美国机械工程师学会2026年海洋、近海及极地工程国际会议论文集
OMAE2026 2026年6月7日至12日，日本东京

OMAE2026-180500 — 草稿

迈向可靠的水下物体回收：配备吸力驱动末端执行器的自主水下航行器仿真研究

Michele Grimaldi[1, 2, *], Yosaku Maeda[2], Hitoshi Kakami[2], Ignacio Carlucho[1], Yvan Petillot[1], Tomoya Inoue[2]

[1]赫瑞-瓦特大学，英国爱丁堡[2]日本海洋研究开发机构（JAMSTEC），日本横须贺

摘要

在超深渊带开展自主目标回收面临诸多挑战，包括极端静水压力、有限的能见度和洋流，以及在全海洋深度下进行精确操作的需求。在此类环境中进行现场试验成本高、风险大，且受限于可用潜航器数量有限，因此难以对自主行为进行早期验证。本文介绍了一项基于仿真的研究，展示了使用超深渊小型潜航器（*HSV*）执行完整自主海底物体回收任务的过程。该潜航器配备了三自由度机械臂和吸力驱动末端执行器。研究采用*Stonefish*仿真器，在类深渊环境下对真实的航行器动力学、水动力扰动、传感以及与目标物体的交互进行建模。控制框架将用于航行器导航和稳定控制的世界坐标系*PID*控制器，与基于逆运动学并辅以加速度前馈的机械臂控制器相结合，从而实现航行器与机械臂的协同作业。在仿真中，*HSV*自主从海面下潜至*6,000*米，执行结构化海底覆盖，检测目标物体并完成基于吸附的回收。结果表明，高保真仿真为评估自主深海干预行为提供了一种有效、低风险的手段，可在实地部署前开展评估。

关键词： 超深渊带机器人技术、自主水下航行器、水下操作、吸取式末端执行器、海洋机器人仿真

1. 引言

对超深渊带（定义为深度超过 6,000 m 的海洋区域）的探索与科学研究面临着极端的技术和作业挑战。超过 60 兆帕的静水压力、近乎完全的黑暗、低温以及复杂的海底地形，大大增加了航行器作业和操作任务的难度。与此同时，近年来人们对超深渊环境的科学兴趣迅速增长，这主要得益于深海技术的进步，以及人们日益认识到最深海沟的生态与地球物理重要性 [1]。这一发展加剧了对可靠机器人系统的需求，这类系统能够在全海深环境中自主运行并进行物理交互。尽管深海机器人技术使人们得以空前深入地探索这些环境，但自主目标回收仍然极具挑战性，因为载体稳定控制、感知与灵巧操作之间紧密耦合。在超深渊深度开展现场试验，成本高昂且风险极大。部署全海深航行器需要专用船舶，而作业窗口有限且必须留出充足的安全裕度，因此测试通常只能局限于少数任务。因此，在开发早期阶段，直接在现场验证控制策略、自主控制流程以及航行器—机械臂协调并不现实。深海中的故障可能导致系统永久损失，这进一步凸显了部署前稳健验证的必要性。高保真仿真为开发和评估自主深海机器人系统提供了一种切实可行的替代方案。据我们所知，先前尚无研究对超深渊深度的自主任务进行仿真，大多数研究仅涉及浅水或中层水域。在本研究中，我们采用了Stonefish海洋机器人仿真器，并对其进行增强，使其能够模拟深度相关流体动力学、质量分布变化以及极端压力导致的体积压缩。这些效应还会改变机载传感器（如惯性测量单元）的特性，进而影响状态估计和载具控制。通过捕捉载具物理特性、传感器与机械臂动力学之间的这些耦合交互，Stonefish实现了以往难以进行的逼真系统级测试。利用改进后的仿真器，我们为配备三自由度机械臂和吸附式末端执行器 [3]的超深渊小型潜航器（HSV） [2] 构建了完整的自主目标回收任务模型。航行器采用由仿真的惯性导航数据提供信息的世界坐标系PID控制器进行控制；机械臂则采用带有加速度前馈的逆运动学，在交互任务中实现精准、稳定的运动。

