



我国深海自主水下机器人的研究现状

李硕, 刘健, 徐会希, 赵宏宇, 王轶群*

中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016

* 通信作者. E-mail: wangyiqun@sia.cn

收稿日期: 2017-12-04; 接受日期: 2018-04-28; 网络出版日期: 2018-09-10

中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA11040103) 资助

摘要 近年来, 自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 一直是水下机器人 (unmanned underwater vehicle, UUV) 领域的研究热点, 已经在海洋科学研究、海洋资源调查和海洋安全保证等方面得到了广泛的应用. 在国家和有关部门的支持下, 我国深海 AUV 在技术上取得了重要突破, 开展了较大规模的航次应用, 在多种深海资源调查领域中发挥了不可替代的作用. 本文简要介绍了国外自主水下机器人研究现状, 重点介绍了我国深海 AUV 的研究现状和应用成果, 并展望了我国深海 AUV 的未来发展趋势.

关键词 自主水下机器人, 水下机器人, 海洋资源调查

1 引言

近年来, 世界各国越来越重视水下机器人 (unmanned underwater vehicle, UUV) 的发展, 在海洋科学研究、海洋工程作业, 以及国防军事领域得到了广泛应用. 通常水下机器人可分为: 自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV)、有缆遥控水下机器人 (remotely operated vehicle, ROV) 和自主/遥控水下机器人 (autonomous & remotely operated vehicle, ARV). AUV 自带能源自主航行, 可执行大范围探测任务, 但作业时间、数据实时性、作业能力有限; ROV 依靠脐带电缆提供动力, 水下作业时间长, 数据实时性和作业能力较强, 但作业范围有限^[1]; ARV 是一种兼顾 AUV 和 ROV 的混合式水下机器人^[2], 它结合了 AUV 和 ROV 的优点, 自带能源, 通过光纤微缆实现数据实时传输, 既可实现较大范围探测, 又可实现水下定点精细观测, 还可以携带轻型作业工具完成轻型作业, 是信息型 AUV 向作业型 AUV 发展过程中的新型水下机器人.

自 20 世纪 50 年代美国 University of Washington 研制世界上首台 SUPV (self propelled underwater research vehicles) 以来, AUV 的发展经历了 60 多年的历史. 20 世纪 90 年代后期, 随着计算机技术发展和电子技术的日益成熟, AUV 进入快速发展阶段, 一批有影响的 AUV 相继研制成功并得到成功应用,

引用格式: 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1152–1164, doi: 10.1360/N112017-00264
Li S, Liu J, Xu H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1152–1164, doi: 10.1360/N112017-00264

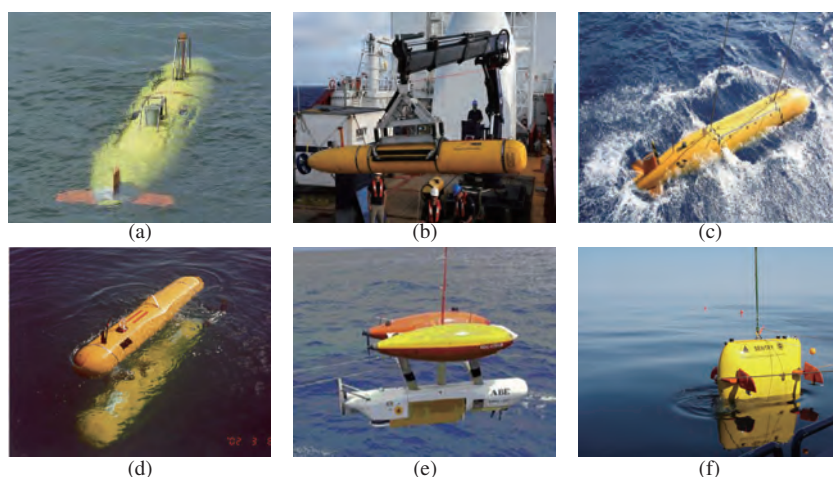


图1 (网络版彩图) 国外 AUV 研究成果

Figure 1 (Color online) AUV series of foreign countries. (a) REMUS 6000^[9]; (b) Bluefin-21^[7]; (c) Autosub 6000^[12]; (d) SeaBed^[13]; (e) ABE^[15]; (f) Sentry^[16]

包括美国的 ABE^[3,4]、英国的 Autosub-1^[5]、加拿大的 Theseus^[6]、中国的“探索者”号、中国和俄罗斯共同研制的“CR-01”。进入 21 世纪, AUV 技术得到了进一步的发展, 商业化的 AUV 不断涌现, 如美国 Hydroid 公司的 Bluefin 系列 AUV^[7,8]、挪威 Kongsberg 公司的 REMUS 系列 AUV^[9] 和 HUGIN 系列 AUV^[10]、美国 Teledyne 公司的 Gavia 系列 AUV^[11], 标志着 AUV 进入了较大规模实际应用阶段。深海 AUV 没有严格的工作深度的界定, 本文涉及的深海 AUV 是指潜深 4500 m 及以上的 AUV。

2 国外 AUV 研究成果

深海 AUV 技术一直是 AUV 领域的研究热点, 近年来, 随着 AUV 技术的不断进步, 国际上深海 AUV 数量也逐渐增加。深海 AUV 通常具有良好的流体外形, 如鱼雷形、立扁形等, 减少其航行时阻力, 提高其续航力; 考虑不同探测的需求, 在载体布置上有单体、双体和三体等形式; 可搭载声学、光学和海洋环境测量载荷, 执行多种探测任务。国外一批影响力的深海 AUV 在近期的海上作业中发挥了重要作用, 主要包括: 挪威 Kongsberg 公司生产的 REMUS 6000^[9]、美国 Hydroid 公司研制的 Bluefin-21^[8]、英国南安普顿国家海洋中心 (NOC) 研制的 Autosub 6000^[12] 等。其中, REMUS 6000 和 Bluefin-21 是目前世界上比较成熟的商业化 AUV, 前者在 2010 年成功搜寻到法航 447 的发动机残骸^[9] (图 1(a)), 后者参与了 2014 年马航 MH370 的搜寻工作 (图 1(b))。Autosub 6000 也多次在印度洋热液区执行科学考察任务 (图 1(c))。美国伍兹霍尔 (WHOI) 研究所研制的 SeaBed AUV^[13] (图 1(d)) 和 ABE^[14,15] (图 1(e)) 均采用分体式结构布局, 多次在洋中脊热液区进行海底地形测绘, 并拍摄了大量照片。Sentry AUV 具有立扁体外形, 配有可旋转推进器, 可模块化换装多种探测载荷来执行不同探测任务^[16~19] (见图 1(f))。

