

# 智能海洋机器人技术进展

徐玉如<sup>1</sup> 肖坤<sup>1</sup>

**摘要** 智能海洋机器人是在复杂海洋环境中执行各种任务的智能化无人平台, 包括智能水下机器人和智能水面机器人. 基于实践和在相关技术难题上的经验, 提出了一些关键技术问题的解决方案. 在智能水下机器人方面, 探讨了体系结构、运动控制、智能规划与决策和系统仿真等关键技术. 在智能水面机器人方面, 探讨了快速性和智能化问题. 我国在智能海洋机器人技术研究方面已经取得了较大的进步, 但距离全面应用还有很大差距.

**关键词** 海洋机器人, 人工智能, 体系结构, 智能控制  
**中图分类号** TP24

## Technology Development of Autonomous Ocean Vehicle

XU Yu-Ru<sup>1</sup> XIAO Kun<sup>1</sup>

**Abstract** Autonomous ocean vehicles, which consist of autonomous underwater vehicle and autonomous surface vehicle, are intelligent unmanned platforms that can carry out various missions in sophisticated ocean environment. Several schemes for several key technology problems are proposed based on experience and practice of related technology problems. The key techniques about system architecture, motion control, intelligent planning and decision making and system simulation are discussed in respect of autonomous underwater vehicles, while speed performance and intelligence problems are discussed in respect of autonomous surface vehicles. The technology of autonomous ocean vehicles in our country has made great headway, but it still has a long way to go before reaching maturity.

**Key words** Ocean vehicle, artificial intelligence, system architecture, intelligent control

## 1 引言

海洋所蕴藏的巨大经济潜力以及它在政治、军事上的重要地位已经受到世界各国的广泛关注. 随着科学技术的发展, 近年来人们日益把注意力投向作为海洋资源的开发工具的各种海洋机器人的研发. 智能海洋机器人由于在实际作业中无须人工干预, 可以自主地运行在难于接近和无法预知的海洋环境中, 完成自主导航、自主避障和自主作业等任务, 无论在民用上还是军事上都有无可比拟的优越性.

智能海洋水下机器人按照活动的区域可以分为智能水下机器人和智能水面机器人(智能高速无人艇)两大类. 本文从这两个方面分别阐述智能海洋机器人的技术发展现状.

## 2 智能水下机器人关键技术

智能水下机器人技术的发展已取得令人振奋的进展, 但仍然有大量的技术难题需要克服. 智能水下机器人涉及到的主要关键技术包括:

### 2.1 体系结构

智能水下机器人不同于传统的遥控式水下机器人, 其显著区别在于它有自己的“思维模式”, 并且可以按照“思维模式”自主地做出判断, 进行推理, 从而决定行为. 如何提高水下机器人的自主性, 适应复杂的海洋环境并完成各种任务, 是体现系统智能化的重要表现. 研究体系结构的目的是不断改进和完善现有的体系结构, 加强对未来的预报预测能力, 使系统更具有前瞻性和自主学习能力.

在人工智能的研究中, 采用基于符号的推理和人工神经网络技术是两种主要方法. 对于智能水下机器人技术研究中基于符号的推理能力在高层是必须的, 但是它存在知识获取困难、系统较脆弱、学习能力差和实时性差等局限性<sup>[1]</sup>. 而人工神经网络有较强的学习、联想、自组织和自适应能力, 它采用并行、分布式的存储和处理机制, 使得系统具有容错性和鲁棒性<sup>[2]</sup>. 这些特性在某些方面弥补了基于符号推理的知识的不足. 在从数据的类型和接口等方面来分析, 高层的推理是在符号空间的演算, 它的输入主要应该是符号参数, 而实际水下机器人在物理界的传感器的主要是数值参数, 存在数据类型的匹配问题, 而人工神经网络可以在对数值参数运算的基础上转换成符号输出, 某种程度上可以看作是符号推理的前端机和后端机, 为此我们根据水下机器人的特点, 采用符号推理和人工神经网络相结合方法

