

doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2011.03.001

水下机器人发展趋势

徐玉如^① 李彭超^②^①中国工程院院士, ^②硕士研究生, 哈尔滨工程大学水下智能机器人技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001**关键词** 水下机器人 智能水下机器人 智能体系 运动控制 通讯导航 探测识别 高效能源

随着人类海洋开发的步伐不断加快,水下机器人技术作为人类探索海洋最重要的手段得到了空前的重视和发展。作者对水下机器人进行了定义与分类,介绍了近年来国内外水下机器人的发展现状与发展趋势,重点针对智能水下机器人的主要关键技术及未来发展方向进行了分析。

地球的表面积为 5.1 亿 km²,而海洋的面积为 3.6 亿 km²。占地球表面积 71%的海洋是人类赖以生存和发展的四大战略空间——陆、海、空、天中继陆地之后的第二大空间,是能源、生物资源和金属资源的战略性开发基地,不但是目前最现实的,而且是最具发展潜力的空间。作为蓝色国土的海洋密切关系到人类的生存和发展,进入 21 世纪后,人类更加强烈的感受到陆地资源日趋紧张的压力,这是人类面临的最现实的问题。海洋即将成为人类可持续发展的重要基地,是人类未来的希望。水下机器人从 20 世纪后半叶诞生起,就伴随着人类认识海洋、开发海洋和保护海洋的进程不断发展。专为在普通潜水技术较难到达的区域和深度执行各种任务而生的水下机器人,将使海洋开发进入一个全新的时代,在人类争相向海洋进军的 21 世纪,水下机器人技术作为人类探索海洋最重要的手段必将得到空前的重视和发展^[1]。

1 海洋对人类的重要性

海洋作为蓝色国土,首先是一个沿海国家的“门户”,是其与远方联系的便捷途径,并且“门户”的安全是国家安全的重要组成部分,早在 2 500 多年前古希腊海洋学家希罗多德就提出过“谁控制了海洋,谁就控制了一切”。很久以来人们就依赖于海洋航道进行大量的物品贸易,现在整个世界大部分的货物运输都依赖于海上运输,海洋运输是整个经济正常运转必要的一环。更重要的是,现在很多国家的石油、矿石等最基本的生产资料大部分都依赖于海洋运输,海洋运输的安全和对海洋的控制力成为一个国家生存的基本保障。

近年来再次掀起海洋热的浪潮是因为陆上的资源

有限,很多资源已经开发殆尽,而海洋中蕴藏着丰富的能源、矿产资源、生物资源和金属资源等,人们急需开发这些资源以接替所剩不多的陆上资源来维持发展。更为重要的是,地球上半数以上面积的海洋是国际海域,这些区域内全部的资源属于全体人类,不属于任何国家。但目前的现状是只有少数国家有能力对这些资源进行初步开采,这些国家在其已探明的区域拥有优先开采权,相对于那些没有能力开采的国家这几乎就等于独享这部分资源。因此海洋已经成为国际战略竞争的焦点,争夺国际海洋资源是一项造福子孙后代的伟大事业。所以水下技术成为目前重点研究的高新技术之一,智能水下机器人作为高效率的水下工作平台在海洋开发与利用中起到至关重要的作用。

2 水下机器人的定义与分类

2.1 水下机器人的定义与概述

水下机器人也称作无人水下潜水器(unmanned underwater vehicles, UUV),它并不是一个人们通常想象的具有类人形状的机器,而是一种可以在水下代替人完成某种任务的装置。在外形上更像一艘微小型潜艇,水下机器人的自身形态是依据水下工作要求来设计的。生活在陆地上的人类经过自然进化,诸多的自身形态特点是为了满足陆地运动、感知和作业要求,所以大多数陆地机器人在外观上都有类人化趋势,这是符合仿生学原理的。水下环境是属于鱼类的“天下”,人类身体的形态特点与鱼类相比则完全处于劣势,所以水下运载体的仿生大多体现在对鱼类的仿生上。目前水下机器人大部分是框架式和类似于潜艇的回转细长体,随着仿生技

