situation of parameter uncertainty or slow change	稳定性不高,测量误差直接影响系统控制精度 The stability is not high, and the measurement error directly affects the control accuracy
滑模控制 Sliding mode control	模型参数摄动影响小,鲁棒性好 Small parameter perturbation influence and good robustness	容易出现抖振 Chattering problem
反演控制 Backstepping control	结构严谨,适用于非线性系统 Rigorous structure, suitable for nonlinear systems	子系统过多时求解复杂 The solution is complex when there are too many subsystems
模糊专家控制 Fuzzy expert control	不依赖精确模型,适用不确定系统 Not depend on the exact model and suitable for uncertain systems	依赖专家经验,控制精度相对较低 Depending on expert experience, and the control accuracy is relatively low
神经网络控制 Neural network control	具有自学习和非线性拟合能力 Self-learning and nonlinear fitting ability	数据依赖性较强,理论和算法有待提升 Strong data dependence, and the theory and learning algorithm need to be improved

动态避障是水产养殖作业中另一项关键技术。水产养殖水下机器人在按照预规划路径开展养殖作业时,可能会遭遇养殖设施、产品及环境中的不确定动态障碍物,设计合理高效的动态避障策略,对于提升养殖作业可靠性和安全性而言非常重要。动态避障一方面依赖对养殖环境及对象的实时感知建模,另一方面取决于动态避障策略的优劣<sup>[75]</sup>。在养殖环境感知建模方面,可基于声呐<sup>[76-77]</sup>、图像<sup>[78]</sup>、视频<sup>[79]</sup>等手段获取的信息,建立养殖环境及障碍物模型。在避障策略研究方面,除传统的人工势场方法外,新兴的动态避障算法可大体分为两类:一类从水产养殖水下机器人的运动特性及限制出发<sup>[80]</sup>,另一类采用神经网络和模糊推理为代表的智能决策方法<sup>[81]</sup>。

尽管规划与控制技术近年来取得了长足的进

步,但对于水产养殖这种特殊的应用场合而言,现有的规划与控制技术需要结合实际应用需求做出适应性调整及补偿,尤其是需要充分考虑动态养殖产品、设施及未知复杂养殖环境的影响,提高作业的效率、安全性与可靠性。

## 2.6 多体耦合约束下水下机器人-机械手协同精准作业

搭载机械手的水产养殖水下机器人能完成除养殖监测外更复杂的作业任务,大大提升了水产养殖作业能力。但是,水下机器人与机械手构成了多体耦合的水下机器人-机械手系统(underwater vehicle-manipulator system, UVMS),建模与控制非常复杂<sup>[82]</sup>。

对于UVMS建模而言,需要在水产养殖水下机器人和机械手建模的基础上,分析两者间耦合关系

并兼顾复杂养殖环境影响。常用的动力学建模方法包括 Kane 方法、Lagrange 方法和 Newton-Euler 方法等。Kane 方法所建方程数少,效率较高,但需计算各部分加速度以获得惯性力;Lagrange 方法从能量的角度出发构建模型,避开了力、速度和加速度等矢量的复杂运算,但要对能量方程进行繁琐的偏导运算;Newton-Euler 方法建模直观,易于计算,但需要计算出系统所有相互作用力,相对繁琐<sup>[83]</sup>。在建立理论模型后,还需通过数值计算或试验的方式获取 UVMS 的水动力系数。此外,对于水产养殖作业而言,养殖环境的分析与建模至关重要。在实际建模过程中,可通过历史数据和离线信息首先建立养殖环境的名义模型,此后依据实际工作过程中的数据采集或状态估计对名义模型进行在线修正,为 UVMS 的精准作业提供依据。

实现精准化水产养殖作业,UVMS 必须具备稳定且高精度的运动控制、姿态调整及力控制能力。但是,UVMS 具有时变、耦合、非线性、冗余等特点<sup>[84]</sup>,高精度控制非常困难。尤其是当机器人处于悬停状态时,UVMS 控制必须同时处理养殖水体内部复杂扰流及机械手反作用力扰动,精准养殖作业难度更大。UVMS 通常有两种控制方式:(1)将机器人和机械手视为两个单独系统,在单系统的控制过程中处理耦合作用的影响;(2)将机器人和机械手视为一个整体,设计整体运动控制策略。UVMS 的控制算法主要包括滑模控制、模糊专家控制、神经网络控制、模型预测控制等。Hachicha 等<sup>[85]</sup>面向船体清洁任务设计了携带 2 只机械手的 UVMS,克服了机器人清洁工况的不稳定影响,实现了姿态稳定控制。Heshmati-Alamdari 等<sup>[86]</sup>提出了一种 UVMS 力/位置跟踪控制方法,不需要依赖精确动力学、干扰及接触刚度模型,具有良好的鲁棒性。Londhea 等<sup>[87]</sup>面向深海干预任务,提出了一种具有干扰估计功能的非线性模糊控制方法,实现了 UVMS 的任务空间鲁棒控制。