*通讯作者。《asmeconf.cls》文档：1.45版，2026年1月3日。

版权所有 ©2026 美国机械工程师学会

仿真任务包括从海面自主下潜至6,000米、按规划进行海底覆盖、通过视觉检测识别目标物体，以及协调航行器—机械臂控制以执行基于吸附的拾取。本研究并不侧重于感知算法的性能，而是着重考察系统级行为与控制集成，展示如何完全通过仿真验证复杂的自主干预行为。这种方法能够降低开发风险和运营成本，并为未来的数字孪生集成及全海深自主操作奠定基础。

2. 相关工作

水下机器人技术涵盖了种类繁多的航行器、机械臂和仿真工具，这些设备和工具旨在极端海洋环境中运行。传统遥控潜水器和自主水下航行器已广泛用于浅海和中层深度的探索；然而，它们通常在作业深度、续航能力和灵巧操作能力方面存在局限。为进入深度超过 10,000 米的超深渊带，人们开发了 *Nereus* [4]等混合式潜水器，将自主导航与遥操作控制相结合，从而能够在最深的海沟中开展科学取样。近年来，中国的海斗 自主及遥操作潜水器在马里亚纳海沟的科学考察中多次实现全海深部署，验证了采用混合控制架构开展长时间超深渊作业的可行性 [5]。Hadal ARV[1],等潜水器也采用了类似的设计理念，能够在极端深海环境下支持自主任务和遥操作任务。与此同时，人们提出了*Orpheus* 等新一代全自主平台，以实现无需脐带缆作业的持续超深渊探索，并着重采用紧凑设计、耐压电子设备和先进自主能力[2]。由于流体动力学、能见度有限以及与脆弱样本交互等因素，海底环境中的操作面临重大挑战。关于水下航行器—机械臂系统运动与力控制的经典研究探讨了此类系统的动力耦合和控制策略 [6, 7]。近期研究则着重于设计采用柔顺结构和创新驱动方式的机械臂，以提高其在非结构化水下环境中的鲁棒性和适应性 [8, 9]。水下操作行为分类学突显了海洋取样所需任务的广泛性，包括刮取、吸取以及对生物样本的精确抓取，并强调了多功能末端执行器设计的必要性 [10]。此外，在这些环境中，仅靠定位和定姿所能带来的益处有限，因为低能见度、强流和复杂的海床地形会严重削弱视觉 [11]和声学传感能力，使自主操作尤其具有挑战性。基于吸附的机构已成为水下操作的重要工具。近期研究展示了配备吸附机构的移动操作机器人，即使受到水动力扰动也能保持稳定接触，为了解水生环境中的吸附辅助操作性能提供了见解 [12]。关于用于生物取样的海洋机器人的综合评述介绍了多种遥控潜水器末端执行器，包括吸附式采样器，并概述了在深水环境中与硬质和软质基底有效交互的设计要求 [10]。仿真在水下机器人系统的开发和验证中发挥着关键作用，尤其是在实地部署之前进行任务规划、感知和控制方面 [13, 14]。人们开发了多种开源和研究型仿真器，以支持自主水下机器人技术。DAVE 等框架基于 ROS 和 Gazebo 提供通用水生环境，对航行器、机械臂和环境交互进行建模 [15]。基于游戏引擎构建的高保真仿真器（如 HoloOcean）可提供逼真的视觉渲染、多智能体支持，以及包括成像声呐和光学系统在内的先进传感器建模 [16, 17]。较新的 GPU加速框架（如 OceanSim）专注于精确的水下感知和基于物理的传感器渲染，但通常对航行器动力学和流体交互的建模有限 [18]。水下机器人仿真器的比较分析揭示了物理保真度、可扩展性和集成复杂度之间的权衡 [19]。Stonefish 的特点是将基于刚体几何的精细流体动力学建模与紧密的 ROS 集成和灵活的场景定义相结合，从而能够模拟耦合的航行器—机械臂动力学，以及逼真的传感器和环境效应。除了具备物理仿真能力外，Stonefish 还被证明能够支持视觉效果逼真的水下场景，适用于在仿真中验证感知流程 [20]。这种组合使 Stonefish 尤其适合仿真复杂的深海交互场景，例如在超深渊带自主回收物体；在此类场景中，精确的动力学和逼真的环境交互都至关重要。最后，数字孪生概念和基于仿真的框架也通过支持虚拟测试和对不同运行条件下系统行为的预测性评估，进一步推动海底机器人研究 [21, 22]。先进仿真、稳健的航行器—机械臂控制以及适应性强的末端执行器机构相结合，为在超深渊带等极端环境中实现自主目标回收奠定了坚实基础。