收稿日期 2007-4-16 收修稿日期 2007-4-21  
Received April 16, 2007; in revised form April 21, 2007  
国家自然科学基金(50579007)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (50579007)  
1. 哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001  
1. National Defence Key Laboratory of Underwater Vehicles Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001  
DOI: 10.1360/aas-007-0518

(图 1), 同时在底层增加行为划分, 即在紧急情况时完全由传感器信息直接控制执行器, 产生避障行为如紧急倒车等. 该体系经过 2005 年的海中调试, 取得了比较理想的结果.

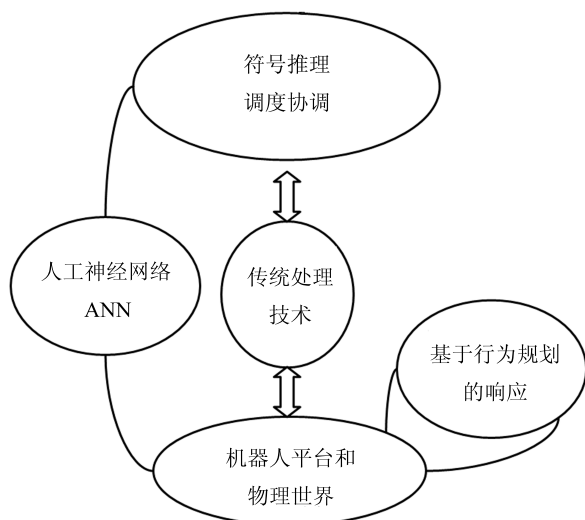


图 1 符号推理和人工神经网络的结合方式  
Fig. 1 Combining manner between denotation consequence and ANN

## 2.2 运动控制技术

由于海洋环境的复杂性, 水下机器人六个自由度运动的强非线性和相互耦合, 其动力学模型相当复杂. 多数研究人员把注意力和精力放在神经网络和模糊逻辑控制技术上. 神经网络控制的优点是充分考虑到了水下机器人的强非线性和各个自由度之间的耦合性, 能够跟踪学习系统自身或外围环境的缓慢变化. 其缺点是结构和参数不易确定, 同时当外界干扰的幅度和周期跟水下机器人自身的运动幅度和周期相近, 神经网络的学习就出现明显的滞后现象, 使得控制出现振荡的现象. 模糊控制器的设计比较简单, 而且稳定性也较好, 但是众多的模糊变量以及隶属度函数的选取需要有丰富的操纵经验, 在实际海上试验中, 调试时间往往是有限的, 过于复杂的参数调整制约了模糊控制技术在潜水机器人运动控制中的应用.

通常水下机器人的控制方式有 PID 控制器、神经网络控制器和模糊逻辑控制器三种, 但是, 由于这三种方法在实际运用都存在一些参数难以确定的缺陷, 为了解决好这一问题, 我们从模糊逻辑控制方式出发, 借鉴 PID 控制的结构形式, 同时考虑神经网络的自学习能力, 推导出了一种全新的而又简单有效的控制方法, 将其定义为 S 面控制方法<sup>[3]</sup>, 其输入输出关系如图 2 所示. 同时尝试采用免疫遗传算法进行设计参数的优化整定, 使得 S 面控制器的参数

整定更加快速, 在水池试验、湖上试验和海上试验中都表明该方法大大改进了控制器的控制精度与控制收敛速度<sup>[4]</sup>.