此外,为避免在抓取过程中对鱼类等软体水产生物造成伤害,水产养殖水下机器人所搭载的机械手也应进行特殊设计。采用柔性机械手是一种良好的解决方案<sup>[88-89]</sup>。相较于传统的刚性机械手,柔性机械手多采用液态金属、橡胶等软体材料,或采用多指抓取、类章鱼触手卷曲抓持和基于负压变形的薄

膜抓持等结构形式。Ilievski 等<sup>[90]</sup>研制了一种新型 6 指软体机械手,主要用于生物化学领域,具有良好的柔顺性、适应性。Wang 等<sup>[91]</sup>设计了一种全部采用软体材料 3D 打印技术制作的 3 指软体机械手,提出了手指弯曲变形的动力学模型,并进行了抓取实验。然而,柔性机械手在夹持水产品的过程中可能面临很多问题:软体材料在应力、寿命和撕裂强度等方面的性能难以满足频繁、长期使用的需求;柔性软体机械手在夹持水产品时,可能会产生柔性变形,很难建立精确的模型;柔性结构、负载变化等对抓取性能影响十分明显,可能会产生水产品抓取不稳定的现象。因此,如何兼顾抓取的准确性、可靠性及安全性将是柔性机械手设计中必须解决的问题。

### 3 展 望

近年来,水下机器人飞速发展,且由于其突出的装备与技术优势,在水产养殖业中有着广阔的应用空间。但是,目前受限于成本、装备适用性等问题,水产养殖水下机器人的应用仍十分有限。未来,在养殖监测及作业方面,水产养殖水下机器人还有很多问题亟待解决。具体表现在如下方面:

1) 养殖环境智能综合感知。现有的水产养殖监测手段单一、可靠性低、灵活性差。基于水下机器人、无人机、传感器节点和物联网等技术,构建立体式综合探测网络,从空中、水面、水下三个方向,运用定点与巡检、遥测与接触式测量等多种手段,实现养殖环境的智能综合感知,将是未来的重要发展方向。

2) 养殖对象生理及行为特征提取与辨识。水产养殖水下机器人搭载声呐、激光等多种探测设备,借助声、光、电等多元手段,采用模式识别与人工智能算法,实现养殖对象种类、数量、体质量、尺寸、姿态、移动轨迹和空间分布等特征的提取与辨识,可为水产养殖环境调控与作业提供良好的依据。

3) 可靠、低成本的智能化装备。目前水产养殖水下机器人成本仍然相对偏高,普通水产养殖户难以接受,制约了其在水产养殖业中的推广应用。大力发展低成本的成熟模块以及提升装备集成水平,将是建造可靠低成本的智能化装备的关键措施,也是未来在水产养殖业中推广的重要方向。