3. 航行器与机械臂控制器

图 figure 1中的超深渊小型潜航器（HSV）使用世界坐标系PID控制器进行控制，该控制器调节其沿 x、 y和 z 轴的位置以及偏航姿态。令$\mathbf{p} = [x, y, z, \psi]^\top$ 表示航行器在世界坐标系中的位姿，$\mathbf{p}_{wp}$ 表示当前航路点。位置和偏航误差定义如下：fi:

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_{wp} - \mathbf{p} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ e_\psi \end{bmatrix}.$$

对于每个轴 $i \in \{x, y, z, \psi\}$，PID控制律如下：

[1]https://en.wikipedia.org/wiki/Hadal_ARV [2]伍兹霍尔海洋研究所。*Orpheus*：自主水下航行器。可在线获取：https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/ underwater-vehicles/auvs/orpheus/

版权所有 ©2026 美国机械工程师学会

$$u_i(t) = K_{p,i}e_i(t) + K_{i,i}\int_0^t e_i(\tau)d\tau + K_{d,i}\frac{de_i}{dt},$$

其中，$K_{p,i}$, $K_{i,i}$ 和 $K_{d,i}$ 分别为比例增益、积分增益和微分增益。采用抗积分饱和和死区机制，确保在设定值附近平稳控制。得到的世界坐标系下的力和力矩 $\mathbf{F}_w = [F_x, F_y, F_z, \tau_\psi]^\top$，利用当前偏航角 ψ 转换到机体坐标系：

$$\mathbf{F}_b = \begin{bmatrix} F_x^b \\ F_y^b \\ F_z^b \\ \tau_\psi^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{F}_w.$$

这些载体坐标系下的指令随后通过推进器分配矩阵映射至八个推进器，生成最终的推进器设定值。

3.1. 使用逆运动学和加速度前馈的机械臂控制

HSV 配备了一台三自由度（3-DOF）电动机械臂，末端装有吸附式末端执行器。操作采用加速度级控制策略，非常适合在高负载下运行、且需要缓慢精准运动的深海机械臂，近期的深渊带机械臂研发也证明了这一点 [3]。给定以载体坐标系表示的期望笛卡尔目标位置$\mathbf{x}_{target} = [x, y, z]^\top$，使用几何逆运动学计算对应的关节构型 $\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^\top$。关节角度的计算如下：

$$\theta_1 = \arctan 2(y, x), \tag{1}$$

$$\theta_3 = -\arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}\right), \tag{2}$$

$$\theta_2 = \arctan 2\left(z, \sqrt{x^2 + y^2}\right) - \arctan 2(l_2 \sin\theta_3,\ l_1 + l_2\cos\theta_3), \tag{3}$$

其中，l_1 和 l_2 分别表示第一根和第二根机械臂连杆的长度。为实现平滑且精确的轨迹跟踪，采用前馈公式在加速度层面对关节运动进行调节。指令关节加速度计算如下：

$$\mathbf{q}_{cmd} = \mathbf{q}_{target} + K_v\left(\mathbf{q}_{target} - \mathbf{q}\right) + K_p\left(\mathbf{q}_{target} - \mathbf{q}\right), \tag{4}$$

