

【引用格式】凌锴垚, 潘汉, 敬忠良, 等. 面向水下动态对接的UUV目标感知系统架构研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(6): 648-654.

面向水下动态对接的UUV目标感知系统架构研究

凌锴垚, 潘汉*, 敬忠良, 嵩布尔, 张旭阳
(上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘要 无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 因其所具有的高机动性、高智能化、高可操纵性等特点, 正逐渐成为各国水下攻防领域的研究热点, 而由于UUV所携带能源有限, 需要与水上平台或者母船进行对接充能, 因此开展水下自主对接领域的研究十分必要。以往的研究多聚焦于UUV的运动规划与控制算法或是对接过程中UUV与坞站的相互影响, 鲜有对水下感知体系的系统性研究。以水下动态对接任务为研究背景, 调研了国内外机构的相关任务的导引技术方案, 对多波束声呐、激光雷达和水下电磁传感器进行了原理与特性分析, 并对多波束成像声呐做了仿真实验, 提出了一个面向水下动态对接的协同感知导引系统架构及方案。该架构能够根据水下动态对接任务各阶段的需求与相关传感器的特性进行灵活调整传感器的工作优先级, 以保证整个对接任务阶段都能为回收平台与UUV平台提供有效的对接信息。

关键词 UUV; 水下动态对接; 多波束声呐

中图分类号 TP249

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)06-0648-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.06.010

Architecture of Target Perception System for Underwater Dynamic Docking with Unmanned Underwater Vehicles

LING Kaiyao, PAN Han*, JING Zhongliang, SONG Buer, ZHANG Xuyang

(School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract UUVs (Unmanned Underwater Vehicles) characterized by high maneuverability, intelligence, and operability, are becoming a focal point of research in the underwater offensive and defensive fields for various countries. Due to the limited energy carried by the UUV, the need for energy replenishment through docking with surface platforms or motherships necessitates the exploration of underwater autonomous docking research. Previous studies predominantly concentrated on motion planning and control algorithms of the UUV or the mutual influence between UUV and docking station during the docking process, but there are few systematic studies on underwater perception systems. In This paper, some guidance technology schemes related to underwater dynamic docking mission of institutions at home and abroad are invested, the principles and characteristics of multibeam sonars, laser radar, and underwater electromagnetic sensors are analyzed, and simulation experiments on multi-beam imaging sonar are conducted. A collaborative perception guidance system architecture for underwater dynamic docking is proposed. This architecture can flexibly adjust the operational priority of sensors according to the requirements of each stage of the underwater dynamic docking mission and the characteristics of the relevant sensors, so as to ensure

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 凌锴垚 (2001-), 男, 硕士生, 主要从事目标检测与跟踪研究。

*通信作者: 潘汉 (1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事目标探测成像与跟踪识别、自主导航、黎曼流形优化研究。

that effective docking information can be provided for both the recovery platform and the UUV platform throughout the entire docking mission stage.

Key words unmanned underwater vehicle; underwater dynamic docking; multibeam sonar

0 引言

近年来,无人水下航行器^[1](Unmanned Underwater Vehicle, UUV)因其所具有的高机动性、高智能化、高可操纵性等特点,正逐渐成为各国水下攻防领域的研究热点。尤其是在水雷对策^[2]、监视和侦察以及反潜战等领域中,具有优异表现的 UUV 俨然成为主要解决方案。然而,由于 UUV 自身可携带的能源有限^[1, 3-4],并不能长时间在水下工作,在完成任任务后,需要通过与母船或者潜艇平台进行对接来补充能源并上载数据。而相比于目前发展较为成熟的水面母船回收^[4]方式,水下动态对接能够弥补前者受气候影响大、成本高、隐蔽性差等缺点。因此,国内外学者针对 UUV 的水下动态对接问题产开了广泛而深入的研究。

