

智能水下机器人技术展望

徐玉如, 庞永杰, 甘 永, 孙玉山

(哈尔滨工程大学 水下机器人技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:智能水下机器人作为一个复杂的系统,集成了人工智能、水下目标的探测和识别、数据融合、智能控制以及导航和通信各子系统,是一个可以在复杂海洋环境中执行各种军用和民用任务的智能化无人平台。由于水下机器人在海事研究和海洋开发中具有远大前景,在未来水下信息获取、精确打击和“非对称情报战”中也有广泛应用,因此水下机器人技术在世界各个国家中都是一个重要和积极的研发领域。基于实践和在相关技术难题上的经验,对智能水下机器人的发展现状和前景进行了描述,对这些问题可能的解决方案提出了建设性的意见。这些相关的技术包括:水下机器人载体设计技术、体系结构、基础运动控制技术、智能规划与决策技术、系统仿真技术、水下目标探测与识别技术、系统可靠性与容错技术等。随着科学技术的发展,人工智能技术将会在智能水下机器人上得到更为广泛的应用。然而水下机器人技术仍然处于基础研究和试验开发阶段,距离全面应用还有很长的路要走。

关键词:水下机器人;人工智能;体系结构;智能控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2006)01-0009-08

AUV—state-of-the-art and prospect

XU Yu-ru, PANG Yong-jie, GAN Yong, SUN Yu-shan

(State Key Laboratory of Underwater Vehicle Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Autonomous underwater vehicle (AUV), as a sophisticated system integration of artificial intelligence, underwater target detection and identification, data fusion, intelligent control, communication and navigation sub-systems, is an unmanned platform to carry out various civil and military missions in complex ocean environments. Owing to the expectation that AUV will be very promising in maritime research and ocean development and it also may find its way of application in the future underwater conflict for intelligence acquisition, accurate attack and “asymmetric intelligent acupuncture warfare”, AUV tech is an important and active field of R & D, especially in the big powers of the world. State-of-the-art and main trend of development are presented based on our own (domestic) practice and experiences in related technical problems and suggestive proposals for probable way of solution to the problems are offered. The related areas are as follows: vehicle (carrier/platform) design, architecture, control, intelligent planning and decision making, AUV simulation and virtual reality, underwater target detection and identification, reliability and fault-tolerant techniques, etc. With the development of science and artificial intelligence, we'll see encouraging results in many enabling techniques for AUV. However, AUV technology is still in its stage of basic research, test and development, and there is still a long way to go for its full availability.

Key words: autonomous underwater vehicle; artificial intelligence; system architecture; intelligent control

海洋是人类发展的四大战略空间(陆、海、空、天)中继陆地之后的第2大空间,是生物资源、能源、水资源和金属资源的战略性开发基地,是最现实、最有发展潜力的空间,对我国经济与社会发展产生着直接、巨大的支撑作用。所以,对海洋进行广泛深入

的开发必将成为我国在21世纪的发展主题之一。作为人类探索和开发海洋的助手,水下机器人特别是智能水下机器人将在这一领域显示它们多方面的用途。

智能水下机器人是将人工智能、自动控制、模式识别、信息融合与理解、系统集成等技术应用于传统的载体上,在无人驾驶的情况下自主地完成复杂海

收稿日期:2006-02-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579007)。

洋环境中预定任务的机器人.依据俄罗斯科学家B. C. 亚斯特列鲍夫等人所著的《水下机器人》一书,第3代(智能)水下机器人是一种具有人工智能的系统,具有很高的自主能力、记忆能力和学习能力,自主适应外界环境的变化.操作人员只需下达使命给机器人,与战术甚至与战略有关的任务,都由水下机器人自主完成.智能水下机器人代表了水下机器人技术目前发展的方向.

文章基于在水下机器人方面的实践经验,对智能水下机器人技术的发展现状和前景进行了描述,包括水下机器人载体设计技术、体系结构、基础运动控制技术、智能规划与决策技术、系统仿真技术、水下目标探测与识别技术、系统可靠性与容错技术等.对存在的一些技术问题,给出了可能的解决方案和建设性的意见.

1 智能水下机器人的关键技术展望

智能水下机器人技术发展已取得令人振奋的进展,但仍然面临大量的技术难题需要克服,距离智能水下机器人作为满足海洋研究开发或成为武器装备的目标还需要一段较长的时间.智能水下机器人涉及到的关键技术如下.

1.1 智能水下机器人载体设计技术

智能水下机器人需适应复杂的海洋环境,其载体不仅要具有耐压、水密和承受负载的能力,而且要具有低阻力、高推进效率和实现空间运动的能力.另外,在十分有限的空间,需配置不同性能的多种传感器以满足环境探测、目标识别、自主航行和自主完成任务的需要.这些设备的系统集成设计要确保系统的信息流与控制流的正常工作,所以系统各个部分的电磁兼容和集成设计就显得十分重要.