其中 $\mathbf{q}^{target}$、$\mathbf{q}^{target}$ 和 $\mathbf{q}^{target}$分别表示期望的关节位置、速度和加速度，K_p 和K_v 分别为比例增益矩阵和速度增益矩阵。将所得加速度指令进行数值积分，以获得期望的关节速度和位置，然后将其传送至模拟关节控制器。与纯位置级控制相比，这种基于加速度的控制方法具有更好的平滑性和稳定性

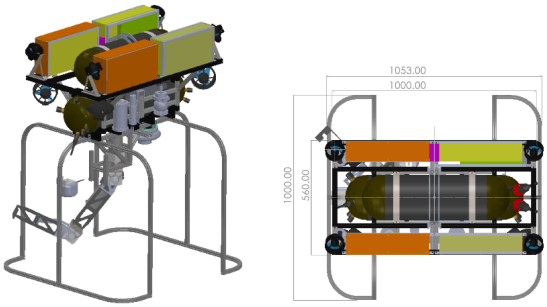

图 1：HSV 三维模型

尤其是在吸附式抓取等对接触敏感的操作中。通过将载体稳定控制与加速度控制的操作相结合，HSV 能够精确调整吸附式末端执行器相对于目标物体的位置，从而在类深渊环境下可靠地实现自主目标回收。

该场景展示了车辆稳定、机械臂运动学和末端执行器驱动在完全自主工作流程中的集成。来自向下观测相机的视觉反馈（如图 2所示）用于在回收任务期间检测并定位目标物体。

4. 实验

4.1. 场景

实验旨在评估 HSV 在模拟深海环境中的自主目标回收工作流程。场景结构如下：

1. HSV 使用世界坐标系 PID 车辆控制器自主驶向目标海星。2. 载具接近海星后，3 自由度机械臂使用逆运动学和加速度前馈控制器，将吸盘定位在目标上方。3. 吸力驱动末端执行器执行抓取，将海星从海床上的原位提起。4. HSV 与机械臂协调运动，将海星安全运送至目标位置。

该场景展示了如何在全自主工作流程中整合载具稳定控制、机械臂运动学和末端执行器驱动。

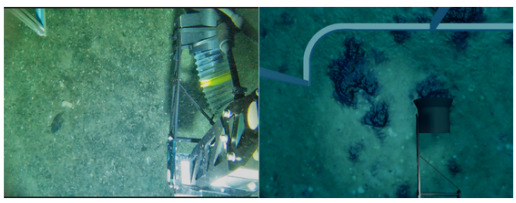

图 2：HSV 摄像机输出对比：（左）真实场景图像，（右）模拟场景摄像机输出。

版权所有 ©2026 美国机械工程师学会

表 1：实验中使用的模拟机载传感器及其更新频率。

传感器	Rate	用途
IMU	10 Hz	姿态和角速度估计
DVL	10 Hz	相对于海床的速度估计
压力	10 Hz	深度估计
INS	10 Hz	用于 PID控制的融合状态估计
下视摄像机	10 Hz	海星检测

4.2. 仿真设置

实验完全在高保真物理仿真环境中进行。Stonefish仿真器对 HSV、机械臂及环境交互进行建模，包括深海环境中常见的洋流、浮力和有限能见度。海床上放置了一只虚拟海星作为目标物体。HSV 配备了下视摄像机和照明灯，用于检测海星；此外还配有一组前视双目摄像机，但本次实验中未使用。载具依靠仿真的惯性导航系统（INS）反馈进行闭环控制。在仿真中，惯性测量单元（IMU）、多普勒测速仪（DVL）、压力传感器和 INS 以 10 Hz 的频率提供数据，与真实载具的采样率一致，以确保 PID 控制器获得逼真的状态估计。HSV 从海面开始执行任务，下潜至 6,000 米深度，并使用 PID 控制器沿预定义路径导航。当下视摄像机视觉检测到海星时，载具便会稳定下来，机械臂随后按照上述说明执行拾取程序。具体的视觉检测算法被视为外部感知模块，本文不作详细讨论。基于吸附的抓取机构通过 Stonefish 的胶合功能[3]进行仿真，该功能可在运行时动态创建两个物体之间的固定关节。当末端执行器与海星成功对准后，胶合约束便会启动，将海星刚性连接到末端执行器上，从而模拟吸泵的效果。这种方法能够可靠地抽象吸附连接，同时允许在仿真框架中对抓取进行可控的启用和停用。借助这一设置，无需实际部署，即可在逼真的深海场景中测试载具、机械臂和吸附式末端执行器的协同运行。