术的不断发展,仿鱼类形态甚至是运动方式的水下机器人将会不断发展。水下机器人工作在充满未知和挑战的海洋环境中,风、浪、流、深水压力等各种复杂的海洋环境对水下机器人的运动和控制干扰严重,使得水下机器人的通信和导航定位十分困难,这是与陆地机器人最大的不同,也是目前阻碍水下机器人发展的主要因素^[2]。

2.2 水下机器人的分类

水下潜水器根据是否载人分为载人潜水器和无人潜水器两类。载人潜水器由人工输入信号操控各种机动与动作,由潜水员和科学家通过观察窗直接观察外部环境,其优点是由人工亲自做出各种核心决策,便于处理各种复杂问题,但是人生命安全的危险性增大。由于载人需要足够的耐压空间、可靠的生命安全保障和生命维持系统,这将为潜水器带来体积庞大、系统复杂、造价高昂、工作环境受限等不利因素。无人水下潜水器就是人们常说的水下机器人,由于没有载人的限制,它更适合长时间、大范围和大深度的水下作业。无人潜水器按照与水面支持系统间联系方式的不同可以分为下面两类。

(1)有缆水下机器人,或者称作遥控水下机器人(remote operated vehicle,简称 ROV),ROV 需要由电缆从母船接受动力,并且 ROV 不是完全自主的,它需要人为的干预,人们通过电缆对 ROV 进行遥控操作,电缆对 ROV 像“脐带”对于胎儿一样至关重要,但是由于细长的电缆悬在海中成为 ROV 最脆弱的部分,大大限制了机器人的活动范围和工作效率。

(2)无缆水下机器人,常称作自治水下机器人或智能水下机器人(autonomous underwater vehicle,简称 AUV),AUV 自身拥有动力能源和智能控制系统,它能够依靠自身的智能控制系统进行决策与控制,完成人们赋予的工作使命。AUV 是新一代的水下机器人,由于其在经济和军事应用上的远大前景,许多国家已经把智能水下机器人的研发提上日程。

有缆水下机器人都是遥控式的,根据运动方式不同可分为拖曳式、(海底)移动式和浮游(自航)式三种。无缆水下机器人都是自治式的,它能够依靠本身的自主决策和控制能力高效率地完成预定任务,拥有广阔的应用前景,在一定程度上代表了目前水下机器人的发展趋势。

2.3 自治水下机器人

自治水下机器人,又称智能水下机器人,是将人工智能、探测识别、信息融合、智能控制、系统集成等多方面的技术集中应用于同一水下载体上,在没有人工实时

控制的情况下,自主决策、控制完成复杂海洋环境中的预定任务使命的机器人。俄罗斯科学家 B. C. 亚斯特列鲍夫等人所著的《水下机器人》中指出第 3 代智能水下机器人是一种具有高度人工智能的系统,其特点是具有高度的学习能力和自主能力,能够学习并自主适应外界环境变化。执行任务过程中不需要人工干预,设定任务使命给机器人后,由其自主决定行为方式和路径规划,军事领域中各种战术甚至战略任务都依靠其自主决策来完成。智能水下机器人能够高效率地执行各种战略战术任务,拥有广泛的应用空间,代表了水下机器人技术的发展方向^[3]。

3 国内外 AUV 的发展现状与趋势

3.1 国内外 AUV 的发展现状

智能水下机器人(AUV)是无人水下机器人(UUV)的一种。无人水下航行器技术无论在军事上、还是民用方面都已不是新事物,其研制始于 20 世纪 50 年代,早期民用方面主要用于水文调查、海上石油与天然气的开发等,军用方面主要用于打捞试验丢失的海底武器(如鱼雷),后来在水雷战中作为灭雷具得到了较大的发展。20 世纪 80 年代末,随着计算机技术、人工智能技术、微电子技术、小型导航设备、指挥与控制硬件、逻辑与软件技术的突飞猛进,自主式水下航行器得到了大力发展。由于 AUV 摆脱了系缆的牵绊,在水下作战和作业方面更加灵活,该技术日益受到发达国家军事海洋技术部门的重视。