1.1.1 载体一体化设计技术

一体化设计采用标准化和模块化设计.为降低其生产成本、使用成本,提高其可靠性,扩展其应用,国内外正推进智能水下机器人的标准化和模块化,要求研究有关的机械、电气和软件标准接口概念,设计和建造中尽可能采用模块化设计,并重视开展总体布局与结构优化设计,主要功能部件小型化、智能化、低功耗设计.正研制的试验型机器人系统,尝试了一体化设计思想,采用功能模块化设计.从水池与海中试验结果可以看出,该机器人具有系统可靠性、功能优越性.

为适应较大范围的航行,从流体动力学角度来看,智能水下机器人的基本形状宜采用回转细长体,类似于鱼雷.并尽可能采用新型的轻质复合材料,这些材料具有重量轻、浮力大、强度高、耐腐蚀及抗生物附着能力强的特点,可使智能水下机器人具有大的正浮力,从而提高续航力和有效负载.另外,复合

材料的噪音小,这将降低传感器的背景噪声.

1.1.2 仿生技术应用到智能水下机器人载体的可能性与现实性

近年来,国内外不少学者十分重视研究仿生学,并试图将其应用到智能水下机器人载体的设计.由于鱼类摆尾效率高、噪声低、操纵灵活且尾迹小,从水动力学、声学角度看,是十分理想的水中推进和操纵方式.若掌握了鱼类游动的原理,用到智能水下机器人上,甚至用到船舶上,将会引起舰船技术革命^[1].

目前,国内外针对不同的仿生对象建造了不同原理性样机,取得多项研究成果.哈尔滨工程大学从2000年开始研究开发了“仿生-I”样机系统,如图1所示,长2.4 m,潜深10 m,负载能力70 kg,现已完成水池与海中的试验,水下航行速度达1.2 m/s,并能灵活地进行回转机动^[2].

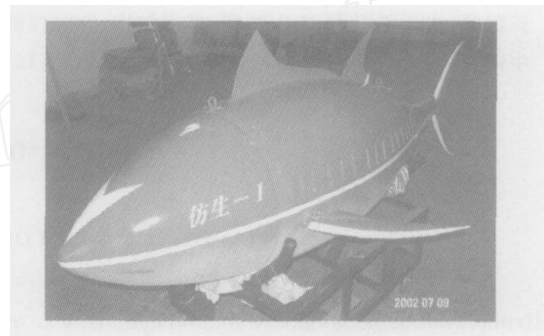


图1 仿生水下机器人载体“仿生-I”号

Fig. 1 Bionic underwater vehicle “Fangsheng-I”

必须指出,目前鱼类摆动游动的仿生学研究还处在机理研究阶段,要实现真正意义的仿生和与可配置多种传感器实现多自由度闭环控制,满足各种探测识别传感器的要求,把潜在的优势变成现实的水下机器人载体还要走相当长的路.

1.1.3 小型化技术应用在智能水下机器人的前景

由于小型化技术使得水下机器人具有体积小、阻力低、机动灵活、隐身性能好、突击能力强、成本低、可批量生产、搭载方便的特点,使得微小型水下机器人非常适合发展成为一种无人化、智能化的水下作业系统.由于微小型水下机器人体积小,尤其在海底地形非常复杂的情况下,微小型水下机器人的机动特性和智能程度是任务能否顺利完成的关键.

由于微小型水下机器人在未来具有极为广阔的应用前景,发达国家已经投入了大量的人力物力致力于这类智能载体的研发,并已研制出多种系统样机.与此同时,在微小型水下航行器的导航、控制、环境感知、能源与动力等关键共性技术方面取得了长足进展,使微小型水下航行器的自主水平不断提高,续航能力大幅度增加.目前,哈尔滨工程大学“水下

机器人国家重点实验室”研制的微小型水下机器人实验样机,如图 2 所示,已完成了水池试验和湖中试验,该实验样机总长 0.95 m,排水量 80 kg,潜深 50 m,最大航度 2.0 kn,可定深定向航行,续航力超过 15 km,具有自主航行和探测能力。



图 2 微小型水下机器人载体“微龙-号”
Fig. 2 Mini underwater vehicle “WEILONG”

1. 2 体系结构

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,这与智能水下机器人的研究任务是一致的,也是提高智能水平(自主性和适应性)的关键技术之一。