4.3. 结果

实验结果表明，在仿真中成功执行了完全自主的深海物体回收任务。图3概述了整个任务期间 HSV 的运动情况，包括三维惯性导航系统估计轨迹及相应的位置误差变化。载具从海面下潜至 6,000 m 深处；为清晰起见，图中仅显示 5,990 m 以下的轨迹部分。到达海底后，载具沿结构化的割草机式覆盖路径行进，在整个勘测阶段保持深度和航向稳定。图中同时显示了惯性导航系统估计轨迹和指令航路点，展示了载具在海底勘测期间沿规划路径行进的能力。相关

[3]https://stonefish.readthedocs.io/en/latest/special.html#glue

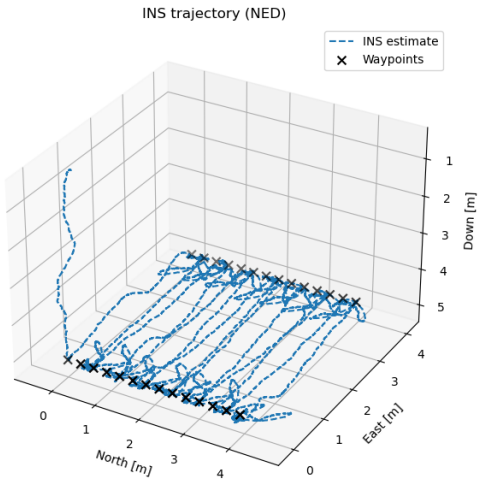

图3：该航行器从海面下潜至6,000 m深度；为清晰起见，仅显示低于5,995 m的轨迹部分。到达海f底后，航行器执行割草机式覆盖路径。图中同时显示了局部北东地坐标系中的三维INS估算轨迹和指令航路点

图3中还显示了相对于参考里程计的惯性导航系统位置误差，这凸显了在没有外部位置更新的情况下，惯性导航误差会随着任务持续时间逐渐累积，这符合预期。图4对导航性能进行了更详细的比较，展示了惯性导航系统估计的北向、东向和向下位置分量及参考里程计。逐轴比较揭示了各轴特有的偏差和漂移行为，有助于了解惯性导航系统误差在长时间运行中的方向特性。在海底勘测期间，下视摄像机和机载照明使系统能够可靠地检测到目标海星。检测到目标后，载具从勘测运动切换为在目标上方稳定悬停。随后展开机械臂，采用带加速度前馈的逆运动学控制器，引导吸盘精确到达目标海星上方的预抓取位姿。成功启动吸泵后，目标海星牢固地附着在末端执行器上，确认了感知、载体稳定控制、机械臂控制与末端执行器驱动之间的协调正确。图5展示了检测、稳定控制和抓取执行的连续阶段。结果验证了所提出的控制架构在类深渊环境下实现自主物体回收的可行性。实验凸显了紧密集成载具与机械臂控制，以及采用真实感传感和动力学仿真的重要性，这有助于开发稳健的深海作业行为。