针对 UUV 的水下动态对接任务可以分为返航^[5]与回收 2 个阶段,在返航阶段,超短基线定位系统(Ultra-Short Base Line, USBL)能够得到 UUV 在水下的位置信息从而实现对接的导引。然而,当任务进行至回收阶段时,USBL 所提供的定位信息精确度不足,难以达到任务需求,因此需要针对回收阶段设计感知定位框架。

水下流场具有干扰因素多、光学条件差、通信延迟高^[4]等特点。自动驾驶或是移动机器人领域内的一些成熟的传感体系由于硬件因素,无法直接移植到水下环境中。如何在克服水下环境诸多不利因素的同时,还能提供高精度的位姿信息。这无疑是对传感体系设计的一大挑战。且在动态对接任务中,由于对接平台与 UUV 都处在运动状态,对感知系统的实时性也有非常高的要求。目前各研究单位已经实装的水下对接系统主要聚焦的是如何实现精确的控制^[5-7]来提高整个系统的稳定性,鲜有对水下感知体系的系统性研究。

因此,本文在总结国内外先进技术的基础上,简述 3 种传感器工作原理并开展特性分析,提出了一种面向水下动态对接的协同感知导引系统方案。

该系统包含多波束前视声呐、双目相机、激光雷达、USBL 与水下电磁定位网络。最后,本文对方案中的多波束前视声呐进行了仿真验证。仿真结果验证了多波束前视声呐传感器的适配性、有效性。

1 水下动态对接国内外研究现状

1.1 美国

美国在相关领域的研究起步较早,伍兹霍尔海洋研究所早在 1997 年便提出了相对声学跟踪系统^[8](Relative Acoustic Tracking System, RATS),一种基于超短基线的导引方案。Hydroid 公司在解决 REMUS-100 UUV 的对接问题时,采用了数字超短基线^[9](Digital Ultra Short Base Line, DUSBL)的导引方案。德克萨斯大学奥斯汀分校的 ARTEMIS^[10]团队在解决冰下潜航器的自主对接时,提出了跟踪 LED 灯的光学导引方案,即 AUV 对一发光对接杆进行识别与跟踪,并于 2015 年在南极成功完成了海试。



图 1 美国 REMUS 100 UUV
Fig. 1 U.S. REMUS 100 UUV

1.2 日本与韩国

日本各研究机构中最具代表性的成果有川崎重工研制的 Marine Bird 系统^[11]和东京大学团队的 TriTON2^[12]。前者采用的是差分全球定位系统搭配上深度传感器提供位置信息,辅以短基线用于声学导引;后者则采用的是远距离 USBL 声学导引,近距离采用前视摄像头识别回收站的人工地标进入回收站^[13]。而来自东京海洋大学的 KOLABOT^[14]

团队采用三色 LED 光源进行视觉导引,并辅以声学导引,该方案已于 2011 年完成水池实验。

韩国人形机器人研究中心与韩国海洋科学研究院海洋工程研究部的团队提出了一种基于电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 相机的实现 AUV 试验台 ISiMI^[15]水下对接的方法。AUV 由安装在对接站入口周围的灯和 AUV 内由 CCD 相机和帧捕获器组成的视觉系统进行光学引导。

1.3 中国

国内相关研究起步较晚,但近年来飞速发展。比较有代表性的研究单位有哈尔滨工程大学^[16]、西北工业大学^[17]、浙江大学^[18]、中国科学院沈阳自动化研究所^[19]、天津大学^[20]等。

哈尔滨工程大学^[16]相关团队采用了远距离声学导引,近距离双目视觉导引的融合感知方案。在 AUV 的前端安装了 2 个相机,而对接坞安装了 4 个固定的导引 LED 灯,于 2014 年的水池实验中验证了方案的可行性。

浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室的海豚二号采用了视觉导引^[18]的方式,并采用了锥形对接坞,分析了对接过程中 UUV 与坞站的相互影响。在此基础上,该团队还开发了一款基于虚拟现实的无人潜航器对接虚拟仿真系统^[21],极大地降低了相关研究开展的成本问题以及实验难度。