人工智能技术是智能水下机器人具有自主能力的基础.而体系结构技术包括人工智能技术、各种控制技术在内的集成技术,相当于人的大脑和神经系统.软件体系负责智能水下机器人总体集成和系统调度,直接影响其智能水平,它涉及到基础模块的选取、模块之间的关系、数据(信息)与控制流、通讯和接口的协议规范,全局性信息资源的管理及总体调度机构。

模拟人类大脑“形式”工作方式的、基于人工智能推演的分层递阶体系结构,即根据时间和功能来划分体系结构中的层次和模块,是最为广泛遵循的原则.最具代表性的是美国航天航空局(NASA)和美国国家标准局(NBS)提出的 NASREM 的结构^[3].该系统结构中各模块的功能和关系非常清楚,有利于系统的构成和各模块内算法的装填和更换,但同时带来了系统响应慢等其他方面的问题。

美国麻省理工学院(MIT)的布鲁克斯(Rodney A. Brooks)模拟人类大脑物理结构的基于连接主义的反射性,以移动式机器人研究为背景,提出以一种依据行为来划分层次和构造模块的思路^[4].它的特点基本与分层递阶体系相反。

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 2 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备的,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.而人工神经网络有较强的学习、联想、自组织和自适应能力,尤其在处理一些不精确的、不完全的信息时,更显出其优越性.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.这些特性在某些方面弥补了基于符号推理知识的不足.因而逻辑推理和人工神经网络技术的结合非常重要。

根据水下机器人的特点,采用符号推理和人工神经网络的结合(如图 3 所示),建立了分层递阶控制的软件体系结构,该体系结构分为 6 层、3 列、全局数据库和人机接口等(如图 4 所示).6 层为物理层、感知层、反应层、动作层、规划层和使命层;3 列为感知融合列、动作规划列和学习评价列;一共 20 个功能模块(不包含物理层).该体系经过 2005 年的海中调试,取得了比较理想的结果^[5]。

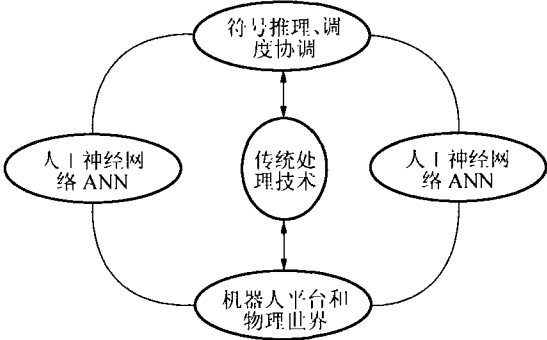


图 3 符号推理和人工神经网络的结合方式
Fig. 3 Combining manner between denotation consequence and ANN

1. 3 水下机器人运动控制技术

水下机器人的运动具有明显的非线性与交叉耦合性.为了完成不同的任务,要求水下机器人在多个自由度上有较高的控制精度.所以,需要建立完善的集成运动控制系统,使之能够紧急避障(基于行为的反映)并与控制信息进行统一描述,同时将信息融合、故障诊断、容错控制策略集成。

考虑到水下机器人运动的时变性、环境的复杂性和不确定性,很难建立精确的水下机器人运动模型.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^[6].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水下机器人运动控制中的应用.