5. 结论

本文介绍了一项仿真研究，探讨如何利用具备集成操作能力的航行器在超深渊带自主回收物体。不同于以往聚焦于浅水或中层水域环境的研究，本研究展现了全海深任务的逼真仿真，

版权所有 ©2026 美国机械工程师学会

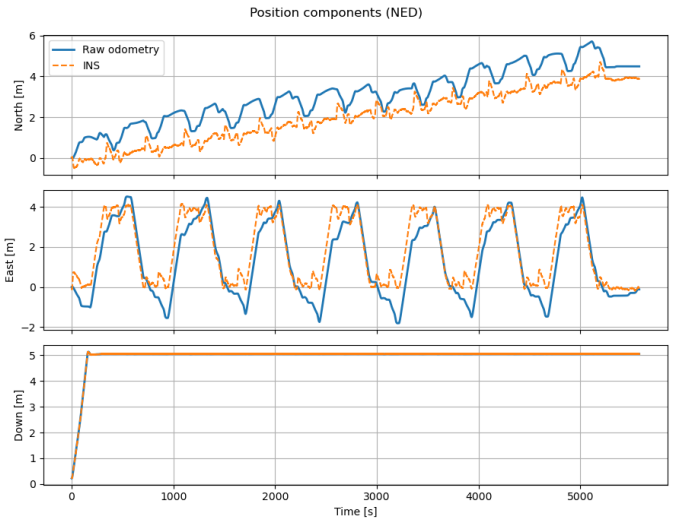

图4：INS 与参考里程计的逐轴位置对比。将 INS 估算的北、东、下位置分量与参考里程计随时间进行比较，突显各轴特有的偏差和漂移行为。

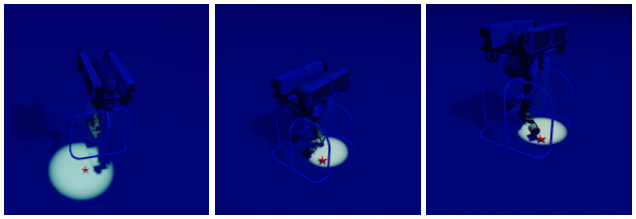

图5：自主抓取作业的连续阶段。（左）感知系统对海星进行视觉检测和定位。（中）载体稳定控制，并在目标区域上方着陆。（右）机械臂运动并通过吸取抓取海星。

能够捕捉深度变化对航行器动力学、质量分布和极端压力下体积的影响，以及这些变化对机载传感器的影响。通过使用增强版 Stonefish 仿真器，该仿真器纳入了这些影响，并模拟了逼真的流体动力学和环境交互，我们证明，协调控制策略能够在严苛的水下环境条件下实现可靠的导航与操作，同时降低实地部署前的风险和成本。除了控制验证之外，高保真度仿真还为更高层级的自主与推理框架奠定了天然基础；近期关于利用知识图谱和检索增强生成实现共享式多智能体水下自主系统的研究，便展示了这一点 [23], , 水下机器人分布式认知架构的相关研究亦是如此 [24]。对于长时程、大范围任务，此类框架还可受益于高效的环境表示和建图方案，例如用于实时同步定位与建图及持久化世界建模的 GPU 加速占据栅格 [25]。总之，这些进展使基于仿真的流程，尤其是能够捕捉逼真超深渊带深度物理特性的流程，作为实现可扩展、智能化和自主深海机器人干预的重要推动因素。

参考文献

[1]Weston、Johanna N J 和 Jamieson、Alan J.《哈达尔科学的指数级增长：利用主题建模确定的观点与未来方向》。*ICES* 海洋科学杂志 第 79 卷第 4 期（2022年）：第 1048–1062 页。DOI10.1093/icesjms/fsac074。网址 h tt ps://academic.oup.com/icesjms/article-pdf/79/4/1048/43782814/fsac074.pdf，网址https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac074。