3 我国深海 AUV 研究现状

围绕深海资源探测和海底目标搜索等需求, 我国从 20 世纪 90 年代初开始深海 AUV 的研制工

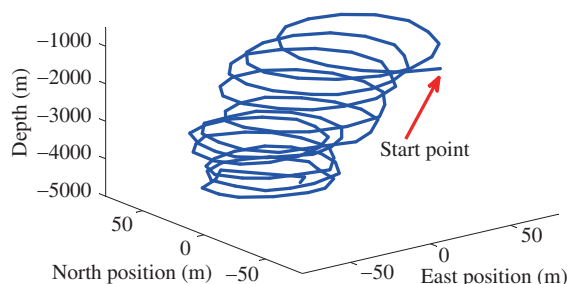


图 2 (网络版彩图) “潜龙一号” 无动力下潜

Figure 2 (Color online) Dive of Qianlong-1

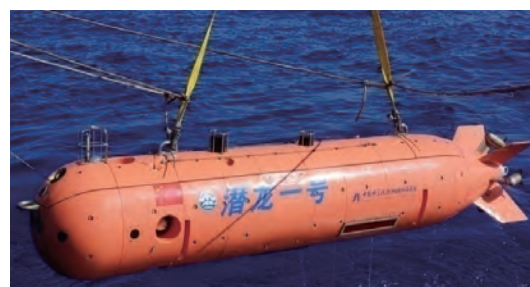


图 3 (网络版彩图) “潜龙一号”

Figure 3 (Color online) Qianlong-1

作. 90 年代中期, 中国科学院沈阳自动化研究所联合国内相关单位成功研制我国第 1 台 1000 米级“探索者” AUV. 在此基础上, 联合国内牵头与俄罗斯合作研制成功我国第 1 台 6000 米级“CR-01”以及“CR-02”两型深海 AUV, 其中“CR-01”在太平洋多金属结核调查中成功的应用, 当时达到了国际先进水平. “十二五”期间, 在国家海洋局和中国科学院的大力支持下, 沈阳自动化研究所面向深海资源调查和海洋科学研究的需求, 分别构建了“潜龙”系列深海 AUV 和“探索”系列 AUV 两个技术体系, 其中潜龙系列 AUV 主要用于深海资源勘查, 主要包括: 6000 米级“潜龙一号”、4500 米级“潜龙二号”和“潜龙三号”; “探索”系列 AUV 主要用于海洋科学研究, 主要包括: “探索 100”、“探索 1000”和“探索 4500”, 其中“探索 4500”是 4500 米级深海 AUV, 主要用于冷泉区科学调查. 也是在“十二五”期间, 哈尔滨工程大学完成了 1000 米级智水-IV 的研制, 天津大学完成了 2000 米级海底勘测 AUV 的研制^[20]. 与浅水 AUV 的动力下潜方式不同, 出于节能的目的, 我国深海 AUV 多采用无动力下潜方式到达海底, 图 2 是“潜龙一号”无动力下潜轨迹图.

3.1 “潜龙一号” AUV

“潜龙一号”是中国大洋矿产资源研究开发协会办公室支持研制的我国首台实用化 6000 米级 AUV (图 3), 以海底多金属结核资源调查为目的, 主要进行海底地形地貌、地质结构、海底流场、海洋环境参数和光学探测等精细调查. 2013 年 9 月, “潜龙一号”首次赴太平洋多金属结核区执行调查任务, 截止目前, “潜龙一号”累计在多金属结核区等区域作业 40 次. “潜龙一号”的续航时间是 30 h, 最大工作深度为 6000 m, 能覆盖全球 97% 的海域面积, 其搭载了我国自主研发的测深侧扫声呐、浅地层剖面仪、国产高清照相机, 也搭载了 CTD 等多种水文探测传感器, 具有大范围声学调查和近海底光学调查两种工作模式. “潜龙一号”支持长基线和超短基线两种定位模式, 用户根据任务需求自行选择. 在研制过程中, “潜龙一号” AUV 重点解决了深海 AUV 组合导航定位技术、深海 AUV 动力定位技术, 为后续深海 AUV 的发展奠定了坚实的技术基础.

3.1.1 深海 AUV 的组合导航技术

评估深海测绘数据质量的一个重要指标是导航精度. 船舶测绘依靠 GPS 定位, 而深海 AUV 测绘只能依靠长基线 (LBL) 或超短基线声学定位系统 (USBL) 进行辅助定位. 由于水下声环境复杂, 声定位中包含大量噪声信号, 如何进行噪声滤波, 如何将水下声定位设备与惯性导航设备组成高精度的水下组合导航系统, 是深海 AUV 组合导航研究的重要问题. “潜龙一号”支持基于长基线^[21]和基于超