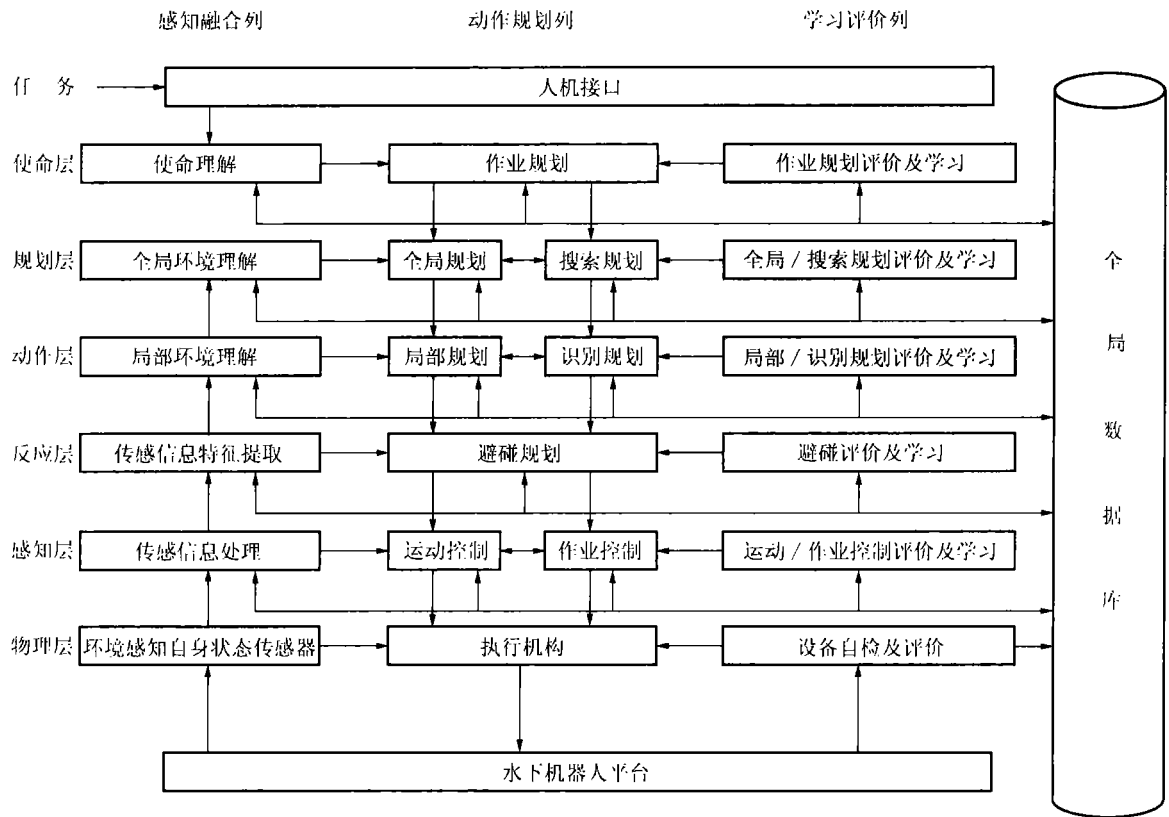


图 4 智能水下机器人软件体系结构图
Fig. 4 Software architecture of AUV

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 3 种,但是,由于这 3 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,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—种全新的而又简单有效的控制方法,将它定义为改进的 s 面控制方法^[7-8]. 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.

总体而言,智能运动控制方法是水下机器人运动控制的发展方向,但是在具有自适应特征的同时仍然需要保证水下机器人运动控制的稳定性以及在实际应用中的可行性.

1.4 智能规划与决策技术

复杂的海洋环境对智能规划与决策系统提出了较高的要求. 试验环境中海流的变化是相当明显的,海流的大小与方向不仅与时间有关,而且随地点的不同而变化. 对智能控制系统的规划与决策技术来说,海流的影响是必须考虑的重要因素之一.

针对海洋有流环境下机器人全局路径规划的特

殊性,提出了 2 种解决该问题的路径规划新方法. 一种是坐标系旋转法,这种方法的基本思想是将坐标系绕着 z 轴旋转,直到 x 正半轴方向指向来流方向. 在搜索过程中只要保证机器人的姿态始终与 x 正半轴方向一致,就可以实现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^[9]. 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,具有较佳的控制生成路径的能力和可扩展性,而且算法本身具有内在的并行性,最为重要的是该方法很好地满足了机器人艏向尽量顶流的要求,并已成功地应用于海中试验,如图 5 所示.

为了使机器人适应海洋环境,将强化学习机制引入到机器人避碰规划中,目的是使机器人具有较好的避碰能力. 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,网络的输出对应每个动作的 Q 值,网络的输入对应描述环境的状态. 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. 让机器人在比较复杂的环境中以漫游方式进行避碰行为学习,仿真结果如图 6 和图 7 所示. 仿真结果表明具有 Q-学习机制的机器人经过学