在过去的十几年中,水下技术较发达的国家像美国、日本、俄罗斯、英国、法国、德国、加拿大、瑞典、意大利、挪威、冰岛、葡萄牙、丹麦、韩国、澳大利亚等建造了数百个智能水下机器人,虽然大部分为试验用,但随着技术的进步和需求的不断增强,用于海洋开发和军事作战的智能水下机器人不断问世。由于智能水下机器人具有在军事领域大大提升作战效率的优越性,各国都十分重视军事用途智能水下机器人的研发,著名的研究机构有:美国麻省理工学院 MIT Sea Grant's AUV 实验室、美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)智能水下运载器研究中心、美国伍慈侯海洋学院(Woods Hole Oceanographic Institute)、美国佛罗里达大西洋大学高级海洋系统实验室(Advanced Marine Systems Laboratory)、美国缅因州大学海洋系统工程实验室(Marine Systems Underwater Systems Institute)、美国夏威夷大学自动化系统实验室(Autonomous Systems Labo-

ratory)、日本东京大学机器人应用实验室(Underwater Robotics Application Laboratory (URA))、英国海事技术中心(Marine Technology Center)等。

美国海军研究生院 AUV ARIES(图 1,见封二),主要用于研究智能控制、规划与导航、目标探测与识别等技术。图 2(见封二)是美国麻省理工学院的水下机器人 Odyssey II,它长 2.15 m,直径为 0.59 m,用于两个特殊的科学使命:①在海冰下标图,以理解北冰洋下的海冰机制;②检测中部大洋山脊处的火山喷发。美国的 ABE(图 3,见封二)最大潜深 6 000 m,最大速度 2 节(编者注:1 节=1 海里/时=1.852 km/h),巡航速度 1 节,考察距离 ≥ 30 km,考察时间 ≥ 50 h,能够在没有支持母船的情况下,较长时间地执行海底科学考察任务,它是对载人潜水器和无人遥控潜水器的补充,以构成科学的深海考察综合体系,为载人潜水器提供考察目的地的详细信息。日本研制的 R2D4 水下机器人(图 4,见封二)长 4.4 m,宽 1.08 m,高 0.81 m,重 1 506 kg,最大潜深 4 000 m,主要用于深海及热带海区矿藏的探索。能自主地收集数据,可用于探测喷涌热水的海底火山、沉船、海底矿产资源和生物等。REMUS(remote environmental monitoring units,远距离环境监测装置)是美国 Hydroid 公司的系列水下机器人(图 5,见封二)。REMUS6000 工作深度为 25~6 000 m,是一个高度模块化的系统,代表了自主式水下探测器的最高水平。

中国智能水下机器人技术的研究开始于 20 世纪 80 年代中期,主要研究机构包括中国科学院沈阳自动化研究所和哈尔滨工程大学等。中国科学院沈阳自动化研究所蒋新松院士领导设计了“海人一号”遥控式水下机器人试验样机。之后“863”计划的自动化领域开展了潜深 1 000 m 的“探索者号”智能水下机器人的论证与研究,做出了非常有意义的探索性研究。哈尔滨工程大学的智水系列智能水下机器人已经突破智能决策与控制等多个技术难关,各项技术标准都在向工程可应用级别靠拢。图 6(见封二)的哈尔滨工程大学“智水-4”智能水下机器人在真实海洋环境下实现了自主识别水下目标和绘制目标图、自主规划安全航行路线和模拟自主清除目标等多项功能。图 7(见封二)是哈尔滨工程大学的综合探测智能水下机器人。

目前通过各科研机构和大专院校的同期研制工作,智能水下机器人已经服役并正在形成系列,特别是中国科学院沈阳自动化研究所与俄罗斯合作的 6 000 m 潜深的 CR-01(图 8,见封二)和 CR-02 系列预编程控制的水下机器人,已经完成了太平洋深海的考察工作,达到了实用水平。

由于在工业设计、制造工艺、综合控制、目标探测、导航地位和通讯等领域中国同水下技术发达的国家相比还有一定差距,致使我们的水下机器人在实际应用中还有较大限制。相关领域从国外购买或租赁的水下机器人不但价格高,配套服务难,而且很多产品并不是专门开发的,并不适合中国海域的使用。所以随着海洋开发和军事用途需求的不断增长,开发更具有实用价值的智能水下机器人势在必行。