## 参考文献 References

- [1] 范建平.影响我国海洋经济可持续发展的重大问题分析[J].中国管理信息化,2017,20(12):115-116.FAN J P. Analysis of major issues affecting sustainable development of China's marine economy[J].China management informationization,2017,20(12):115-116(in Chinese).
- [2] 董双林.论我国水产养殖业生态集约化发展[J].中国渔业经济,2015,33(5):4-9.DONG S L. On ecological intensification of aquaculture systems in China[J].Chinese fisheries economics,2015,33(5):4-9 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘文武,刘刊,徐伟刚,等.我国潜水行业的现状与潜水员的健康安全管理建议[J].海军医学杂志,2016,37(3):284-286.LIU W W,LIU K,XU W G, et al. Status of diving industry and divers' health and safety management suggestions in China[J]. Journal of navy medicine,2016,37(3):284-286(in Chinese).
- [4] ZHANG Q,ZHANG J L,CHEMORI A, et al. Virtual submerged floating operational system for robotic manipulation[J/OL].Complexity,2018(1):18[2020-12-23]. https://doi.org/10.1155/2018/9528313.2018.
- [5] SHOJAEI K,DOLATSHAHI M. Line-of-sight target tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles [J]. Ocean engineering,2017,133:244-252.
- [6] KARIMANZIRA D,JACOBI M,PFUETZENREUTER T, et al. First testing of an AUV mission planning and guidance system for water quality monitoring and fish behavior observation in net cage fish farming[J].Information processing in agriculture,2014,1(2):131-140.
- [7] ZHAO Y P,NIU L J,DU H, et al. An adaptive method of damage detection for fishing nets based on image processing technology[J/OL].Aquacultural engineering,2020,90:102071 [2020-12-23]. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102071.
- [8] LI D W,XU L H,LIU H Y. Detection of uneaten fish food pellets in underwater images for aquaculture[J].Aquacultural engineering,2017,78:85-94.
- [9] THOMSON J S,AL-TEMEEMY A A,ISTED H, et al. Assessment of behaviour in groups of zebrafish (*Danio rerio*) using an intelligent software monitoring tool,the chromatic fish analyser [J/OL].Journal of neuroscience methods,2019,328:108433 [2020-12-23]. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2019.108433.
- [10] 王润田,陈晶晶,龚剑彬.深水网箱养殖中的声学监测问题探讨[J].渔业现代化,2012,39(3):19-22. WANG R T,CHEN J J,GONG J B. Acoustic monitoring for ocean aquaculture in sea cage [J].Fishery modernization,2012,39(3):19-22(in Chinese with English abstract).
- [11] RUNDTOP P,FRANK K. Experimental evaluation of hydroacoustic instruments for ROV navigation along aquaculture net pens[J].Aquacultural engineering,2016,74:143-156.
- [12] FØRE M,FRANK K,NORTON T, et al. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture [J].Biosystems engineering,2018,173:176-193.
- [13] FROST A R,MCMASTER A P,SAUNDERS K G, et al. The development of a remotely operated vehicle (ROV) for aquaculture[J].Aquacultural engineering,1996,15(6):461-483.
- [14] SHI C,WANG Q B,HE X L, et al. An automatic method of fish length estimation using underwater stereo system based on LabVIEW[J/OL].Computers and electronics in agriculture,2020,173:105419 [2020-12-23]. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105419.
- [15] SUN M,HASSAN S G,LI D L. Models for estimating feed intake in aquaculture;a review[J]. Computers and electronics in agriculture,2016,127:425-438.
- [16] LI D L,WANG Z H,WU S Y, et al. Automatic recognition methods of fish feeding behavior in aquaculture;a review[J/OL].Aquaculture,2020,528:735508 [2020-12-23]. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735508.
- [17] 房熊,林礼群,沈熙晟,等.一种渔业水下机器人的系统设计及模型研究[J].渔业现代化,2018,45(2):36-41.FANG X,LIN L Q,SHEN X S, et al. System design and model research of a fishery underwater robot[J].Fishery modernization,2018,45(2):36-41(in Chinese with English abstract).
- [18] 卜力群.水下无人作业水产养殖机器人;201510244554.0[P].2015-08-05.BU L Q. Underwater unmanned aquaculture vehicle;201510244554.0[P].2015-08-05(in Chinese).
- [19] 周建龙.一种水产养殖机器人;201811630761.X[P].2019-03-15. ZHOU J L. An aquaculture vehicle;201811630761.X[P].2019-03-15(in Chinese).
- [20] 刘冠灵,卫泓宇,李志鹏,等.履带式深海网箱清洗机器人的设计[J].机械制造,2019,57(4):11-14.LIU G L,WEI H Y,LI Z P, et al. Design of crawler-type deep-sea cage cleaning robot[J].Machinery,2019,57(4):11-14 (in Chinese with English abstract).
- [21] CARBAJAL-HEMANDEZ J J,SÁNCHEZ-FERMÁNDEZ L P,VILLA-VARGAS L A, et al. Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process[J].Ecological indicators,2013,29:148-158.
- [22] LI C,LI Z B,WU J, et al. A hybrid model for dissolved oxygen prediction in aquaculture based on multi-scale features[J]. Information processing in agriculture,2018,5(1):11-20.
- [23] 纪培国,李帅帅,汤华鹏,等.水产养殖水质监测仿生机器鱼[J].装备制造技术,2020(7):82-86.JI P G,LI S S,TANG H P, et al. Biomimetic robotic fish for aquaculture water quality monitoring[J]. Equipment manufacturing technology,2020,7:82-86(in Chinese with English abstract).
- [24] O'CONNELL E,HEALY M,OKEEFFE S, et al. A mote inter-