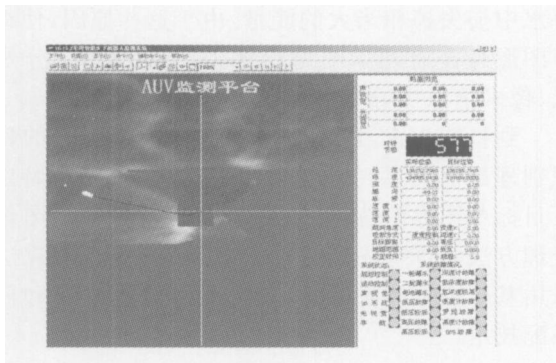


图 5 路径规划海上试验结果

Fig. 5 Path planning result at sea trial

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。

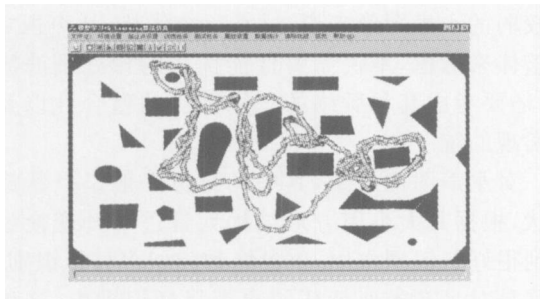


图 6 机器人学习初始阶段的运动轨迹

Fig. 6 Track of AUV during the beginning of learning period

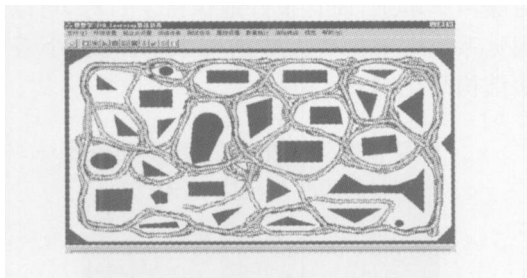


图 7 机器人经过一段时间学习后的运动轨迹

Fig. 7 Track of AUV after learning for a period of time

1. 5 水下机器人系统仿真技术

智能水下机器人通常工作在无法预知的或危险的环境中,在保持空间运动控制的同时,完成复杂的任务与使命.由于水下机器人工作环境的不可接近性,使得其硬件与软件体系的研究、开发和测试比较困难,研究人员难以对其行为进行监控.为此有必要研究和开发水下机器人的系统仿真器,使其成为研究工作的重要手段,即以仿真器作为调试平台,对水下机器人各分系统进行调试和检验,对所研究的机器人硬、软件进行正式试验之前的试验性评估.通过建立系统仿真平台,在实验室环境下仿真各种海况以及水下机器人在执行任务中可能出现的故障以及产生的后果,从而制定相应的对策,这对于水下机器人的安全性和可靠性测试是尤为重要的.另外在正

式试验结束之后,仿真器可以根据记录的各种传感器数据、系统状态的转换数据等再现整个作业过程,从而可以对水下机器人在控制指令下的动态响应和各软件的执行情况进行进一步分析^[10-11].

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,组成一个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、机器人的空间运动和传感器仿真.

虚拟世界视景描述包括了海洋环境的描述和按照一定的视角产生符合要求的声光视觉信息,包括三维场景、目标、海水能见度和灯光的变化等等.

机器人空间运动仿真 是根据推进控制指令,对推力器模型进行实时仿真,给出合成的推力和力矩向量,并将当前的推力器工作状态反馈给控制系统.然后根据建立的水下机器人三维空间运动模型,对机器人的动态响应进行实时的仿真解算,并将结果传送到视景仿真模块进行视景更新,同时传送到接口计算机,生成自身状态与环境传感器的输出信号,包括光纤陀螺、深度计、高度计和多普勒速度计等^[13].

探测传感器仿真 包括光视觉传感器仿真和声视觉传感器仿真.光视觉仿真由 SGI 工作站上的 Performer 软件包来完成.在视景仿真软件中,专门定义摄像机窗口,从摄像机窗口看到的场景即相当于摄像机拍摄到的场景.通过 SGI 的内置视频卡,将摄像机窗口中的计算机图像转换为全电视信号,输出到光视觉处理机.声视觉的仿真是非常困难的工作.由于声波在海水介质中传播情况非常复杂,所以接近于实际的声视觉仿真十分困难,同时对于其他声传感器仿真存在同样的困难.故对声传感器的仿真进行了简化,研究了声视觉的过程性仿真(仿真探测与识别的过程)^[14].该方法已较好地应用于智能控制系统的闭环调试.

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.通过对于水下机器人体系结构中的控制层进行实物仿真,而对于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、系统可靠性等等.仿真试验结果如图 8 所示.

经过几年的深入研究与应用,目前的仿真器能够很好的提供研究智能水下机器人的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,可以进行机器人集成系

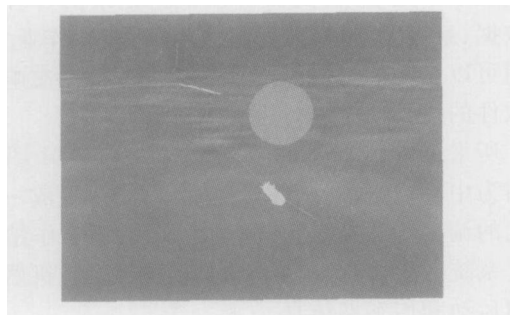


图8 避障仿真试验结果

Fig. 8 Obstacle avoidance simulation result

统的可靠性考核.