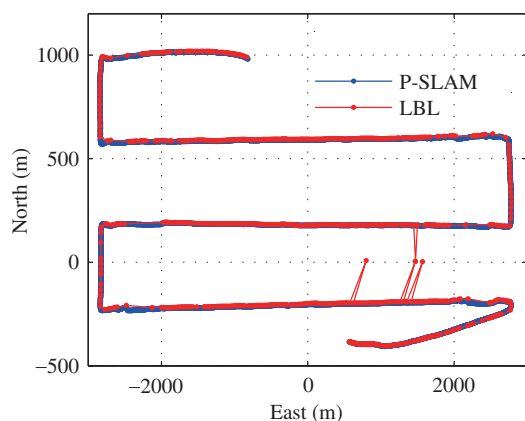


图 4 (网络版彩图) 基于长基线的组合导航轨迹

Figure 4 (Color online) Trajectory of integrated navigation based LBL

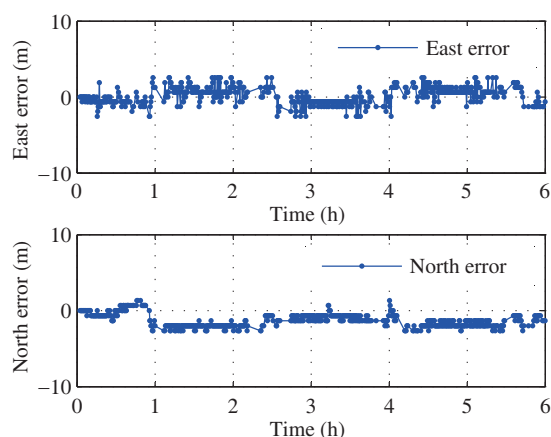


图 5 (网络版彩图) 基于长基线的组合导航误差曲线

Figure 5 (Color online) Error of integrated navigation based LBL

短基线的两种组合导航方法。“潜龙一号”基于长基线的组合导航方法(该算法名称是 P-SLAM based LBL, 简称 P-SLAM) 是一种将姿态角、速度和长基线声定位等多源测量数据进行数据融合的方法, 同时该方法具备在线自适应识别长基线观测噪声能力。所以“潜龙一号”组合导航精度较高, 绝对定位精度优于 2.63 m (1σ , 以长基线基阵为参考坐标系), 图 4 和 5 分别是“潜龙一号”的组合导航轨迹和误差曲线。

超短基线定位精度低于长基线, 但超短基线作业简便, 无需长基线系统布阵和测阵等繁琐操作, 作业效率相对较高。国际 AUV 多采用超短基线组合导航方式。图 6 是“潜龙一号”在结核区作业的基于超短的组合导航轨迹(以区域中心点为坐标原点, 基于超短基线组合导航算法的名称是 P-EKF), 图中蓝色表示基于超短基线的组合导航轨迹(图例名称是 P-EKF), 粉色表示超短定位(图例名称是 USBL)。图 7 是该潜次随机时间段内的组合导航归一化误差曲线(归一化误差是组合导航误差与超短理论定位精度的比值), 组合导航的精度优于超短精度 1.95 倍 (1σ)。

3.1.2 深海 AUV 的动力定位技术

在深海资源调查中, 有些时候需要 AUV 在原站位长时间定点观测, 为此, “潜龙一号”专门设计了动力定位功能, 实时调整 AUV 三维位置, 保证定点观测的位置控制精度。图 8 是“潜龙一号”原站位观测的动力定位结果图(图中以观测目标点为坐标原点), 动力定位的位置控制精度优于 0.4 m。

3.2 “潜龙二号”

“潜龙二号”4500 米级 AUV 是“十二五”国家 863 海洋技术领域支持研制的重大项目, 是为西南印度洋热液资源勘察而专门设计的 AUV, 也是首台在西南印度洋洋中脊执行热液科学调查的国产 AUV (图 9(a)), “潜龙二号”是立扁仿鱼形流体外形, 采用 4 个可旋转推进器的动力布局, 最大深度 4500 m, 续航时间 30 h, 艏部安装用于避障的二维多波束声呐, 搭载测深侧扫声呐、磁力计、甲烷、温盐仪、照相机等多种探测载荷, 具备声学调查和近底光学调查两种工作模式(图 9(b) 和 (c) 分别是它在热液区获得的高精度地图和高清照片)。2015 年 12 月, “潜龙二号”在西南印度洋洋中脊热液区发

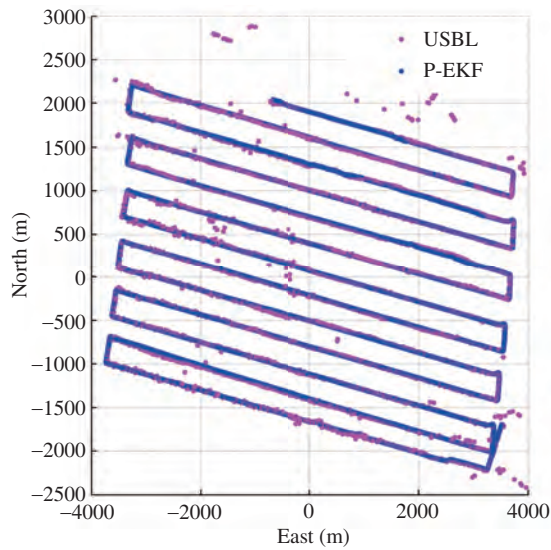


图 6 (网络版彩图) 基于超短的组合导航轨迹
Figure 6 (Color online) Trajectory of integrated navigation based USBL

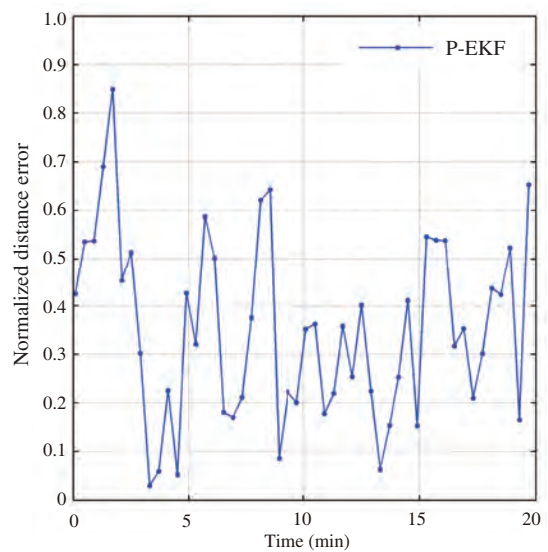


图 7 (网络版彩图) 基于超短的组合导航误差曲线
Figure 7 (Color online) Error of integrated navigation based USBL

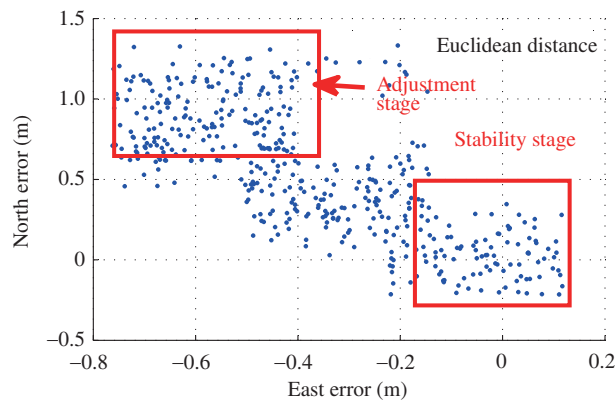


图 8 (网络版彩图) “潜龙一号” 动力定位
Figure 8 (Color online) Dynamic position of Qianlong-1

现了多处热液异常现象, 这也是我国 AUV 首次在洋中脊发现热液异常 (图 9(d) 是“潜龙二号”发现热液异常点时的侧扫图像, 图中星号表示热液羽流).