- face for fiber optic spectral sensing with real-time monitoring of the marine environment[J]. *IEEE sensors journal*, 2013, 13(7): 2619-2625.
- [25] 刘雨青, 陈泽华, 曹守启. 基于物联网的水质传感器监控及自清洗装置设计[J]. *渔业现代化*, 2019, 46(4): 42-48. LIU Y Q, CHEN Z H, CAO S Q. Design of water quality sensor monitoring and self-cleaning device based on internet of things[J]. *Fishery modernization*, 2019, 46(4): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- [26] 何慧梅. 基于多传感器数据融合的水质异常检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. HE H M. Research on water quality anomaly detection using multi-sensor data fusion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [27] 宋剑文. 智能水产养殖系统的预测预警技术研究[D]. 海口: 海南大学, 2018. SONG J W. Study on forecasting and warning technology of intelligent aquaculture system[D]. Haikou: Hainan University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [28] 樊春春. 基于物联网的水产养殖远程智能监控系统的设计[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019. FAN C C. Design of remote intelligent monitoring system for aquaculture based on internet of things[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘双印. 基于计算智能的水产养殖水质预测预警方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. LIU S Y. Prediction and early-warning of water quality in aquaculture based on computational intelligence[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [30] YU X, ZHANG Y, YIN G, et al. Discrimination of three dimensional fluorescence spectra based on wavelet analysis and independent component analysis[J]. *Spectrochimica acta. Part A: Molecular and biomolecular spectroscopy*, 2014, 124: 52-58.
- [31] 鄂旭, 杨芳, 侯建, 等. 水产养殖水质预警指标约简算法研究[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(2): 89-94. E X, YANG F, HOU J, et al. Reduction algorithm of aquaculture water quality early warning indexes[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(2): 89-94 (in Chinese with English abstract).
- [32] ZHU Y Z, NAN C. Dynamic forecast of regional groundwater level based on grey Markov chain model[J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2011, 33: 71-75.
- [33] 朱丽楠, 官淦, 王永军, 等. 典型湖库富营养化的模糊综合评价研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(9): 1131-1136. ZHU L N, GUAN D, WANG Y J, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water eutrophication of typical lakes and reservoirs[J]. *Resources and environment in the yangtze basin*, 2012, 21(9): 1131-1136 (in Chinese with English abstract).
- [34] ZOU S, YU Y S. A dynamic factor model for multivariate water quality time series with trends[J]. *Journal of hydrology*, 1996, 178(1/2/3/4): 381-400.
- [35] HUTTULA T, PELTONEN A, FRIST T, et al. Accuracy of water quality predictions with loading scenarios of forest industry waste waters[J]. *Water science and technology*, 1999, 40(11/12): 147-151.
- [36] 张金泉, 胡庆松, 申屠基康, 等. 海上网箱网衣检测用框架式 AUV 设计与试验[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(4): 607-612. ZHANG J Q, HU Q S, SHENTU J K, et al. Frame-type AUV design and experiment for sea cage net damage detection[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(4): 607-612 (in Chinese with English abstract).
- [37] 赵欣慰. 水下成像与图像增强及相关应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. ZHAO X W. The research on underwater imaging, underwater image enhancement and relevant applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [38] SCHETTINIR, CORCHS S. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods[J]. *EURASIP journal on advances in signal processing*, 2010(1): 1-14.
- [39] 刘和祥. 面向 AUV 回收控制的水下机器视觉研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. LIU H X. Research of underwater machine vision for AUV docking control[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [40] 郑勇, 郑卫刚. 简述水下机器人及其发展方向[J]. *智能机器人*, 2019(6): 41-44. ZHENG Y, ZHENG W G. Brief introduction of underwater vehicle and its development[J]. *Intelligent robot*, 2019(6): 41-44 (in Chinese).
- [41] 郭威, 崔胜国, 赵洋, 等. 一种遥控水下机器人视频监控系統[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(4): 162-164. GUO W, CUI S G, ZHAO Y, et al. A kind of video transmission and monitoring system applied in ROV[J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2008, 29(4): 162-164 (in Chinese with English abstract).
- [42] 张志根. 面向水下监测的移动式视频实时传输系统设计及实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. ZHANG Z G. Design and implementation of a mobile real-time video transmission system for underwater monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [43] 王中琦. 具有抗误码能力的水下视频图像高效编码方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. WANG Z Q. Research of efficient and error-resilient underwater video coding method[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [44] 刘佳旭. 基于 DSP 的水下视频压缩编码系统研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. LIU J X. Study on DSP-based underwater video coding system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [45] HOAG D F, INGLE V K, GAUDETTE R J. Low-bit-rate coding of underwater video using wavelet-based compression algorithms[J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 1997, 22(2):