3.2 智能水下机器人的发展趋势

3.2.1 整体设计的标准化和模块化

为了提升智能水下机器人的性能、使用的方便性和通用性,降低研制风险,节约研制费用,缩短研制周期,保障批量生产,智能水下机器人整体设计的标准化与模块化是未来的发展方向。在智能水下机器人研发过程中依据有关机械、电气、软件的标准接口与数据格式的要求,分模块进行总体布局和结构优化的设计和建造。智能水下机器人采用标准化和模块化设计,使其各个系统都有章可依、有法可循,每个系统都能够结合各协作系统的特性进行专门设计,不但可以加强各个系统的融合程度,提升机器人的整体性能,而且通过模块化的组合还能轻松实现任务的扩展和可重构。

3.2.2 高度智能化

由于智能水下机器人工作环境的复杂性和未知性,需要不断改进和完善现有的智能体系结构,提升对未来的预测能力,加强系统的自主学习能力,使智能系统更具有前瞻性。目前针对如何提升水下机器人的智能水平,已经对智能体系结构、环境感知与任务规划等领域展开一系列的研究。新一代的智能水下机器人将采用多种探测与识别方式相结合的模式来提升环境感知和目标识别能力,以更加智能的信息处理方式进行运动控制与规划决策。它的智能系统拥有更高的学习能力,能够与外界环境产生交互作用,最大限度的适应外界环境,帮助其高效完成越来越倚重于它的各种任务,届时智能水下机器人将成为名副其实的海洋智能机器人。

3.2.3 高效率、高精度的导航定位

虽然传统导航方式随着仪器精度和算法优化,精度能够提高,但由于其基本原理决定的误差积累仍然无法消除,所以在任务过程中需要适时修正以保证精度。全球定位系统虽然能够提供精确的坐标数据,但会暴露目标,并容易遭到数据封锁,不十分适合智能水下机器人的使用。所以需要开发适于水下应用的非传统导航方式,例如:地形轮廓跟随导航、海底地形匹配导航、重力磁力匹配导航和其他地球物理学导航技术。其中海底

地形匹配导航在拥有完善的并能及时更新的电子海图的情况下,是非常理想的高效率、高精度水下导航方式,美国海军已经在其潜艇和潜器的导航中积极应用。未来水下导航将结合传统方式和非传统方式,发展可靠性高、集成度高并具有综合补偿和校正功能的综合智能导航系统。

3.2.4 高效率与高密度能源

为了满足日益增长的民用与军方的任务需求,智能水下机器人对续航力的要求也越来越高,在优化机器人各系统能耗的前提下,仍需要提升机器人所携带的能源总量。目前所使用的电池无论体积和重量都占智能水下机器人体积和重量的很大部分,能量密度较低,严重限制了各方面性能的提升。所以,急需开发高效率、高密度能源,在整个动力能源系统保持合理的体积和质量的情况下,使水下机器人能够达到设计速度和满足多自由度机动的任务要求。

3.2.5 多个体协作

随着智能水下机器人应用的增多,除了单一智能水下机器人执行任务外,会需要多个智能水下机器人协同作业,共同完成更加复杂的任务。智能水下机器人通过大范围的水下通讯网络,完成数据融合和群体行为控制,实现多机器人磋商、协同决策和管理,进行群体协同作业。多机器人协作技术在军事上和海洋科学研究方面潜在的用途很大,美国在其《无人水下机器人总体规划》(*UUV Master Plan*)中规划由多艘智能水下机器人协同作战,执行对潜艇的侦查、追踪与猎杀,美国已经着手研究多个智能水下机器人协同控制技术,其多个相关研究院所联合提出多水下机器人协作海洋数据采集网络的概念,并进行了大量研究,为实现多机器人协同作业打基础。

4 AUV 涉及到的重点技术及未来需要突破的难点

虽然近些年,水下机器人技术得到空前发展,但仍有大量的关键技术与难点需要突破。以目前的技术现状来看,智能水下机器人离满足海洋开发和军事装备需求还有一定的距离,这其中的关键技术有:

4.1 智能水下机器人总体布局和载体结构

没有一种全功能的机器人能完成所有的任务,所以需要依据水下机器人任务和工作需求,结合使用条件进行总体布局设计,对水下机器人总体结构、流体性能、动力系统、控制与通讯方式进行优化,提高有限空间的利