为保证在洋中脊复杂地形下的作业安全, “潜龙二号” 设计了自主避障功能. 图 10 和 11 分别是它在洋中脊执行避障时的三维和二维航迹图, 地形高程变化超过 1760 m, 而“潜龙二号” 航迹控制保持稳定, 自主避障功能顺利通过了复杂环境的实航验证.

3.3 “探索 4500” AUV

“探索 4500” AUV (图 12) 是中国科学院战略性先导科技专项支持研发的 4500 米级 AUV, 其主要技术指标与“潜龙二号” 基本相同, 只是由于“探索 4500” 搭载了更多种类的科学探测载荷, 其水下工

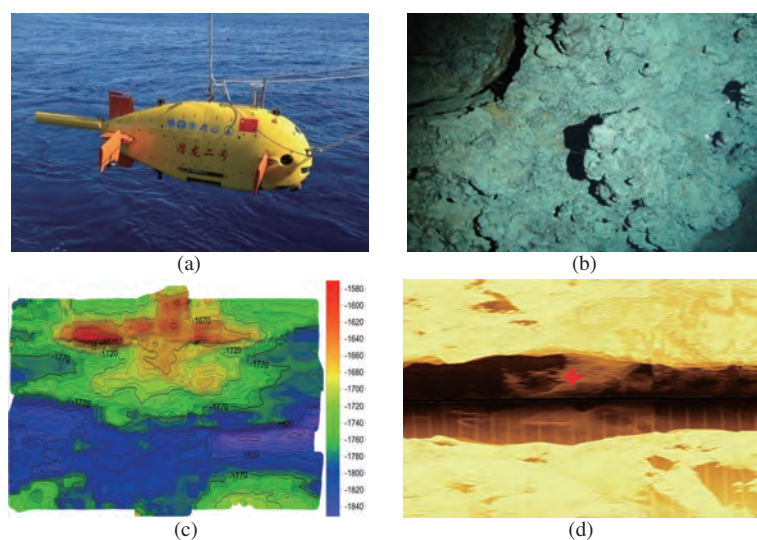


图 9 (网络版彩图) “潜龙二号” 在热液区的探测成果

Figure 9 (Color online) Results of hydrothermal region by Qianlong-2. (a) Qianlong-2; (b) photo by Qianlong-2; (c) bathymetry of hydrothermal region; (d) sidescan image of hydrothermal vent

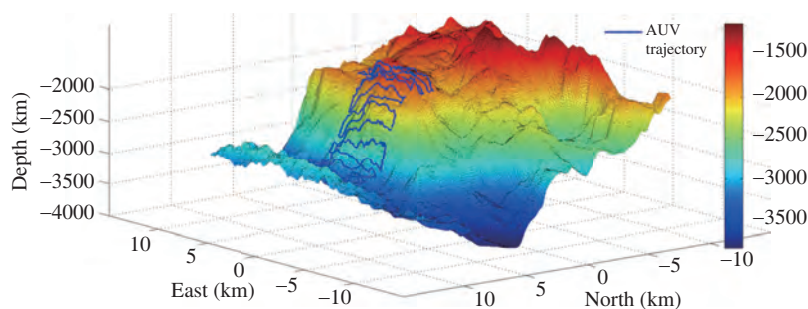


图 10 (网络版彩图) “潜龙二号” 三维航迹

Figure 10 (Color online) 3D trajectory of Qianlong-2

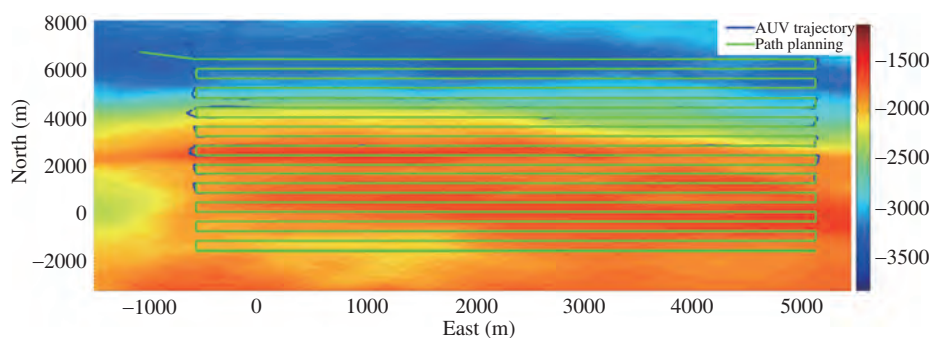


图 11 (网络版彩图) “潜龙二号” 二维航迹

Figure 11 (Color online) 2D trajectory of Qianlong-2

作时间缩减到 20 h. 它主要用于冷泉区近海底的声光调查 (图 13 是它在冷泉区拍摄的光学照片), 也是我国首台用于冷泉科考的国产 AUV. 2016 年 7 月, “探索 4500” AUV 在南海完成海试后, 紧接着在

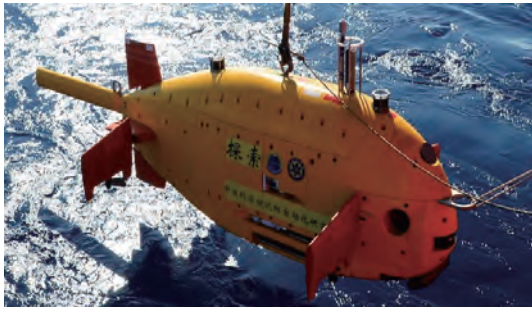


图 12 (网络版彩图) “探索 4500” AUV
Figure 12 (Color online) Explorer-4500 AUV

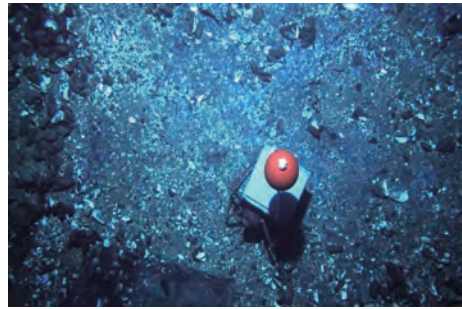


图 13 (网络版彩图) “探索 4500” AUV 冷泉区光学照片
Figure 13 (Color online) Photo of cold seep by Explorer-4500 AUV