1.6 水下目标的探测与识别技术

智能水下机器人要完成所赋予的使命,就必须获取各种环境信息,特别是水下目标的信息,并由此做出作业决策.所以,水下目标的探测与识别对于自主水下作业来说是至关重要的.由于声学传感器在水中作用距离远,又有一定的分辨率,所以是目前水下目标探测的主要传感器.但是,声传感器受海洋环境、背景目标等影响,成像的清晰度不够,给目标探测和识别增加了难度.微光 TV 成像的图像清楚,但受海水能见度影响很大,总的来说可识别的距离太近,实际应用中难以满足要求.激光成像是近几年发展起来的新方法,比较适合水下机器人使用,其体积、重量和所需功耗都较小,成像质量远高于声学成像并类似于微光 TV,作用距离比 TV 远,同时可提供准确的距离信息.目前,美国的激光成像仪已达到工程要求,但受到国外禁运的限制,国内正在进行研究,短期内还难以达到应用水平.

基于声传感器水下目标自动识别技术可分为利用声回波信号进行目标识别和利用声图像进行目标识别 2 大类. 20 世纪 60 年代开始,美国、日本、法国、加拿大、英国等国家相继推出利用声回波信号进行目标识别的潜用声纳目标分类系统、海岸预警系统、信号分析专家系统等.这些系统利用回波信号的频谱、强度、包迹等特性,采用模糊规则、神经网络算法构成分类器.其分类的目标主要是水面舰船或潜艇.声成像技术的发展使基于声图像的目标识别成为水下目标识别的方法之一.该方法主要用于近距离区分水雷等小目标.其难点在于:首先,相对于光在空气中的传播,水中传播的声波要受到更严重的多途、混响及各种环境噪声的影响;其次,水声信道的时变和空变性,对在其中传播的声信息产生各种复杂的作用;另外,为保证获取图像的分辨率,成像声纳的中心频率都在几百千赫以上,但是海水介质对声波能量的吸收随其中心频率的增长以平方次增长,并伴有传播中的体积扩散,这就使高频声波在

海水中损失掉相当大的能量.由于这些原因,使得水声图像与普通光学图像相比,具有干扰大、分辨率低、像素信息少等特点.

到目前为止,还没有成熟的基于声图像的目标识别理论框架.目前普遍采用的方法是,根据特定水下目标声图像的特点,预处理方法借鉴光学图像的处理方法并进行一定程度的修改,分类识别算法多采用基于模板的投票法、神经网络分类技术和模板匹配技术.

深入研究了基于数学形态学的声纳图像处理技术,包括二值形态学、二值形态学的改进—受控形态学、灰度形态学.实验说明形态学滤波虽然在时间上较均值滤波和中值滤波要稍慢一些,但对图像中目标的能量保持效果还是略强的.对于对比度低且亮度较弱的水声图像来说,这是一个优势.从声视觉系统整体来考虑,不仅需要性能优良的预处理滤波算法,还要考虑其与后续的识别算法的整合性以及硬件实现的统一.

对水声图像来说,其中的目标一般呈点状或团块状,根据其大小用方形结构元素进行开变换就能达到很好的识别作用.单目标和相似多目标识别时,尤其是对具有类似特征的水声目标识别中,这种方法是非常有效的.而且可以很方便地选择不同大小的结构元素以适应大小各异的目标的识别.这种方法对噪声不敏感,而且很好地保留了目标,可以降低声视觉系统中对前置去噪的要求,并使整个系统的算法结构简化,如图 9 所示.

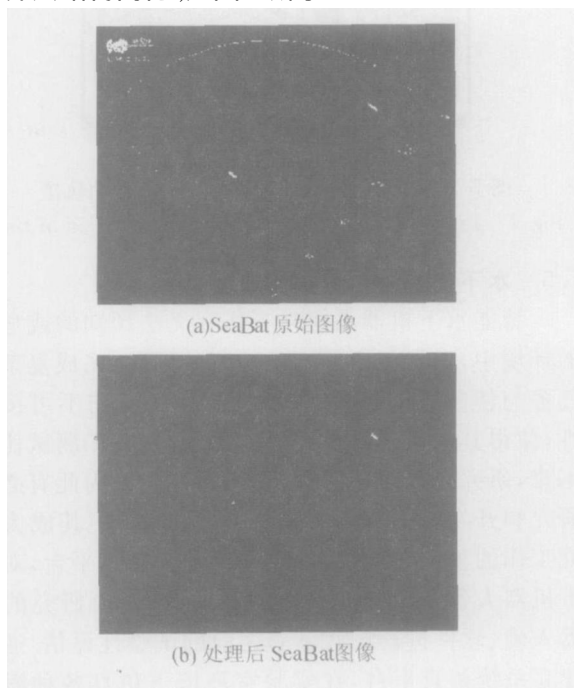


图9 SeaBat 图像目标识别

Fig. 9 Object recognition with SeaBat

综合来说,由于海洋环境复杂,获取水下目标信息的手段十分有限,声探测距离远,所以仍是目前的主要手段,而对于依靠声图像的目标识别仍然有难度.根据水声专家的预测,依靠声反射特性可能是解决识别的正确途径.另外激光成像具有微光成像的特点,距离又增加,是一种比较理想的手段,然而要满足对水下目标识别的要求,仍然有不少技术难关需攻克.