[2] Maeda, Yosaku、Kakami, Hitoshi、Watanabe, Yoshitaka、Aso, Tatsuya、Iwashita, Kazuya、Kaneko, Tatsuya、Inoue, Tomoya、Koike, Hiroaki、Noborio, Yuhei 和 Maki, Atuso。《面向超深渊带自主采样系统》。2025 IEEE 水下技术大会（UT）：第 1–5 页。2025年。DOI 10.1109/UT61067.2025.10947461。[3] Maeda, Yosaku、Kakami, Hitoshi 和 Aso, Tatsuya。《超深渊带电动机械臂的开发》。OCEANS 2024——哈利法克斯：第 1–5 页。2024年。DOI 10.1109/OCEANS55160.2024.10753793。[4] Bowen, Andrew D.、Yoerger, Dana R.、Taylor, Chris、McCabe, Robert、Howland, Jonathan、Gomez-Ibanez, Daniel、Kinsey, James C.、Heintz, Matthew、McDonald, Glenn、Peters, Donald B.、Fletcher, Barbara、Young, Chris、Buescher, James、Whitcomb, Louis L.、Martin, Stephen C.、Webster, Sarah E. 和 Jakuba, Michael V。《用于全球海洋科学作业、可下潜至 11,000 米深度的 Nereus 混合型水下机器人载具》。OCEANS 2008：第 1–10 页。2008年。DOI 10.1109/OCEANS.2008.5151993。[5] Li, Jixu、Tang, Yuangui、Wang, Jian、Chen, Cong、Li, Yiping、Yan, Shuxue 和 Tian, Qiyan。《海斗自主遥控潜水器在中国第三次马里亚纳海沟科学考察中的应用》：第 1–4 页。2019年。DOI 10.23919/OCEANS40490.2019.8962660。[6] Antonelli, Gianluca。《水下机器人——第 2 版——载具-机械臂系统的运动与力控制》。第 2 卷（2006年）。DOI 10.1007/11540199。[7] Leonessa, Alexander。《水下机器人：载具-机械臂系统的运动与力控制（G. Antonelli；2006年） [书评]》。IEEE 控制系统杂志第 28 卷第 5 期（2008年）：第 138–139 页。DOI 10.1109/MCS.2008.927329。[8] Wang, Zhenhua 和 Cui, Weicheng。《面向安全且顺应性的交互：软体水下机械臂展望》。机械工程师学会论文集，M 部分：海事环境工程杂志第 235 卷（2020年）：第 147509022095091 页。DOI 10.1177/1475090220950911。[9] Zhang, Yunce、He, Weidong 和 Wang, Tao。《水下刚度增强柔性机械臂的设计、建模与控制》。海洋工程第 308 卷（2024年）：第 118302 页。DOI 10.1016/j.oceaneng.2024.118302。[10] Mazzeo, Angela、Aguzzi, Jacopo、Calisti, Marcello、Canese, Simonepietro、Angiolillo, Michela、Allcock, A. Louise、Vecchi, Fabrizio、Stefanni, Sergio 和 Controzzi, Marco。