- 393-400.
- [46] KOJIMA J, URA T, ANDO H, et al. High-speed acoustic data link transmitting moving pictures for autonomous underwater vehicles[C]//Anon. Proceeding of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, 2002. [S. l.: s. n.], 2002: 278-283.
- [47] 余琨. 基于视觉与接近觉的水下多目标定位技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. YU K. Research on underwater multi-targets location based on vision and proximate sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [48] 宋波. 水下目标识别技术的发展分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(4): 168-173. SONG B. Development analysis of the underwater target recognition technology[J]. Ship electronic engineering, 2014, 34(4): 168-173 (in Chinese with English abstract).
- [49] 皮志锋. 海参捕捞机器人技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017. PI Z F. Research on the technology of sea cucumber fishing robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [50] PARAGIOS N, DERICHE R. Geodesic active contours and level sets for the detection and tracking of moving objects[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(3): 266-280.
- [51] 赵春梅. 水下图像分割和目标特征提取及识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. ZHAO C M. Research on underwater image segmentation and target feature extraction and recognition technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [52] 王卫华, 陈卫东, 席裕庚. 光线自适应的水下管线识别与定位系统[J]. 机器人, 2001, 23(2): 132-136. WANG W H, CHEN W D, XI Y G. Illumination adaptive recognition and location system for underwater pipeline[J]. Robot, 2001, 23(2): 132-136 (in Chinese with English abstract).
- [53] KIM W, LEE C Y, LEE J J. Tracking moving object using Snake's jump based on image flow[J]. Mechatronics, 2009, 11(2): 199-216.
- [54] PAULL L, SAEEDI S, SETO M, et al. AUV navigation and localization: a review[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [55] STUTTERS L, LIU H, TILLMAN C, et al. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles[J]. IEEE transactions on systems man and cybernetics Part C: applications and reviews, 2008, 38(4): 581-589.
- [56] 冯正平. 国外自治水下机器人发展现状综述[J]. 鱼雷技术, 2005, 13(1): 5-9. FENG Z P. A review of the development of autonomous underwater vehicles (AUVs) in western countries [J]. Torpedo technology, 2005, 13(1): 5-9 (in Chinese with English abstract).
- [57] 孙玉山, 万磊, 庞永杰. 潜水器导航技术研究现状与展望[J]. 机器人技术与应用, 2010(1): 34-42. SUN Y S, WAN L, PANG Y J. Development and prospect of submarine navigation technology[J]. Robot technique and application, 2010(1): 34-42 (in Chinese).
- [58] 张钧凯. 水下机器人导航定位技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015. ZHANG J K. Research of navigation and positioning technology for underwater robot[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [59] KUSSAT N H, CHADWELL C D, ZIMMERMAN R. Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2005, 30(1): 153-164.
- [60] VASILJEVIC A, BOROVIC B, VUKIC Z. Underwater vehicle localization with complementary filter: performance analysis in the shallow water environment[J]. Journal of intelligent robotic systems, 2012, 68(3): 373-386.
- [61] LOEBIS D, SUTTON R, CHUDLEY J, et al. Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system[J]. Control engineering practice, 2004, 12(12): 1531-1539.
- [62] DONOVAN G T. Position error correction for an autonomous underwater vehicle inertial navigation system (INS) using a particle filter[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2012, 37(3): 431-445.
- [63] LIU Q, XU X S, HAN B. An integrated navigation method based on SINS/DVL-WT for AUV[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 303/304/305/306: 904-907.
- [64] LÜ P F, HE B, GUO J, et al. Underwater navigation methodology based on intelligent velocity model for standard AUV[J/OL]. Ocean engineering, 2020, 202: 107073 [2020-12-23]. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107073>
- [65] ZHANG L Y, LIU L, ZHANG L. Research on position correction method for AUV large depth navigation based on ranging positioning[J]. Computer communications, 2020, 150: 747-756.
- [66] SUN D J, GU J, HAN Y F, et al. Inverted ultra-short baseline signal design for multi-AUV navigation[J]. Applied acoustics, 2019, 150: 5-13.
- [67] BAO J H, LI D L, QIAO X, et al. Integrated navigation for autonomous underwater vehicles in aquaculture: a review[J]. Information processing in agriculture, 2020, 7(1): 139-151.
- [68] 孙玉山, 冉祥瑞, 张国成, 等. 智能水下机器人路径规划研究现状与展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1111-1116. SUN Y S, RAN X R, ZHANG G C, et al. Research status and prospect of path planning for autonomous underwater vehicles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(8): 1111-1116 (in Chinese with English abstract).
- [69] 钟雨轩, 葛磊, 张鑫, 等. 无人水面艇岛礁海域完全遍历路径规