1.7 智能水下机器人可靠性技术

智能水下机器人作为一个将人工智能、自动控制、模式识别、信息融合与理解、系统集成等技术的集成体,同时考虑到工作环境恶劣等因素,其可靠性技术显得尤为关键.实现机器人工作状态的自主故障诊断和容错控制作为该智能体智能行为的重要体现,正日益受到研究者的重视并正式提到研究日程上来.

通常说来,实现水下机器人工作状态的自主诊断主要包括这样 3 个方面:对传感器状态的自主诊断;对执行器状态的自主诊断;对安全状态的自主诊断.一般地,对水下机器人进行故障检测有 2 种方式:基于硬件的故障监测和基于软件的故障监测.前者采用专门监控传感器监测硬件状态(如检测推力器转速).这种方法虽然直接可靠,但使得水下机器人的硬件设备变得复杂,需要额外的空间来安装这些硬件设备,增加了机器人的重量和生产成本.基于软件的故障监测通过位姿传感器推测水下机器人是否处于故障状态.这种间接方式可以通过比较运动状态估计值与测量值来实现,例如比较水下机器人动力学模型的输出与实际传感器的输出.

水下机器人故障诊断的方法有很多,由于水下机器人模型的不确定性,近年来对系统数学模型依赖不强的小波分析故障信号检测方法、神经网络、滑模状态观测器和模糊推理等故障诊断方法成为了研究的热点^[15].

目前关于系统容错控制的研究十分活跃.实现容错控制是提高动态系统可靠性的有效手段.近年来关于动态系统的容错控制研究在理论上已渐趋完善,在实际上已得到了应用.但对于智能水下机器人总的来说其研究还处于起步阶段.作为一门交叉性学科领域,容错控制与鲁棒控制、故障检测与诊断、自适应控制、智能控制等密切联系.容错控制系统的构成有 2 种途径:被动容错控制系统和主动容错控制系统.前者的设计出发点是减少系统对单个部件运行情况的依赖性,即使在出现故障又无校正作用的情况下,系统仍能工作.后者则首先检测并识别故障,然后对系统进行重构.由于智能水下机器人可利用的空间较小,通过采用冗余传感器的方法实现容错控制并不现实,往往都是通过不同功能传感器的数据信息处理和融合来提高传感器数据的可靠性,

而在执行器方面当前的智能水下机器人的容错控制也还仅限于对于推进器的冗余容错控制^[16].

2 应用前景

水下机器人在世界范围内的应用领域已经不断扩大,如海洋研究(科学考察等)、海洋开发和水下工程等.以美国为代表的军事大国非常重视水下机器人在未来战争中的应用,智能水下机器人将成为未来水下战争中争夺信息优势、实施精确打击与智能攻击、完成战场中特殊作战任务的重要手段之一.所以,该技术是许多国家十分重视的研究领域,目前正处于飞速发展的关键阶段.

2.1 海洋资源的研究和开发

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的要道,也是兵戎相见的战场.21 世纪人类将面临人口膨胀和生存空间有限的矛盾,陆地资源枯竭和社会生产需要增长的矛盾,以及生态环境恶化和人类发展的矛盾这三大挑战.占地球表面积 71 % 的海洋,是一个富饶而远未得到开发的宝库.人类要维持自身的生存、繁衍和发展,就必须充分利用海洋资源,这也是人类无可回避的必然抉择.对人均资源占有率不高的我国来说,海洋开发更具有特殊意义.

在海洋开发过程中,智能水下机器人将在海洋环境的探测与建模、海洋目标的水下探测与识别、定位与传输等方面的研究中发挥重要作用.

2.2 在未来无人战争中的作用

以美国为代表的西方发达国家越来越强调战争中的零伤亡,这使得无人武器系统在未来战争中的重要性迅速提高,并且其潜在的作战效能越来越明显.作为无人武器系统重要组成部分的智能水下机器人能够以水面舰船或潜艇为基地,在数十或数百里的水下空间自主完成环境探测、目标识别、情报收集和通讯,从而大大地扩展了水面舰船或潜艇的作战空间.目前各国重点研究的应用包括:水雷对抗、反潜战、情报收集、监视与侦察、目标指示和环境数据收集等.