中国科学院沈阳自动化研究所“探索者号”AUV 团队采用了远端超短基线导引,近端视觉对准的导引方案,同时还研究了 AUV 对接过程的水

动力问题^[19],该团队成功完成了海试,方案具有可行性。

1.4 总结

综上所述,国内外学者已经在水下动态对接领域取得了许多研究进展,根据不同的任务需求,提出了一系列的导引方案并且通过水池试验或是海试证明了可行性。但所提出的方案大多采用不多于两种传感器的导引方式,对不同的水下环境并不具有泛用性。例如当水域可见度低时,采用近端视觉导引的方案便难以提供足够高的数据精度,进而可能导致任务失败。因此本文在结合现行技术方案的基础上,补充研究了用于协同感知的多种传感器,以期从系统架构设计的角度提高水下目标感知系统的泛用性。

2 水下多传感器工作原理与特性分析

2.1 主要传感器特性分析

虽然 UUV 对于各种水下任务来说是非常高效和安全的解决方案,但所配备的传感模式的局限性使水下感知变得困难^[22]。在远距离(通常指 30 m 到 10 km 以外)物体感知中,声学传感器是唯一能够提供可靠结果的传感器类型;中距离物体感知则可以依靠声学与光学传感器实现;而对于近距离(通常指距 UUV 为 1 m 以内)物体感知,多波束声呐拥有较高的分辨率,水下光学传感器具有最佳的可视性,水下无线传感器网络(Underwater Wireless Sensor Network, UWSN)具有最为稳定的性能。

表 1 主要水下传感器工作特性

Table 1 Operating characteristics of main underwater sensors

传感器	工作距离/m	可用数据	数据精度	数据类型
USBL	30~10 000	距离、航向	1%~5%@距离	绝对
EM 电磁传感器	0~10	相对信号源的距离、角度	± 5~10 cm	绝对
多波束前视声呐	0~120	距离	1%~5%@距离	相对
激光雷达	0~12	点数据、距离	1%~5%@距离	相对
双目相机	0~10	图像	可变	相对

2.2 2D 成像声呐原理及特性

多波束前视成像声呐^[23]作为一种水下传感设备,具有高分辨率、覆盖范围大且实时性好的特点。其探测原理是发射器在垂直方向上沿一定角度发射波束,接收器利用回声的返回时间计算距离:

$$R = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

通过记录距离、角度以及回声强度形成束型二维图像。回声强度是由接收器单位面积上的功率来定义的。在声波传输过程中,其强度随着距离

R 衰减:

$$I_1 = k \frac{I_0}{R^2} \quad (2)$$

式中: I_0 为距离声源 1 m 处的声波强度; k 为比例系数。入射声功率与散射部分之间的关系是由目标表面特性决定的, 相对于声呐的波长而言, UUV 的表面是粗糙的, 可以用漫反射来模拟其反射特性。并服从朗伯模型。由此可推得单个波束回声强度 I_s 的表达式为

$$I_s = \mu I_1 \cos^2 \alpha \quad (3)$$

式中: μ 表示表面反射率; α 表示表面法线方向与入射声方向的夹角。结合两式可以计算出接收器处测得的强度 I_M 为

$$I_M = \mu k^2 \frac{I_0}{R^4} \cos^2 \alpha \quad (4)$$

无数个以 I_M 为平均强度的无穷小亮斑构成了目标亮斑, 从而可以通过此亮斑估计目标位置信息。

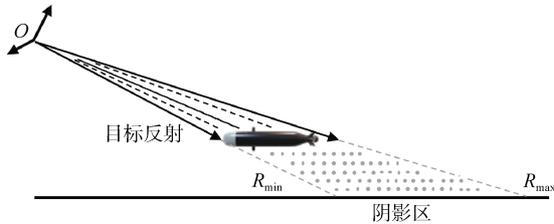


图 2 成像声呐探测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging sonar detection