- 划[J].上海大学学报(自然科学版),2017,23(1):17-26.  
ZHONG Y X,GE L,ZHANG X,et al.Complete coverage path planning of USV used for mapping round island[J].Journal of Shanghai University(natural science edition),2017,23(1):17-26(in Chinese with English abstract).
- [70] YAN M Z,GAO F,QIN X S,et al.Sonar-based local path planning for an AUV in large-scale underwater environments[J].Indian journal of geo-marine sciences,2017,46(12):2527-2535.
- [71] SUN Y S,RAN X R,ZHANG G C,et al.AUV 3D path planning based on the improved hierarchical deep Q network[J].Journal of marine science and engineering,2020,8(2):145.
- [72] 晏刚,周俊.水下机器人智能控制技术综述[J].电子世界,2013(24):21-22.YAN G,ZHOU J.A Summary of research on underwater robot intelligent control technology[J].Electronics world,2013(24):21-22(in Chinese).
- [73] GAO Z Y,GUO G.Velocity free leader-follower formation control for autonomous underwater vehicles with line-of-sight range and angle constraints[J].Information sciences,2019,486:359-378.
- [74] XIANG X B,YU C,ZHANG Q.Robust fuzzy 3D path following for autonomous underwater vehicle subject to uncertainties[J].Computers & operations research,2017,84:165-177.
- [75] 洪晔,边信黔.基于传感器信息的水下机器人动态避障研究[J].传感器与微系统,2007,26(1):24-26,29.HONG Y,BIAN X Q.Study on dynamic obstacle avoidance method for AUV based on sensor information[J].Transducer and microsystem technologies,2007,26(1):24-26,29(in Chinese with English abstract).
- [76] 纪兴,庞永杰,肖泽,等.基于前视声呐信息的 AUV 避障策略[J].舰船科学技术,2013,35(11):76-80,85.JI X,PANG Y J,XIAO Z,et al.Research on obstacle avoidance based on forward looking sonar for AUV[J].Ship science and technology,2013,35(11):76-80,85(in Chinese with English abstract).
- [77] 杨咏文,黄汉英,冯婉娴,等.基于被动水声信号的淡水鱼混合数量预测[J].华中农业大学学报,2020,39(5):147-152.YANG Y W,HUANG H Y,FENG W X,et al.Mixed quantities prediction of freshwater fish based on passive underwater[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(5):147-152(in Chinese with English abstract).
- [78] GUO J H,HU P,WANG R B.Nonlinear coordinated steering and braking control of vision-based autonomous vehicles in emergency obstacle avoidance[J].IEEE transactions on intelligent transportation systems,2016,17(11):3230-3240.
- [79] 秦峰,刘甜甜,尤海鹏,等.基于图像识别的水下机器人自主避障系统[J].兵工自动化,2012,31(11):87-90.QIN F,LIU T T,YOU H P,et al.Autonomous avoidance system of underwater robot based on image recognition[J].Ordnance industry automation,2012,31(11):87-90(in Chinese with English abstract).
- [80] 孙玉山,张英浩,常文田,等.基于改进运动平衡点的水下机器人自主避障方法研究[J].中国造船,2013,54(2):17-25.SUN Y S,ZHANG Y H,CHANG W T,et al.An AUV obstacle-avoidance method based on improving balance point of motion[J].Shipbuilding of China,2013,54(2):17-25(in Chinese with English abstract).
- [81] 朱大奇,孙兵,李利.基于生物启发模型的 AUV 三维自主路径规划与安全避障算法[J].控制与决策,2015,30(5):798-806.ZHU D Q,SUN B,LI L.Algorithm for AUV's 3-D path planning and safe obstacle avoidance based on biological inspired model[J].Control and decision,2015,30(5):798-806(in Chinese with English abstract).
- [82] 李道亮,包建华.水产养殖水下作业机器人关键技术研究进展[J].农业工程学报,2018,34(16):1-9.LI D L,BAO J H.Research progress on key technologies of underwater operation robot for aquaculture[J].Transactions of the Chinese society of agricultural engineering,2018,34(16):1-9(in Chinese with English abstract).
- [83] 徐长密.水下机器人:机械手系统动力学建模及运动控制研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.XU C M.Dynamic modeling & motion control of underwater vehicle-manipulator system[D].Qingdao:Ocean University of China,2010(in Chinese with English abstract).
- [84] ISMAIL Z H,DUNNIGAN M W.Tracking control scheme for an underwater vehicle-manipulator system with single and multiple sub-regions and sub-task objectives[J].IET control theory and applications,2011,5(5):721-735.
- [85] HACHICHA S,ZAOUI C,DALLAGI H,et al.Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning[J].Ocean engineering,2019,181:303-313.
- [86] HESHMATI-ALAMDARI S,BECHLIOULIS C P,KARRAS G C,et al.A robust interaction control approach for underwater vehicle manipulator systems[J].Annual reviews in control,2018,46:315-325.
- [87] LONDHEA P S,MONHANB S,PATRE B M,et al.Robust task-space control of an autonomous underwater vehicle-manipulator system by PID-like fuzzy control scheme with disturbance estimator[J].Ocean engineering,2017,139:1-13.
- [88] 游显成,俞经虎,钱善华,等.柔性软体机械手的设计及变形研究[J].现代制造工程,2020(10):45-50.YOU X C,YU J H,QIAN S H,et al.Research on design and deformation of flexible soft-bodied manipulator[J].Modern manufacturing engineering,2020(10):45-50(in Chinese with English abstract).
- [89] 杨孟涛,黎泽伦,杨永刚.一种组合式气动柔性机械手设计[J].液压与气动,2020(5):52-55.YANG M T,LI Z L,YANG Y G.Design of a combined pneumatic flexible manipulator[J].Chinese hydraulics & pneumatics,2020(5):52-55(in Chinese with English abstract).
- [90] ILIEVSKI F,MAZZEO A D,SHEPHERD R F,et al.Soft ro-