用效率。水下机器人工作在复杂的海洋环境中,其总体结构在满足压力、水密、负载和速度需求的前提下要实现低阻力、高效率的空间运动。另外在有限的空间中,需要多种传感器的配合,进行目标识别、环境探测和自主航行等任务。整个大系统整合了多种分系统,需要完善的系统集成设计和电磁兼容设计,才能确保控制与通讯信息流的通畅。

4.1.1 智能水下机器人设计的标准化和模块化

为了提高智能水下机器人的性能和质量、使用的方便性和通用性,降低研制风险,节约研制费用,缩短研制周期,提高与现有邻近系统的协作能力、以及保障批量生产能力,智能水下机器人的标准化是智能水下机器人的研制与生产的迫切需求。因为模块化是标准化的高级形式,标准化的目的是要实现生产的模块化和各功能部件的模块化组装以实现使用中的功能扩展和任务可重构。在智能水下机器人标准化的进程中需要提出有关机械、电气、软件标准接口和数据格式的概念,在设计和建造过程中分模块进行总体布局和结构优化设计。

4.1.2 小型化、轻型化和仿生技术的应用

鉴于智能水下机器人需要能在较大范围的海域航行,从流体动力学的角度宜采用类似于鱼雷的细长的回转体,并尽可能采用轻型复合材料为机器人提供较大的正浮力,以提高机器人的续航力和负载能力。这些材料需要有质量轻、强度高、耐腐蚀性好、抗生物附着能力强等特点,并要有一定的抑制噪声的能力以降低背景噪声。采用小型化技术的水下机器人具有个体小、机动灵活、隐身性好、布施方便等特点,非常适合进行智能化水下作业。

各个行业都十分注重从大自然的智慧中汲取灵感寻找突破,仿生学在诸多领域已经有长足的发展。由于鱼类摆尾式机动不但效率高、操纵灵活,而且尾迹小、几乎不产生噪声,是水下推进和操控的最佳方式。目前国内外的学者正进行积极的研究,试图将摆动式推进应用到之后的智能水下机器人中。该研究仍处于理论研究阶段,要实现实际意义上的多自由度闭环控制的推进,满足各种工作需求,把潜在优势转变成可利用技术还有很多工作要做。

4.2 智能体系结构

智能水下机器人最大的特点就是能够独立自主地进行作业,所以如何提高水下机器人的自主能力(即智能水平),以便在复杂的海洋环境中完成不同的任务,是目前的研究热点。从 20 世纪 80 年代开始,人们针对如何提升水下机器人的智能水平,对智能体系结构、环境

感知与任务规划等展开一系列的研究。其中不断改进和完善现有的智能体系结构,提升对未来趋势的预测能力,加强系统的自主学习能力,使智能系统更具有前瞻性,是提高智能系统自主性和适应性的关键。

4.2.1 人工智能技术

智能水下机器人的自主性是通过人工智能技术实现的,人工智能技术和集成控制技术构成相当于人类大脑的智能体系结构,软件体系则模拟人类大脑进行工作,负责整个系统的总体集成和系统调度,直接决定着机器人的智能水平。其中为人工智能推演所广泛遵守的原则是根据时间和功能来划分整个体系结构的构造模块和层次,最具代表性的则是美国国家标准局(NBS)和美国航天航空局(NASA)提出的NASREM结构。该系统体系结构中各个模块的功能和相互间的关系定义的非常清晰,这有利于整个系统的构成和各模块内算法的装填和更换效率,但这种划分方式会导致系统的反应较慢。针对这种划分方式反应较慢的特点,目前有研究机构模拟人类大脑物理结构的基于连接主义的反射性,提出依据行为来划分模块和层次。

在目前的人工智能研究中主要采用基于符号的推理和人工神经网络技术,其中基于符号的推理对智能系统来说是最基本的需求。但是,目前基于符号的推理仍存在较多的局限性,比如系统较脆弱、获取知识困难、学习能力较低和实时性较差等。人工神经网络相对有较强的学习、联想和自适应能力,它更擅长于处理不精确和不完全的信息,并具有较好的容错性,能够较好的弥补基于符号的逻辑推理的不足,所以两项技术的结合更具有发展潜力。