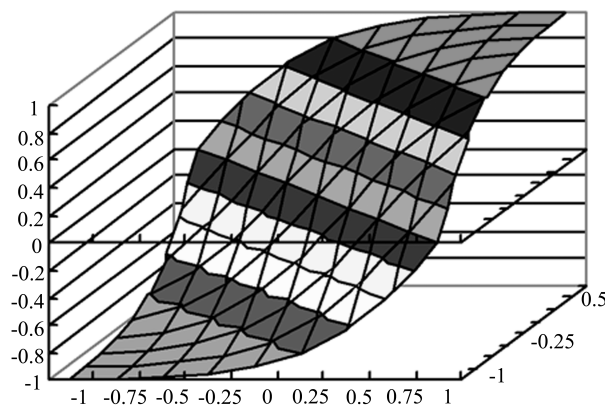


图 2 S 面控制器的输入输出面  
Fig. 2 Input and output surface of S-surface controller

## 2.3 智能规划与决策技术

智能水下机器人的规划与决策主要包括三个部分: 全局路径规划, 局部路径规划和任务决策调度. 海洋环境中的风浪流是复杂多变的, 对于智能水下机器人来说, 海流对智能规划与决策系统提出了较高的要求. 针对海洋有流环境下水下机器人全局路径规划的特殊性, 我们尝试了根据海流实时改变建模权重的改进遗传算法, 坐标系旋转法等, 可以实现水下机器人艏向严格顶流的要求; 另一种是基于栅格的位形空间激活值传播法<sup>[5]</sup>, 该方法能方便地实现各种优化条件, 并适用于各种复杂的环境, 并已成功应用于海中试验. 图 3 为采用激活值传播法搜索得到的小范围路径.



图 3 AUV 小范围海区的路径规划  
Fig. 3 Small region path planning by AUV

为了使水下机器人适应海洋环境, 我们采用具有竞争思想和自组织机制的神经网络实现了 Q-学习<sup>[6]</sup>. 同时采用势场法来综合考虑各种传感器的信

息,从而确定外部强化值.让水下机器人在水下比较复杂的环境中以漫游方式进行避碰行为学习.仿真结果表明具有 Q-学习机制的机器人经过学习后可以在比较复杂的环境中运动,从而提高水下机器人对环境的适应能力.仿真结果如图 4 和图 5 所示.仿真结果表明具有 Q-学习机制的机器人经过学习后可以在比较复杂的环境中运动,从而提高机器人对环境的适应能力.

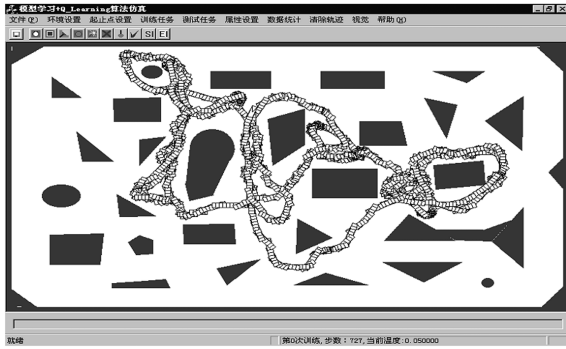


图 4 机器人学习初始阶段的运动轨迹

Fig. 4 Track of AUV during the beginning of learning period

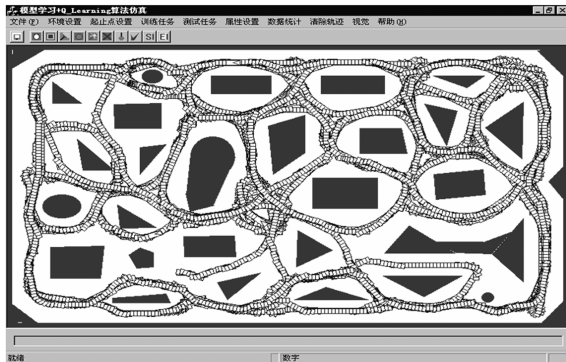


图 5 机器人经过一段时间学习后的运动轨迹

Fig. 5 Track of AUV after learning for a period of time

## 2.4 水下机器人系统仿真技术

海洋中的环境十分复杂,并且缺少必要的观察和通讯手段,当水下机器人在海中进行工作和试验时,很难现场实时地进行监控.这就要求在进入正式工作或试验之前,必须确保水下机器人工作稳定性.在仿真环境中模拟水下机器人的工作过程可以暴露水下机器人的各种问题,极大地提高其在真实环境中工作的稳定性,减少不必要的损失<sup>[7]</sup>.