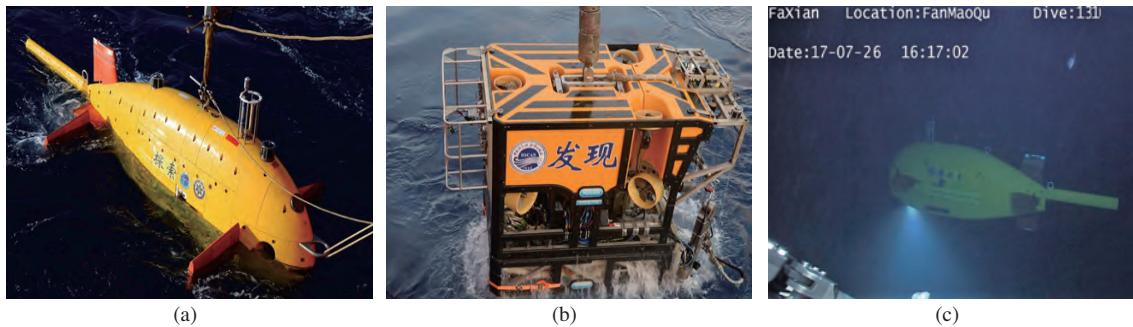


图 14 (网络版彩图) “探索 4500” AUV 与 ROV 协同作业

Figure 14 (Color online) Explorer-4500 collaborating with ROV. (a) Deploy AUV; (b) deploy ROV; (c) collaborating work

我国南海北部冷泉区开展了试验性应用, 这是它首次在我国南海冷泉区开展科学考察, 截止当前, “探索 4500” 累计作业 24 次, 已成为我国冷泉科学调查的标准装备。

2017 年 7 月, 基于“科学”船, “探索 4500” AUV 与“发现” ROV 在我国南海北部冷泉区开展了我国首次 AUV 和 ROV 的协同联合作业试验, 开创了海洋科考作业的新模式. AUV 与 ROV 协同作业将 AUV 区域探测的优势和 ROV 定点作业的优势相结合, 综合发挥两种类型水下机器人的作业效能. 协同作业过程如下: 第 1 步, “科学”母船分别布放“探索 4500” AUV (图 14(a)) 和“发现” ROV (图 14(b)); 第 2 步, AUV 自主开展近海底光学调查, 科学家操控 ROV 机械臂原位在线收集海底冷泉, 对冷泉区天然气水合物、冷泉生物群落和沉积物孔隙水等进行原位定量分析, 例如使用 Raman 光谱仪原位在线测量可燃冰的化学成分等; 第 3 步, 科学家遥控 AUV 在 ROV 毗邻位置进行光学探测, 同时利用 ROV 上的摄像机近距离实时监控 AUV 工作状态 (图 14(c) 是 ROV 拍摄 AUV 作业时的照片); 第 4 步, 完成作业后, 首先将 ROV 回收甲板, 最后回收“探索 4500” AUV.

光学探测是冷泉科学调查的一个重要任务. 冷泉区山势崎岖, 要求 AUV 抵近冷泉喷口进行超近距离拍照, 这对 AUV 的自主避障能力提出了更高的要求. “探索 4500” AUV 使用艏部安装的二维多波束声呐实时识别海底障碍, 根据障碍物复杂度和碰撞危险度决策避障行为, 图 15 是它在冷泉区光学调查的一次避障过程. 它首先根据声呐图像判断当前环境为高碰撞危险度的高复杂度地形区后, 系统