版权所有 ©2026 美国机械工程师学会

《用于深海样本采集的海洋机器人：水下操作动作分类》。传感器第 22 卷第 4 期（2022年）。DOI 10.3390/s22041471。URL https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1471。[11] Grimaldi, M.、Nakath, D.、She, M. 和 Köser, K。《水下视觉单目同步定位与地图构建的挑战研究》。摄影测量、遥感与空间信息科学国际档案第 X-1/W1-2023 卷（2023年）：第 1113–1121 页。DOI 10.5194/isprs-annals-x- 1-w1-2023-1113-2023。URL http://dx.doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-1113-2023。[12] Kumamoto, Hikaru、Shirakura, Naoki、Takamatsu, Jun 和 Ogasawara, Tsukasa。《用于水下机器人物体操作的水下吸盘式夹爪》：第 1–7 页。2021年。DOI 10.1109/ICM46511.2021.9385703。[13] Cieślak, Patryk。《Stonefish：面向海洋机器人的先进开源仿真工具及其 ROS 接口》。OCEANS 2019——马赛。2019年。DOI 10.1109/OCEANSE.2019.8867434。[14]Grimaldi, Michele、Cieslak, Patryk、Ochoa, Eduardo、Bharti, Vibhav、Rajani, Hayat、Carlucho, Ignacio、Koskinopoulou, Maria、Petillot, Yvan R. 和 Gracias, Nuno。《Stonefish：支持海洋机器人机器学习研究》。（2025年）。URL 2502.11887，URL https://arxiv.org/abs/2502.11887。[15]Zhang, Mabel M.、Choi, Woen-Sug、Herman, Jessica、Davis, Duane、Vogt, Carson、McCarrin, Michael、Vijay, Yadunund、Dutia, Dharini、Lew, William、Peters, Steven 和 Bingham, Brian。《DAVE水生虚拟环境：迈向通用水下机器人模拟器》。（2022年）。URL 2209.02862，URL https://arxiv.org/abs/2209.02862。[16] Potokar, Easton、Lay, Kalliyan、Norman, Kalin、Benham, Derek、Ashford, Spencer、Peirce, Randy、Neilsen, Tracianne B.、Kaess, Michael 和 Mangelson, Joshua G。《HoloOcean：功能完备的海洋机器人仿真器，面向感知与自主能力》。IEEE海洋工程期刊第 49 卷第 4 期（2024年）：第 1322–1336 页。DOI 10.1109/JOE.2024.3410290。[17] Romrell, Blake、Austin, Abigail、Meyers, Braden、Anderson, Ryan、Noh, Carter 和 Mangelson, Joshua G。《HoloOcean 2.0 预览》。（2025年）。URL 2510.06160，URL https://arxiv.org/abs/2510.06160。[18] Song, Jingyu, Ma, Haoyu, Bagoren, Onur, Sethuraman, Ad- vaith V., Zhang, Yiting 和 Skinner, Katherine A.《Ocean- Sim：GPU加速水下机器人感知仿真框架》。（2025年）。URL 2503.01074，URL https://arxiv.org/abs/2503.01074。[19] Aldhaheri, Sara, Hu, Yang, Xie, Yongchang, Wu, Peng, Kanoulas, Dimitrios 和 Liu, Yuanchang。《自主系统开发的水下机器人模拟器综述》。（2025年）。URL 2504.06245，URL https://arxiv.org/abs/2504.06245。[20] Grimaldi, Michele, Alkaabi, Nouf, Ruscio, Francesco, Rua, Sebastian Realpe, Garcia, Rafael 和 Gracias, Nuno。《实时海底分割与制图》。（2025年）。URL 2504.10750，URL https://arxiv.org/abs/2504.10750。[21] Lu, Daohua, Ning, Yichen, Wang, Jia, Du, Kaijie 和 Song, Cancan。《基于数字孪生的自主水下航行器水下支撑平台模型降阶研究》。《海洋科学与工程杂志》第12卷第9期（2024年）。DOI 10.3390/jmse12091673。URL https://www.mdpi.com/2077-1312/12/9/1673。[22] Adetunji, Favour O., Ellis, Niamh, Koskinopoulou, Maria, Carlucho, Ignacio 和 Petillot, Yvan R.《水下数字孪生：提升水下遥操作》。（2024年）。URL 2402.07556，URL https://arxiv.org/abs/2402.07556。[23]Grimaldi, Michele, Cernicchiaro, Carlo, Rua, Sebastian Realpe, El-Masri-El-Chaarani, Alaaeddine, Buchholz, Markus, Michael, Loizos, Rodriguez, Pere Ridao, Carlucho, Ignacio 和 Petillot, Yvan R.《推进水下任务中的共享自主性与多智能体自主性：融合知识图谱与检索增强生成》。（2025年）。URL 2507.20370，URL https://arxiv.org/abs/2507.20370。[24] Buchholz, Markus, Carlucho, Ignacio, Grimaldi, Michele 和 Petillot, Yvan R.《水下机器人认知自主性的分布式人工智能智能体》。（2025年）。URL 2507.23735，URL https://arxiv.org/abs/2507.23735。[25] Grimaldi, Michele, Palomeras, Narcis, Carlucho, Ignacio, Petillot, Yvan R 和 Rodriguez, Pere Ridao。《FRAGG-Map：视锥加速的基于GPU的栅格地图》。2024年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）：第1138–1144页。2024年。IEEE。

版权归美国机械工程师学会所有
©2026