我们所采用的仿真器的硬件系统是以 SGI 图形工作站为中心,连接若干接口仿真计算机,组成网络化的调试与开发系统.其中 SGI 图形工作站用于仿真系统初始化管理、虚拟世界视景描述、水下机器人的空间运动和传感器仿真<sup>[8]</sup>.在此基础上,为了更

好地模拟控制系统的工作状态,引入了半实物仿真技术.通过对水下机器人体系结构中的控制层进行实物仿真,对感知层以及执行层进行虚拟仿真构建了水下机器人半实物仿真系统.通过数据接口机和实物控制系统的引入,在仿真环境下验证了软件逻辑结构、控制系统的硬件体系、数据接口、系统可靠性等.

经过几年的深入研究与应用,我们开发的水下机器人仿真器能够很好地提供研究智能水下机器人系统信息流和控制流、智能行为作业全过程(功能性)以及运动控制、目标的光视觉识别作业过程等分系统技术的开发平台,同时可以仿真不同海域的各种海况,模拟水下机器人可能出现的故障,进行水下机器人集成系统的可靠性考核.仿真试验结果如图 6 所示.

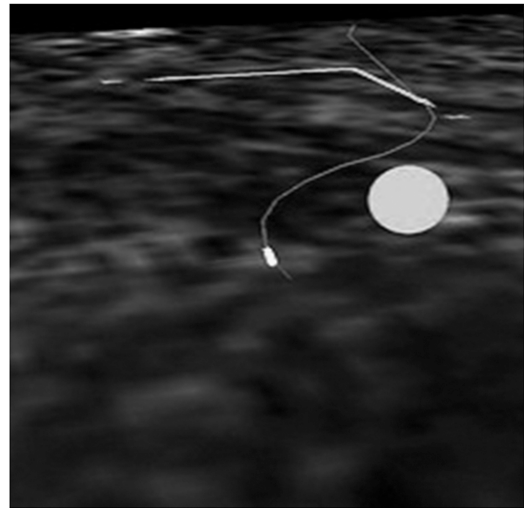


图 6 避障仿真试验结果

Fig. 6 Obstacle avoidance simulation result

## 3 智能水面机器人关键技术

智能水面机器人能够完成诸如海事遇难人员搜救、重要目标监视与保护,反恐巡逻等特殊任务,因而越来越多地受到了世界各国的重视.在我国智能水面机器人尚未进行系统地研究,特别是智能、高速、无人等方面的集成,还仅仅停留在遥控艇的研制阶段.针对这种现状,我们进行了一些前瞻性的工作.

### 3.1 快速性

智能水面机器人不同于智能水下机器人的突出特点是要求航行速度快.可达到 40 节(约 20 米/秒)以上.因此采用低阻力,良好耐波性,航行稳定性的船体性能研究是必不可少的.我们对单体刚性充气艇(RIB)、双体槽道、三体滑行艇的多种方案进行了

流体力学理论分析和拖曳船模试验(图7), 通过比较分析, 得到了一些有益的结果, 为今后进行系统的设计和研究打下了基础. 另外由于喷水推进具有较高的效率和无需操舵的特点, 这将成为智能水面机器人推进技术研究的热点.