- botics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 150(8): 1890-1895.
- [91] WANG Z, HIRAI S. A 3D printed soft gripper integrated with curvature sensor for studying soft grasping[C]//IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 09 February 2017, Sapporo.[S.l.: s.n.], 2017: 629-633.

## Progress of underwater robots for aquaculture

XIA Yingkai<sup>1,2</sup>, ZHU Ming<sup>1,2</sup>, ZENG Xin<sup>1</sup>, WANG Yicai<sup>1</sup>, QI Xianghong<sup>1</sup>

1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

2. *Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China*

**Abstract** Aquaculture is one of the fastest growing industries in the food industry worldwide, providing more than half of the aquatic products for human beings. However, aquaculture is currently facing problems including low degree of mechanization and automation, low production and efficiency, and so on. Therefore, it is urgent to be transformed and upgraded. The underwater robot is a mobile and flexible underwater operation equipment. Compared with traditional underwater operations, it has obvious advantages in terms of operating methods, scope, and adaptability. After being applied to aquaculture monitoring and operations, it is expected to change the existing aquaculture mode, promote the transformation of the aquaculture industry to mechanization, engineering and intelligence, and alleviate the development crisis of the aquaculture industry. Although underwater robots have developed vigorously in recent years, its application in the aquaculture industry is still very limited, and there are still many technical bottlenecks that have not been resolved. This article focuses on the practical application of underwater robots for aquaculture, and analyzes the key technologies covering water quality monitoring, video surveillance and transmission, target recognition and positioning, high-precision underwater guidance, intelligent planning and motion control, and precise operations of underwater vehicle-manipulator systems in detail. The direction of future development is prospected to provide a comprehensive reference for studying and applying underwater robots for aquaculture.

**Keywords** precision aquaculture; underwater robots; water quality monitoring; target recognition and positioning; intelligent planning and control; image capture and acquisition; flexible manipulator

(责任编辑:陆文昌)