2.3 激光雷达测量原理及特性

相较于光学传感器而言, 激光雷达^[24]能够独立于水下光照条件工作, 能够提供高分辨率的三维点云数据, 从而以非常高的精度测量目标物体与传感器之间的距离。其测量原理为三角测距法。激光器发射激光, 在照射到物体后, 反射光由线性 CCD 接收, 不同距离的物体将会成像在 CCD 上不同的位置。按照三角公式进行计算, 就能推导出被测物体的距离。

但激光雷达在水下环境中受到水体吸收和散射的影响, 有效探测距离相对较短, 而当探测距离较近时, 相比于多波束声呐而言, 激光雷达的测量精度更高, 精度能够达到毫米级, 非常适合作为回收阶段的主工作传感器使用。

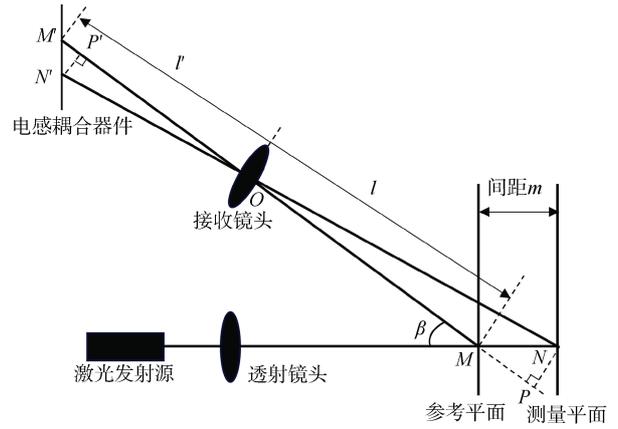


图 3 激光雷达测距原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of LiDAR ranging

2.4 水下电磁定位网络原理及特性

不同于声光传感器易受水文气象环境干扰的特性, 水下电磁定位网络^[25-26]性能稳定可靠、识别能力强且定位精度高。其原理是在水下建立无线传感器网络, 采用电磁波以及其信号接收强度 (Received Signal Strength, RSS) 来估计目标位置信息。对于水下动态对接任务而言, 利用一组射频传感器在对接域构建水下无线传感器网络, 该网络在对接过程中起到一个人工地标的作用。在定位过程中, 每个传感器以某一特定的频率连续发送信号, 当 UUV 在传感器的发射范围内时, 其天线可以接收到该信号。为了从接收到的信号中选择出可靠的信息, 对比半功率波束宽度角度大的信号进行滤除。对这个过程建立 RSS 模型, 可以解算出 UUV 到每个信号源的距离, 从而实现精确定位。

根据弗里斯传输公式^[25]提出了有损介质中的电磁波衰减公式。UUV 的 RSS^[26]信息可以用如下公式表示:

$$RSS^i = -20 \log_{10} d_t^i - 20 d_t^i \alpha \log_{10} e + \Gamma_{\text{angle}, i} + \Gamma_{\text{const}} \quad (5)$$

式中: d_t^i 是每个信号源到 UUV 的距离; Γ_{const} 是恒定损耗; α 为衰减常数; $\Gamma_{\text{angle}, i}$ 是跟 UUV 与信号源相对角度相关的损耗量, 具体可以表示为

$$\Gamma_{\text{angle}, i} = 20 \log_{10} \cos \phi_t^i + 10 n D_T \log_{10} \cos \Theta_t^i + 10 n D_R \log_{10} \cos(\Theta_t^i + \theta_t^i) \quad (6)$$