4.2.2 智能规划与决策

不像海洋平台一样仅需针对某一海域进行设计,智能水下机器人的工作任务决定了它必须能够适应广泛的水下环境,复杂海洋环境中充满着各种未知因素,风、浪、流、深水压力等干扰时刻挑战着水下机器人的智能规划与决策能力。以海流为例,大洋中海流的大小与方向不但与时间有密切的关系,而且随着地点不同也会有较大变化,这对智能水下机器人的路径规划和避碰规划是一个时刻紧随的考验。针对海洋环境的复杂性,智能水下机器人需要拥有良好的学习机制,才能尽快的适应海洋环境,拥有理想的避碰规划和路径优化的能力^[4]。

4.3 智能水下机器人的运动控制

智能水下机器人的运动控制包括对其自身运动形态、各执行机构和传感器的综合控制,水下机器人的六自由度空间运动具有明显的非线性和交叉耦合性,需要

一个完善的集成运动控制系统来保障运动与定位的精度,此系统需要集成信息融合、故障诊断、容错控制策略等技术。虽然目前不断改进新型控制算法对水下机器人进行任务与航迹规划,但由于在复杂环境中水下机器人运动的时变性很难建立精确的运动模型,那么人工神经网络技术和模糊逻辑推理控制技术的作用更加重要。模糊逻辑推理控制器设计简单、稳定性好,但在实际应用中由于模糊变量众多,参数调整复杂,需要消耗大量时间,所以需要和其他控制器配合使用,比如PID控制器、人工神经网络控制器。其中人工神经网络控制方式的优点是,在充分考虑水下机器人运动的非线性和交叉耦合性的前提下,能够识别跟踪并学习自身和外界环境的变化,但是如果外界环境干扰变化的频率和幅度与其自身运动相接近时,它的学习能力将表现出明显的滞后,控制滞后则会导致控制振荡的出现,对水下机器人的安全和任务执行是极为不利的^[5]。

各种控制方式相互结合使用的目的是提高控制器的控制精度与收敛速度,如何在保证水下机器人运动控制稳定的情况下提升控制系统的自适应性,提高智能系统在实际应用中的可行性是目前工作的重点。

4.4 智能水下机器人的通讯导航定位

智能水下机器人要完成任务首先需要明确任务所需到达的目的地,到达目的地的路径以及整个过程中自己所处的位置。前两个问题属于导航范围,后一个问题需要定位技术的支持,而整个过程都要依赖先进的通讯技术。

4.4.1 智能水下机器人的通讯

智能水下机器人通过水声通讯和光电通讯方式来传输各类控制指令及各类传感器、声纳、摄像机等探测设备的反馈信息。两种方式各有优缺点,目前主要依赖于水声通讯,但是声波在水中的传播速度很低(远远低于光速),在执行一定距离的任务时,会产生较大的时间延迟,不能保证控制信息作用的即时性和全时性。由于水下声波能量衰减较大,所以声波的传输距离直接受制于载波频率和发射功率,目前水声通讯的距离仅限10 km左右,这大大限制了水下机器人的作业空间。目前世界各国正积极开发水下激光通讯,激光信号可以通过飞机和卫星转发以实现大范围的通讯,其中海水介质对蓝绿激光的吸收率最小,目前美国已经实现了由空中对水下100 m左右深度的潜艇进行通讯。但是目前的蓝绿激光器体积较大,能耗也较大,效率低,离应用到智能水下机器人上还有一定距离。

4.4.2 智能水下机器人的导航定位

智能水下机器人能否到达预定区域完成预定任务,水下导航技术起到至关重要的作用,是目前水下机器人领域发展急需突破的瓶颈问题之一。目前空中导航已经拥有了较成熟的技术,而由于水下环境的复杂性,以及信息传输方式和传输距离的受限,使得水下导航比空中导航要更有难度^[6]。