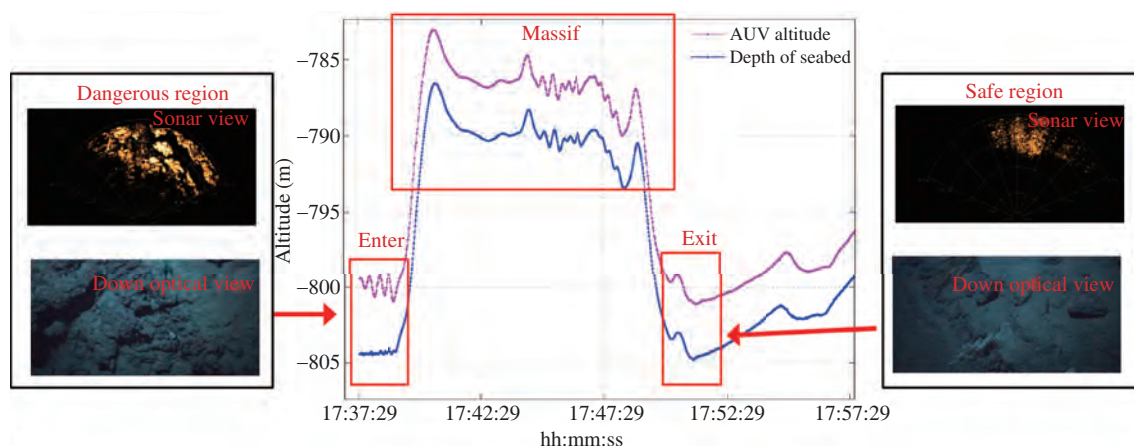


图 15 (网络版彩图) “探索 4500” AUV 避碰过程图

Figure 15 (Color online) Collision of Explorer-4500 AUV

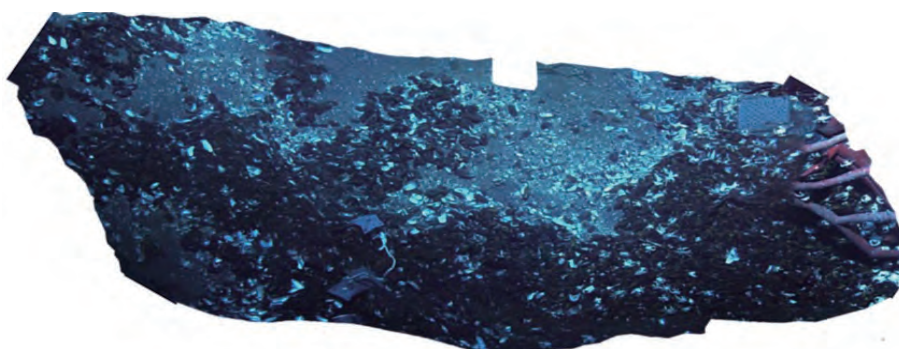


图 16 (网络版彩图) “探索 4500” AUV 获得的冷泉区光学图像自动拼接图

Figure 16 (Color online) Image mosaic of cold seep by Explorer-4500 AUV

转入自主避障模式; 当它从声呐图像中判断当前环境为低碰撞危险度的低复杂度地形后, 系统恢复正常光学作业模式, 保持精确地形跟踪。

“探索 4500” AUV 强大的自主避障能力为构建小区域光学地图奠定了基础。“探索 4500” AUV 具备光学图像自动拼接功能, 将空间上相互联系的图像序列经过空间配准、图像变换、重采样和图像融合后, 形成了一幅宽视角无缝全景高分辨率地图, 即从 360° 视角展现冷泉区全貌, 图 16 是它处理的冷泉区光学图像自动拼接图。

4 深海 AUV 的关键技术

深海 AUV 涉及计算机技术、控制技术、材料技术和人工智能等多个学科, 围绕深海 AUV 专业化、模块化、集群化、智能化的目标, 需要重点突破以下关键技术^[22, 23]。

4.1 总体设计技术

根据任务需求进行总体设计, 对 AUV 的总体布局、流体外形、动力系统、探测载荷、导航与控制

系统进行优化, 提高空间利用率, 降低系统重量. AUV 在有限空间内搭载多种传感器, 对总体的布局设计和系统电磁兼容设计提出了挑战. 总体设计的目标是既要实现 AUV 低阻力和高效率的空间运动, 也要整合多传感器复杂系统, 保证控制链路、通信链路、探测链路的正常工作.

4.2 智能化控制技术

4.2.1 自主控制技术

AUV 的自主控制技术包括运动控制、传感器数据感知、自主路径规划与避障等技术. (1) 运动控制是指 AUV 具备适应海洋环境而自主调整运动控制的能力. 例如根据海洋密度或海流等外界环境变量, AUV 自主整定航行控制参数; 对于海底地形测绘 AUV 而言, 要求 AUV 与海底保持一定高度航行, 所以要求 AUV 自主控制垂直面深度, 实现对海底地形的精确跟踪. (2) 传感器数据感知技术是指 AUV 根据传感器数据而自主识别目标, 实时决策和规划目标搜寻策略, 实现基于任务目标的智能感知、自主探测. 例如在热液科学调查中, 日本 R2D4 在黑岛海丘将预规划和在线热液识别相结合^[24], 美国 ABE 提出了 3 阶段热液喷口定位法, 即热液羽流探测阶段、热液羽流定位阶段、热液喷口精确定位阶段, 该方法多次成功精确定位热液喷口^[14,15]. (3) 自主路径规划与避障技术是指 AUV 在复杂海底地形下具备自主识别障碍物的能力、自主评估当前碰撞危险度的能力、自主决策避障路径的能力. 自主识别障碍物是指利用声呐自主检测海底场景中的障碍物; 自主评估碰撞危险度是指 AUV 依据当前地形复杂度、本体机动性和本体运动状态, 实时评估 AUV 与障碍物发生碰撞的危险程度; 自主决策避障路径是指 AUV 根据碰撞危险度、任务目标和本体状态, 自主决策当前避障行为动作, 自主进行局部或全局路径重规划. 例如美国的 Sentry、我国的“潜龙二号”均在印度洋热液探测过程中触发多次自主避障.

4.2.2 自主对接与回收技术

传统 AUV 的数据交换中心和能量交换中心是支撑母船, 而水下自主对接和回收技术将帮助 AUV 实现在水下基站进行自动能源补给和数据交换, 将 AUV 的支撑终端从水面搬到水下. 例如美国在自主海洋采集网络 (autonomous ocean sampling network, AOSN) 中开发了 3 种末端引导方式——声学、电磁、光学, 在引导传感器的辅助下, AUV 与固定水下回收装置实现了自主对接^[25]. 未来针对 AUV 长时间作业的任务需求, 需要重点解决水下自主对接操纵性分析、高精度声学/光学/电磁引导传感器、水下对接目标导航定位方法、自主对接控制等关键技术问题.

4.3 集群协同技术

集群协同技术是指在协同作业过程中, AUV 集群需具备信息共享能力、协同导航能力、任务动态分配能力、编队协同能力. (1) 信息共享能力是指在水声弱通信条件下, 实现集群内总体任务目标、AUV 工作状态、探测目标特征等关键信息的共享. (2) 协同导航能力是指集群内 AUV 通过信息共享和 AUV 间测距, 获得高精度导航定位的能力, 实现各 AUV 定位误差有界. 协同导航的研究工作包括可观测性分析、误差分析与补偿、分析估计一致性、编队构型优化等多个方面^[26]. 欧洲在多 AUV 项目 MAUVs GREX 中提出了一种基于 AUV 间测距的协同定位方案^[27]. (3) 任务动态分配能力是指根据 AUV 工作状态和目标探测状态, 具备实时重构任务或在线重规划的能力. (4) 编队协同能力是指根据任务需求, 控制多 AUV 保持一定距离编队航行的能力, 同时具备实时重构集群队形的能力.