式中: D_T 和 D_R 为 UUV 天线的最大指向; n 为环境因素。PARK^[25]等人的研究表明, 当传感器传输

功率为 300 mW 时,水下电磁定位网络有效工作距离为 6 m,因此适合在回收阶段时使用。

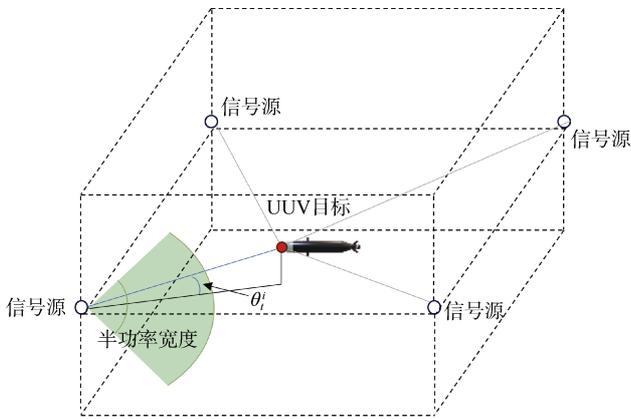


图 4 水下电磁定位原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of underwater electromagnetic positioning

3 面向水下动态对接的协同感知导引系统架构

结合中外学者先进成果,现提出一种面向 UUV 水下自主对接的感知系统,主要由 5 种传感器组成:前视成像声呐、双目相机、水下激光雷达、USBL 以及水下电磁传感器。UUV 感知系统对 UUV 目标的跟踪测量按任务需求分为两个阶段,即返航阶段与回收阶段。根据不同传感器的特性灵活切换,确保返航与回收阶段能有可靠的位姿数据支撑。

在归航阶段,采用 USBL 主导引的方式进行工作,考虑到 USBL 在距离较远时绝对精度不高,采用多波束前视声呐提升位置信息的精度。通过多波束前视声呐成像系统对 UUV 进行定位,可以基于声呐输出的视频序列引入目标跟踪领域内的先进算法对 UUV 进行跟踪,确保 UUV 自身以及回收坞站能够及时更新相对位置信息。

当任务进行到回收阶段,考虑到当 UUV 靠近回收装置与传感器时,声波的散射和反射影响较大,补充激光雷达作为主传感器提供较为精确的位置信息。双目相机为辅的传感策略,UUV 前端搭载用于导引的 LED 灯,双目相机可以通过对导引灯进行识别定位从而解算 UUV 位姿信息。由于目标距离较近,这两种传感器都能提供高精度的位姿

信息,因此当根据具体环境条件灵活选择主传感器。例如,当水下光照条件好、能见度高时,优先选择双目相机作为主传感器,整个操作过程的可视性更好。UUV 的控制算法能够利用这些实时性精确性高的信息对位置进行微调。此时操纵机械手进行抓取回收,即可完成动态对接任务。



图 5 传感器工作阶段

Fig. 5 Working stages of sensors

当 UUV 进入回收区域 5 m 范围内时,声学传感器由于与目标距离过近,其接受的回声会受到诸如回收设备或是其他传感设备的反射与混响,从而引起较大误差;激光雷达与双目相机又容易受到诸如乱流,光照等环境因素的干扰。因此基于多传感器冗余的原则,引入水下电磁定位网络以保证系统的鲁棒性,确保系统在恶劣条件下仍能有较为可靠的工效。



图 6 水下对接系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of underwater docking system