图7 滑行艇拖曳试验

Fig. 7 Towed hydroplane experiment

### 3.2 智能化

智能水面机器人由于航行速度快, 续航力大, 作业区域范围大的特点, 其智能控制系统必须考虑其自身的特点. 要提高智能水面机器人智能水平, 以下一些关键技术都是必须考虑的, 其中包括根据指令进行快速全局路径规划和基于识别的自主避障、自动跟踪、自动执行任务等多个方面. 作为一个无人操纵的小型船舶, 智能水面机器人经常需要在无任何干涉的情况下独立作业, 因此全局规划中电子海图的建立与调用方法, 适合大范围区域规划的快速算法, 局部路径规划中与航速相关的回转半径等问题都是必须妥善处理的. 另外智能水面机器人在静水、波浪、涌浪条件下做各种运动时动力学性能存在较大差异, 因此对智能水面机器人的推进与控制系统都需要进一步研究, 尤其是喷水推进在智能水面机器人的应用以及控制方式. 由于没有应用的先例, 对于现有的激光雷达、扫描雷达、自动识别系统(AIS)、激光测距、激光测速、声视觉、光视觉、红外探测等视觉传感器在智能水面机器人上应用的可能性与可靠性也都需要进一步地探讨.

## 4 结论

智能海洋机器人作为我国多年来一个重点科研方向, 取得了一些成绩, 在各个专项技术, 系统集成与实验等方面都有了较大的进步, 进一步缩小了在此领域与世界发达国家的科技差距. 但我们也应该清醒地看到: 一方面, 在工程化方面我们与欧美的差距依然存在; 另一方面与智能海洋机器人的发展相配合的多学科发展, 也还有许多工作要做.

## References

- Hall W D, Adams M B. Autonomous vehicle taxonomy. In: Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Washing D C, USA, IEEE, 1992. 49~64
- Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1986, **2**(1): 14~23
- Liu Xue-Min, Xu Yu-Ru. S control of automatic underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 2001, **19**(3): 81~84  
(刘学敏, 徐玉如. 水下机器人运动的 S 面控制方法. *海洋工程*, 2001, **19**(3): 81~84)
- Li Ye, Pang Yong-Jie, Wan Lei, Chang Wen-Tian, Liang Xiao. Immune-genetic optimization of underwater vehicle S surface controller. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, **27**(Suppl.): 324~330  
(李晔, 庞永杰, 万磊, 常文田, 梁霄. 水下机器人 S 面控制器的免疫遗传算法优化. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, **27**(增): 324~330)
- Wang Xing-Ce, Zhang Ru-Bo, Gu Guo-Chang. Potential grid based global path planning for robots. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, **24**(2): 170~174  
(王醒策, 张汝波, 顾国昌. 基于势场栅格法的机器人全局路径规划. *哈尔滨工程大学学报*, 2003, **24**(2): 170~174)
- Zhang R B, Shi Y. Research on intelligence robot formation based on fuzzy Q-learning. In: Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, China, IEEE, 2004. 1936~1941
- Roeckel M W, Rivoir R H, Gibson R E, Linder S P. Simulation environments for the design and test of an intelligent controller for autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Phoenix, USA, IEEE, 1999. 1088~1093
- Zhao Jia-Min, Xu Yu-Ru, Lei Lei. A simulator for the test of intelligent path planning of AUV. *Journal of System Simulation*, 2004, **16**(11): 2448~2450  
(赵加敏, 徐玉如, 雷磊. 用于水下机器人智能路径规划的仿真器的建立. *系统仿真学报*, 2004, **16**(11): 2448~2450)



徐玉如 哈尔滨工程大学教授, 中国工程院院士. 研究方向为海洋机器人系统仿真、智能控制体系结构、运动控制和试验系统集成等. 本文通信作者. Email: xuyuru@hrbeu.edu.cn.

(XU Yu-Ru Academician at Chinese Academy of Engineering. His research interest covers ocean vehicle system simulation, architecture of intelligent control, motion control, and system integration. )



肖坤 哈尔滨工程大学博士研究生, 研究方向为海洋机器人智能控制体系结构、运动控制和系统仿真等. E-mail: mcenter@vip.sina.com

(Xiao Kun Ph.D. candidate at the School of Navy Architecture, Harbin Engineering University. His research interest covers architecture of ocean vehicle intelligent control, motion control, and system simulation. )