水下导航技术从发展时间和工作原理上可分为传统导航技术和非传统导航技术,其中传统导航技术包括航位推算导航、惯性导航、多普勒声纳导航和组合式导航。最初的水下机器人主要依赖于航位推算进行导航,之后则逐渐加入惯性导航系统、多普勒速度仪和卡尔曼滤波器,这种导航方式虽然机构简单,实现容易,但它存在致命的缺陷,经过长时间的连续航行后会产生非常明显的方位误差,所以整个过程中隔一段时间就需要重新确认方位,修正后继续进行推算。目前智能水下机器人大多采用多种方式组合导航,主要利用惯性导航、多普勒声纳导航和利用声纳影像的视觉导航等多种数据融合进行导航,定位技术主要是水下声波跟踪定位结合全球定位系统的外部定位技术。组合式导航技术将多种传感器的信息充分融合后作为基本的导航信息,不但提升了导航的精度,而且还提高了整个系统的可靠性,即便有某种传感器误差较大或是不能工作,水下机器人依然能够工作。其中将多种数据进行提取、过滤和融合的方法仍在不断的改进中。

传统导航方式的原理决定了其误差积累的缺陷,为了保持精度,需要对系统数据进行不间断的更新、修正,更新数据可通过全球定位系统或非传统方法获得。通过全球定位系统不但会占用任务时间而且会使行动的隐蔽性大大降低,通过非传统导航方式则可以克服这些缺陷。非传统导航方式是当前研究的热门方向,主要有海底地形匹配导航和重力磁力匹配导航等,其中海底地形匹配导航,在拥有完善的、并能够及时更新的电子海图的情况下,是目前非常理想的高效率、高精度导航方式,美国海军已经将其广泛应用于潜艇的导航^[7]。

未来水下导航将结合传统方式和非传统方式,发展可靠性好、集成度高并具有综合补偿和校正功能的综合智能导航系统。

4.5 水下目标的探测与识别

智能水下机器人要实现“智能”就不能“闭塞视听”,它需要时刻感知外界环境的信息,尤其是水下目标的信息,基于这些信息才能做出智能决策,所以水下目标的探测与识别就相当于智能水下机器人的“视、听、触觉”,是其与所处环境“交流”的基本方式。

目前水下目标探测与识别技术可以通过声学传感器、微光 TV 成像和激光成像等方式。首先微光 TV 成像采集的信息图像清晰度和分辨率都较好,但是其成像质量受海水能见度的影响很大,综合来看其可接受的识别距离太短,适用范围大大受限。激光成像技术经过近几年的发展,激光成像仪的体积、重量和功耗都大大降低,达到智能水下机器人可利用的级别,值得指出的是,其成像质量远远高于声学传感器成像质量,能够达到微光 TV 成像的水平,但其工作距离远远大于微光 TV 成像,并且能够提供准确的目标距离、坐标等信息,是较理想的水下目标探测与识别的手段。此项技术目前在美国已有应用,中国仍处于研究阶段,现在还没有达到工程应用要求的激光成像仪可供智能水下机器人使用。

声学传感器成像技术能够实现一定分辨率的成像,并且在水下的作用距离较远,在目前水下探测与识别领域中应用广泛。根据信息类型不同可分为两类:基于声回波信号探测识别和利用声纳图像探测识别。基于声回波信号的探测技术原理类似于空中利用雷达反射波进行目标识别,从 20 世纪 60 年代开始,广泛应用于海岸预警系统和潜用声纳目标分类系统,通过回波信号的强度、频谱、包迹等特征对预设类别的目标,例如水面舰船和潜艇进行探测识别。

随着水声技术的发展,已经能够区分近距离的小型目标,基于声纳图像的探测识别技术成为目前水下探测识别技术的中流砥柱,但它目前仍然有诸多的局限性。声波在水中传播比无线电波在空气中传播效果要差很多,在各种环境噪声和背景目标的影响下,成像质量不高,加大了水下目标的探测与识别的难度。为了使获得的图像拥有适用的分辨率,需要采用较高频率的声纳,目前所使用的成像声纳的中心频率已达到几百千赫兹,但这又引入另一个限制因素。声波在水中传播是沿体积扩散的,并且海水介质对声波能量的吸收随着声波中心频率的增长而呈现二次方的增长,海水将会吸收掉高频声波相当大的能量,导致远距离传输的声波会有较大的衰减,使得声纳成像的分辨率低和像素信息少。目前还没有形成成熟的声纳图像目标识别理论,声纳图像中的目标一般呈点状和块状,进行目标识别时,依据目标信息图像的大小用开变换方法进行预处理,即能得到可利用的识别信息。