4.4 水下数据链通信技术

为了实现多 AUV 间跨海区的数据共享,建立海陆空一体化观测平台,必须解决水下远程高速水声通信、水下网络互联等关键技术问题^[23].水下远程高速水声通信技术是解决大范围海区内 AUV 间及 AUV 与母船间高速数据传输问题,实现 AUV 集群、母船、岸基指挥中心间的数据共享.需要重点突破深海声信道远程通信技术、远程低误码率指令信息传输技术、信息传输保密技术等^[23].现有水声通信技术为提高通信距离和通信速率的目标,采用的主要技术方向包括水声信道编码技术(即增加信道容量、提高传输速率)、自适应均衡技术(即提高抗干扰能力),以及时间反转通信技术(即减少功耗、提高传输距离).但是水声信道受到多途效应影响严重、频率信道选择性衰落、可用频带资源有限、误码率高等因素的限制,使得未来通信距离和通信速率的提升空间有限.所以未来将网络互联技术应用到水声通信网络中,例如以 AUV 或滑翔机为水下移动网络中继、以浮标或无人船为水面网络移动中继、以无人机或卫星为空中网络移动中继,组成一套海洋全方位、立体化移动通信网络,实现海空天三位一体协同通信、协同作业.2017年6月,中国科学院沈阳自动化研究所开展了海空一体联合演示试验,验证了海空一体协同通信、协同作业的可行性.

5 深海 AUV 的发展趋势

海洋观测和资源勘查是一个长期的过程,需要研制工作时间更长、航程更远、深度更深、作业能力更强、更智能的深海 AUV.随着集成电路技术的发展,深海 AUV 技术装备向着专业化、模块化、集群化和智能化方向的发展,我国深海 AUV 在海洋科考及服务国民经济等方面将发挥重要的作用^[22].

5.1 从单体多功能向单体专业化、模块化发展

传统 AUV 具备执行声学探测、光学探测和水文探测等多种探测任务的能力.海洋科学调查希望未来 AUV 的航速更快、航程更长、作业时间更长、能耗更低、体积更轻和成本更低,而传统的单体多功能 AUV 受到能源、体积、重量和成本等诸多因素的限制,已经无法满足所有作业任务的需求.所以未来的 AUV 是专业化、模块化探测载荷的 AUV,例如根据任务类型划分为长航程声学调查型 AUV、区域光学调查型 AUV、模块化载荷 AUV.(1)长航程声学调查型 AUV 是以声学探测为主,兼容水文探测功能.因为它不需要执行低速光学探测任务,设计的重点是优化流体阻力和推进装置效率,使其航速更高,航程更长.(2)区域光学调查型 AUV 的特点是以光学探测为主,选配声学探测载荷.因为其主要任务是低速近底光学拍照,设计的重点是优化低速下的机动能力,实现高效而安全的近底光学探测.(3)模块化载荷 AUV 的特点是根据任务需求模块化搭载探测载荷,它的质量更轻、成本更低、功能更加灵活,而且它机动能力、特殊环境的适应能力、续航能力都比较均衡.

5.2 从单 AUV 向多 AUV 集群作业和多平台协同作业发展

因为单一 AUV 的作业效率有限,不同类型的 AUV 作业能力也存在差异,所以未来将从单 AUV 作业向多 AUV 集群作业发展,发挥不同 AUV 的作业优势,提高 AUV 的探测效率;未来的海洋观测是长期、全立体式的海洋观测,必须构建一个 AUV, ROV, ARV 等多平台的协同作业系统,从不同深度、不同尺度、不同海洋参数的角度观测海洋,研究海洋.当今陆地的集群作业技术无法满足深海弱通信水声环境,所以未来需要研究适用于水下的分布式集群控制技术,努力提高水下机器人的智能水平,实现弱通信条件下的高效集群作业和多平台协同作业.

5.3 从信息型 AUV 向自主作业型 AUV 发展

未来 AUV 将从由信息型 AUV 向自主作业型 AUV 发展, 兼具大范围长时间自主探测和精细化自主作业两大功能, 建立一套基于 AUV 的长期综合立体无人探测与作业系统, 实现从以人为主体的科考模式向以 AUV 为核心的未来科考模式的转变. 发展自主作业型 AUV, 需要 AUV 具有自主环境学习、自主可靠性分析、自主作业策略决策、人机责任重分配等能力. (1) 自主环境学习是指 AUV 首先基于历史数据进行先验学习, 然后在未知环境下自主学习和自主决策, 实时修正自身决策错误和从错误工作状态中自动恢复; (2) 自主可靠性分析是指 AUV 在线分析各组件工作状态对任务的影响, 实时评估自身是否具备执行当前任务的能力, 自主终止自身可靠性无法满足的作业任务; (3) 自主作业策略决策是指自主识别疑似目标是否与任务目标一致, 判断当前外部环境或设备状态是否具备作业条件, 自主决定任务目标的取舍, 并且自主开展任务作业, 例如热液羽流的追踪、水下目标的自主搜寻和科学样品的自主采样; (4) 人机责任重分配是指在 AUV 自主学习错误或无法自主完成作业任务时, 引入人作为 AUV 的大脑, 遥控 AUV 完成比较复杂的作业任务, 例如人工遥控作业型 AUV 的机械手进行样品采样或管线对接等. 随着 AUV 等海洋技术装备的发展, 未来海洋科考将全面进入无人化时代, 具有自主作业能力的智能化 AUV 将成为研究海洋的主力军. 水面无人科考船和水下无人科考站为深海 AUV 集群提供能源补充和信息交互, 将陆上实验室搬到海底, 建立基于 AUV 的长期综合立体无人探测与作业系统. 未来海洋科考的核心不再是人, 而是高智能的 AUV 集群, 这将为海洋科学研究提供更高价值和更低成本的海洋数据, 为人类更好地开发和利用海洋作出更大的贡献.