4 面向水下动态对接的前视成像声呐仿真

对水下动态对接任务中 UUV 接近多波束声呐的过程进行仿真,仿真环境设置为密闭的水箱,且忽略水流干扰^[27]。仿真实验的多波束声呐参数设置如表 2。

表 2 仿真参数表
Table 2 Parameters of simulation

设备型号	参数	数值
BlueView P900	频率/kHz	900
	视场角/(°)	90
	波束宽度/(°)	20
	波束数量/束	512

在仿真实验中模拟 UUV 逼近回收装置的过程, 分别记录 UUV 距离声呐 5 m 以及 2.5 m 时的成像效果。

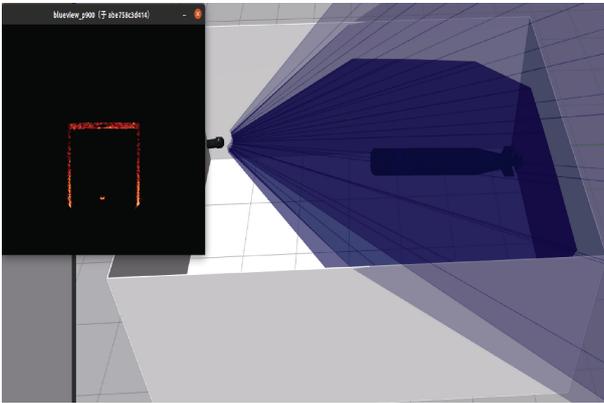


图7 UUV 与声呐相距 5 m
Fig. 7 UUV is 5 meters from sonar

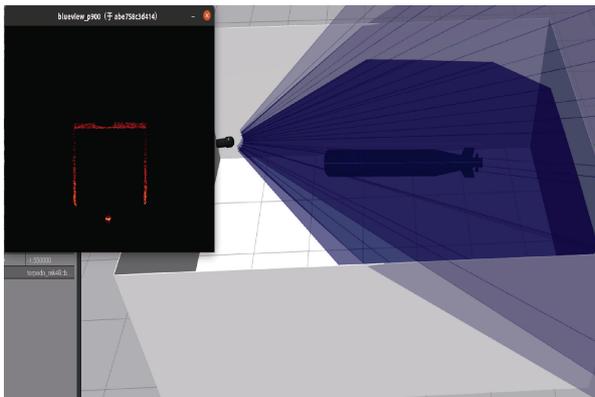


图8 UUV 与声呐相距 2.5 m
Fig. 8 UUV is 2.5 meters from sonar

通过仿真可以发现在排除水流以及其他传感装置的干扰时, 多波束声呐能生成高分辨率的目标图像, 由此能够解算出高精度的位置信息用以保障整个系统的运行。

5 结束语

本文对水下动态对接技术进行了回顾, 归纳了国内外机构针对水下动态对接任务所提出的技术方案及其特点。在此基础上, 面向水下动态对接任务, 提出了一种完整的目标感知架构。主要工作及结论如下:

1) 分析了多波束声呐、双目相机、激光雷达和水下电磁传感器等水下感知技术的原理和特性, 为水下动态对接任务的感知系统设计提供了依据。

2) 通过多波束成像声呐的仿真实验, 验证了该传感器在水下动态对接任务中的适用性。

3) 针对水下动态对接任务的需求, 提出了一套灵活的目标感知架构。该架构能够根据任务阶段和传感器特性, 动态调整感知系统的工作优先级, 确保整个对接过程中 UUV 与回收平台相对位置信息的精确性。