3 结束语

随着科学技术的发展,国内外科技工作者的多年努力和勇敢探索,智能水下机器人技术已取得多项令人鼓舞的进展,使人们看到这一多学科相互融合的技术将有广泛的应用前景,因而受到各国特别是发达国家的高度重视并制定了各种计划.一方面组织各方面技术力量,对有关的关键技术进行攻关,另一方面,将已获得的研究成果尽快推出应用到各个领域,起到了现有设备无法起到的作用.但智能水下机器人总的技术水平仍处在研究、试验与开发阶段,要达到真正意义的实用,还有相当长的一段路要走.我国在智能水下机

器技术领域,基本上也处在这一水平上,但水下机器人所用的设备特别是各种专用的传感器设备与以美日为代表的发达国家还有差距。

参考文献:

- [1] 苏玉民, 黄 胜, 庞永杰, 等. 仿鱼尾潜器推进系统的水动力分析[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 54 - 59.
SU Yumin, HUANG Sheng, PANG Yongjie, et al. Hydrodynamic analysis of submersible propulsion system imitating tunar tail [J]. Ocean Engineering, 2002, 20(2): 54 - 59.
- [2] 成 巍, 苏玉民, 秦再白, 等. 一种仿生水下机器人的研究进展[J]. 船舶工程, 2004, 26(1): 5 - 8.
CHENG Wei, SU Yumin, QIN Zaibai, et al. Development of a bionic underwater vehicle[J]. Ship Engineering, 2004, 26(1): 5 - 8.
- [3] ALBUS J, MCCAIN H, LUMIA R. NASA/ NBS standard reference model for telerobot control system architecture (NAS-REM) [R]. National Bureau of Standards, NBS Technical Note 1235, 1987.
- [4] BROOKS R. A robust layered control system for a mobile robot [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, RA - 2 (1): 14-23.
- [5] 常文君, 由光鑫, 庞永杰. 基于混合体系结构的多水下机器人协调控制体系[J]. 中国海洋平台, 2002(3): 12 - 16.
CHANG Wenjun, YOU Guangxin, PANG Yongjie. Multiple autonomous underwater vehicles cooperative control system based on hydrib architecture[J]. China Offshore Platform 2002(3): 12 - 16.
- [6] 刘学敏. 水下机器人运动控制系统的信息融合技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
LIU Xuemin. The application of data fusion technology on motion control system of underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001.
- [7] 刘学敏, 徐玉如. 水下机器人运动的 S 面控制方法[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 81 - 84.
LIU Xuemin, XU Yuru. S control of automatic underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2001, 19(3): 81 - 84.
- [8] 刘建成, 于华男, 徐玉如. 水下机器人改进 S 面控制方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(1): 33 - 36.
LIU Jiancheng, YU Huanan, XU Yuru. Improved S plane control algorithm for underwater vehicles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 33 - 36.
- [9] 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[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(2): 170 - 174.
WANG Xingce, ZHANG Rubo, GU Guochang. Potential grid based global path planning for robots[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, 24(2): 170 - 174.
- [10] ROECKEL W M, RIVOIR R H. Simulation environments for the design and test of an intelligent controller for autonomous underwater vehicles [A]. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference [C]. Phoenix: USA, 1999.
- [11] DONALD P B. A virtual world for an autonomous un-

derwater vehicles [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1994.

- [12] 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[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2448 - 2450.
ZHAO Jiamin, XU Yuru, LEI Lei. A simulator for the test of intelligent path planning of AUV [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2448 - 2450.
- [13] 李 鹏. 水下机器人导航系统传感器的仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
LI Peng. The simulation of navigation system sensors of underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004.
- [14] 吴翠江. 水下机器人声视觉仿真系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
WU Cuijiang. Study on the simulation of the AUV's acoustical vision system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2004.
- [15] 王丽荣. 水下机器人控制系统故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
WANG Lirong. Research on fault diagnosis for AUV control system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [16] EDIN O, GEOFF R. Thruster fault diagnosis and accommodation for openframe underwater vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2004(12): 1575 - 1598.

作者简介:



徐玉如,男,1942年生,教授,中国工程院院士,哈尔滨工程大学国家重点学科“船舶与海洋结构物设计制造”的学科带头人、博士生导师。主持完成了多项具有开拓性的工程研究项目。在发展我国水下智能机器人技术方面做出了突出贡献。获国家级科技进步奖2项,省部级科技进步奖一等奖4项,二、三等奖6项,光华科技基金奖1项,发表学术论文40余篇。



庞永杰,男,1955年生,教授,博士生导师,海洋工程学会理事。主要从事潜水器及深海资源开发系统设计研究,参与了多项科研项目,在水下机器人总体设计和系统仿真等方面贡献突出,获国家级科技进步二等奖1项,部级科技进步一等奖2项,二、三等奖各1项,发表论文30余篇。



甘 永,男,1982年生,哈尔滨工程大学在读博士研究生。主要从事水下机器人基础运动控制、人工智能方向的研究。