参考文献

- 1 Li Y P, Li S, Zhang A Q. Research status of autonomous & remotely operated vehicle. *J Eng Stud*, 2016, 8: 217–222
[李一平, 李硕, 张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状. *工程研究 – 跨学科视野中的工程*, 2016, 8: 217–222]
- 2 Ma W F, Hu Z. Current researches and development trend on AUV. *Fire Control Command Control*, 2008, 33: 10–13
[马伟峰, 胡震. AUV 的研究现状与发展趋势. *火力与指挥控制*, 2008, 33: 10–13]
- 3 German C, Yoerger D, Shank T, et al. Hydrothermal exploration by AUV: ABE in the lau basin and south atlantic. In: *Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts*, San Francisco, 2006
- 4 German C R, Yoerger D R, Jakuba M, et al. Hydrothermal exploration with the autonomous benthic explorer. *Deep Sea Res Part I-Ocean Res Pap*, 2008, 55: 203–219
- 5 Mcphail S D, Pebody M. Autosub-1. A distributed approach to navigation and control of an autonomous underwater vehicle. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Electronic Engineering in Oceanography*, Southampton, 1997. 16–22
- 6 Butler B, den Hertog V. Theseus: a cable-laying AUV. In: *Proceedings of OCEANS'93*, Victoria, 1993
- 7 SRI International. Underwater mass spectrometer from SRI international successfully integrates with bluefin autonomous underwater vehicle. *Sensors*, 2013. <https://www.edn.com/Pdf/ViewPdf?contentItemId=4425929>
- 8 Bondaryk J E. Bluefin autonomous underwater vehicles: programs, systems, and acoustic issues. *J Acoust Soc Am*, 2004, 115: 2615
- 9 Purcell M, Gallo D, Sherrell A, et al. Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447. In: *Proceedings of OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, 2011
- 10 Marthiniussen R, Vestgard K, Klepaker R A, et al. HUGIN-AUV concept and operational experiences to date. In: *Proceedings of OCEANS'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04*, Kobe, 2004
- 11 Yeo R. Surveying the underside of an Arctic ice ridge using a man-portable GAVIA AUV deployed through the ice. In: *Proceedings of OCEANS*, Vancouver, 2007
- 12 McPhail S, Furlong M, Huvenne V, et al. Autosub6000: its first deepwater trials and science missions. *Underwater Technol*, 2009, 28: 91–98
- 13 Singh H, Eustice R, Roman C, et al. The SeaBED AUV — a platform for high resolution imaging. In: *Proceedings*

- of Unmanned Underwater Vehicle Showcase Conference, Southampton, 2002
- 14 German C R, Yoerger D R, Jakuba M, et al. Hydrothermal exploration by AUV: progress to-date with ABE in the Pacific, Atlantic & Indian Oceans. In: Proceedings of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, Woods Hole, 2008
 - 15 Yoerger D R, Jakuba M, Bradley A M, et al. Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle. *Int J Robot Res*, 2007, 26: 41–54
 - 16 Yoerger D, Parnellturner R E, Smith D K, et al. Imaging sediments in the deep, rough terrain at the mid-Atlantic ridge using AUV sentry's CHIRP sub-bottom profiler. In: Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, 2013
 - 17 White S M, McClintock J T, Sinton J M, et al. Resolving volcanic eruptions: new fine-scale mapping by AUV sentry of Galápagos spreading center 92°W and 95°W. In: Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, 2010
 - 18 White S M, Lee A J. Hydrothermal chimney distribution from AUV sentry bathymetry and Alvin at the Galapagos spreading center. In: Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, 2014
 - 19 Pontbriand C, Farr N, Hansen J, et al. Wireless data harvesting using the AUV sentry and WHOI optical modem. In: Proceedings of OCEANS, Washington, 2016
 - 20 Zhang H W, Hao L, Wang Y H, et al. The general design of a seafloor surveying AUV system. In: Proceedings of OCEANS, San Diego, 2014
 - 21 Wang Y Q, Xu C H, Xu H X, et al. An integrated navigation algorithm for AUV based on pseudo-range measurements and error estimation. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Qingdao, 2017. 1625–1630
 - 22 Li S, Tang Y G, Huang Y, et al. Review and prospect for Chinese deep-sea technology and equipment. *Bull Chinese Acad Sci*, 2016, 31: 1316–1325 [李硕, 唐元贵, 黄琰, 等. 深海技术装备研制现状与展望. 中国科学院院刊, 2016, 31: 1316–1325]
 - 23 Pan G, Song B W, Huang Q G, et al. Development and key techniques of unmanned undersea system. *J Unmanned Undersea Syst*, 2017, 25: 44–51 [潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术. 水下无人系统学报, 2017, 25: 44–51]
 - 24 Nagahashi K. Underwater volcano observation by autonomous underwater vehicle “r2D4”. In: Proceedings of OCEANS, Brest, 2005
 - 25 Stokey R, Allen B, Austin T, et al. Enabling technologies for REMUS docking: an integral component of an autonomous ocean-sampling network. *IEEE J Ocean Eng*, 2001, 26: 487–497
 - 26 Huang G, Trawny N, Mourikis A I, et al. On the consistency of multi-robot cooperative localization. In: Proceedings of Robotics: Science and Systems, Seattle, 2009. 229–253
 - 27 Engel R, Kalwa J. Relative positioning of multiple underwater vehicles in the GREX project. In: Proceedings of OCEANS, Bremen, 2009

Research status of autonomous underwater vehicles in China

Shuo LI, Jian LIU, Huixi XU, Hongyu ZHAO & Yiqun WANG*

Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China

* Corresponding author. E-mail: wangyiqun@sia.cn

Abstract Recently, the autonomous underwater vehicle (AUV) has become a research hotspot with regard to unmanned underwater vehicles (UUVs). The AUV has been widely used in marine scientific research, marine resource investigations, and marine security assurance. With the support of the state, China has made an important breakthrough in deep-sea AUV technology. AUVs have played an irreplaceable role in various deep-sea resource surveys on a large scale in voyage applications. The paper introduces the research status of foreign AUVs, the development of China's deep-sea AUVs, and prospects the trend of the deep-sea AUV in China.

Keywords AUV, UUV, marine resources investigation



Shuo LI was born in 1970. He obtained the M.S. and Ph.D. degrees from the Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang, in China. He is currently a professor and deputy director of the Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science. His research interests include the technology of UUVs and the application of UUVs in extreme environments.



Jian LIU was born in 1962. He obtained the M.S. degree from the Dalian University of Technology. Currently, he is a professor at the Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science. His research interests include the control technology of AUVs.



Huixi XU was born in 1970. He obtained the M.S. degree from Northeastern University. Currently, he is a professor at the Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science. His research interests include the technology of AUVs.



Hongyu ZHAO was born in 1979. He obtained the M.S. degree from Dalian Maritime University. Currently, he is an associate professor at the Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Science. His research interests include the technology of AUVs.