参考文献

- [1] 许光. UUV 水下对接技术发展现状与关键技术[J]. 声学与电子工程, 2019 (4): 1-5, 9.
- [2] 高杰, 田云飞, 许莹, 等. 主成分分析法在 UUV 集群反水雷搜索中的应用[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5 (1): 6-10.
- [3] 袁学庆, 刁家宇, 李卫民, 等. AUV 水下对接的发展与应用现状[J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (5): 1-8.
- [4] 孙叶义, 武皓微, 李晔, 等. 智能无人水下航行器水下回收对接技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40 (1): 1-11.
- [5] YAN Z P, WANG M, XU J. Integrated guidance and control strategy for homing of unmanned underwater vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356 (7): 3831-3848.
- [6] THUYEN N A, ANH H P H. A new docking method for autonomous underwater vehicle using hybrid Lyapunov-sliding mode control[J]. Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development, 2022, 567: 301-313.
- [7] LI Z Y, LIU W D, LI L, et al. Modeling and adaptive controlling of cable-drogue docking system for autonomous underwater vehicles[J]. Adapt Control Signal Process, 2022, 36 (2): 354-372.
- [8] AUSTIN T C, STOKEY R, ALT C V, et al. "RATS", a relative acoustic tracking system developed for deep ocean navigation[C]// OCEANS 97. Halifax: IEEE, 1997.
- [9] STOKEY R, PURCELL M, FORRESTER N, et al. A docking system for REMUS, an autonomous underwater vehicle[C]// OCEANS 97. Halifax: IEEE, 1997.
- [10] KIMBALL P W, CLARK E B, SCULLY M, et al. The ARTEMIS under-ice AUV docking system[J]. Journal of Field Robotics, 2018, 35 (2): 299-308.
- [11] FUKASAWA T, NOGUCHI T, KAWASAKI T, et al. Marine Bird, a new experimental AUV with underwater docking and recharging system[C]// OCEANS 2003. San Diego: IEEE, 2003.
- [12] SATO Y, MAKI T, MATSUDA T, et al. Detailed 3D seafloor imaging of Kagoshima Bay by AUV

- Tri-TON2[C]// 2015 IEEE Underwater Technology (UT). Chennai: IEEE, 2015.
- [13] SATO Y, MAKI T, MASUDA K, et al. Autonomous docking of hovering type AUV to seafloor charging station based on acoustic and visual sensing[C]// 2017 IEEE Underwater Technology (UT). Busan: IEEE, 2017.
- [14] KONDO H, OKAYAMA K, CHOI J K, et al. Passive acoustic and optical guidance for underwater vehicles[C]// OCEANS 2012. Yeosu: IEEE, 2012.
- [15] PARK J Y, JUN B H, LEE P M, et al. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera[J]. Ocean Engineering, 2009, 36 (1): 48-61.
- [16] LI Y, JIANG Y Q, CAO J, et al. AUV docking experiments based on vision positioning using two cameras[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 163-173.
- [17] 李泽宇, 刘卫东, 李乐, 等. 基于 RBF 网络 Q 学习的 AUV 路径跟踪控制方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39 (3): 477-483.
- [18] ZHANG T, LI D J, YANG C J. Study on impact process of AUV underwater docking with a cone-shaped dock[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 176-187.
- [19] WU L H, LI Y P, SU S J, et al. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2014, 85: 110-126.
- [20] ZHAI J S, ZOU B, XU J, et al. Tests for performances of a high-resolution underwater imaging sonar[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 223-227.
- [21] LI H J, HUANG F H, CHEN Z. Virtual-reality-based online simulator design with a virtual simulation system for the docking of unmanned underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112780.
- [22] HUY D Q, SADIOLI N, AZAM A B, et al. Object perception in underwater environments: a survey on sensors and sensing methodologies[J]. Ocean Engineering, 2023, 267: 113202.
- [23] AYKIN M D, NEGAHDARIPOUR S. Forward-look 2-D sonar image formation and 3-D reconstruction[C]// OCEANS 2013. San Diego: IEEE, 2013.
- [24] ZHAO Z J, TAN Y G, LIU P, et al. Research on underwater long-range target intelligent identification system based on laser range-gated imaging technology[J]. Journal of Integration Technology, 2023, 12(2): 39-52.
- [25] PARK D, JUNG J, KWAK K, et al. 3D underwater localization using EM waves attenuation for UUV docking[C]// 2017 IEEE Underwater Technology (UT). Busan: IEEE, 2017.
- [26] DUECKER D A, JOHANNINK T, KREUZER E, et al. An integrated approach to navigation and control in micro underwater robotics using radio-frequency localization[C]// 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal: IEEE, 2019.
- [27] CHOI W S, OLSON D R, DAVIS D, et al. Physics-based modelling and simulation of multibeam echosounder perception for autonomous underwater manipulation[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2021, 8: 706646.

(责任编辑: 张曼莉)