由于海洋环境的特殊性和复杂性,对水下目标探测与识别的技术应用有很大的限制,以至于可应用的手段也非常有限。从技术上来说,声探测技术容易实现,并且探测距离较远,到目前为止仍是主要的水下目标探测手段,而基于声纳图像的目标探测与识别可靠性和精确

性仍然不高。激光成像不但分辨率高、信息丰富,而且作用距离远,是非常理想的水下目标探测与识别手段,激光成像水下目标的探测与识别技术是中国目前努力研究的方向。

4.6 智能水下机器人的动力能源

随着水下机器人各方面技术的发展,其执行的任务也更加多样,这就需要水下机器人拥有良好的机动性和操控性,有时还需要执行高抗流作业和长时间连续作业等任务,对水下机器人续航力的需求逐渐增强。早期的水下机器人大多由铅酸电池提供电力能源,少数采用银锌电池提供能源,但银锌电池造价昂贵,不适合广泛使用。随着镍锰电池技术的发展,目前水下机器人使用较多的是镍锰电池,虽然续航力已经从最初的几个小时提升到了几十小时甚至是上百小时,但仍离智能水下机器人的需求有一定差距;而且镍锰电池体积和质量过大,造成机器人质量增大和结构设计复杂,给机器人的设计和使用带来很多不便。目前急需开发高效率、高密度能源,在整个动力能源系统保持合理的体积和质量的情况下,使水下机器人能够达到设计速度和满足多自由度机动要求,其中优化机器人的推进系统,使其在保证预定速度和机动要求的情况下效率最高、能耗最小,也对提升续航力有可观的贡献。

5 智能水下机器人军民两用的远大前景

随着人类开发海洋的步伐不断加快,水下机器人行业也逐渐火热起来,各种用途的水下机器人的身影活跃在海洋开发的最前线。自从20世纪50年代末美国华盛顿大学建造了主要用于水文调查的第一艘无缆水下机器人——“SPURV”之后,人们便对无缆水下机器人产生浓厚的兴趣,但由于各个配套系统技术上的限制,致使智能水下机器人技术的发展多年徘徊不前。随着材料、电子、计算机等新技术的飞速发展及海洋研究、开发和军事领域的迫切需求,智能水下机器人再次引起海洋开发领域和各国军方的关注。20世纪90年代后,智能水下机器人各项技术开始逐步走向成熟,由于智能水下机器人在海洋研究和海洋开发中具有远大的应用前景,在未来的水下信息获取、深水资源开发、精确打击和“非对称情报对抗战”中也会有广泛的应用,因此智能水下机器人技术对世界各国来说都是一个重要的、值得积极研发的领域。

智能水下机器人作为一个复杂的水下工作平台,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。智能水下机器人在军事上可用于反潜战、水雷战、情报侦察、巡逻监视、后勤支援、地形测绘和水下施工等领域。①反潜战:在反潜战中,智能水下机器人可以工作在危险的最前线,它装备有先进的探测仪器和一定威力的攻击武器,可以探测、跟踪并攻击敌方潜艇。智能水下机器人可以做水下侦察通信网络的节点,也可以作为猎杀敌方潜艇的诱饵,让己方的潜艇等大型攻击武器处在后方以增加隐蔽性。②水雷战:智能水下机器人自身可以装载一到多枚水雷,自主航行到危险海域,由于智能水下机器人的目标较小,可以更隐蔽的实现鱼雷的布施,并且其上的声纳等探测装置也可协助进行近距离、高精度的鱼雷、雷场的探测与监视。③情报侦察:长航时的智能水下机器人,可在高危险的战区或敏感海域进行情报侦察工作,能够长时间较隐蔽的实现情报侦察和数据采集与传输任务。④巡逻监视:可以长时间在港口及附近主要航线执行巡逻任务,包括侦查、扫雷、船只检查和港口维护等任务。它可以对敌方逼近的舰艇造成很大的威胁,必要时还可以执行主动攻击、施布鱼雷和港口封锁等任务。战期还可为两栖突击队侦察水雷等障碍,开辟水下进攻路线。⑤后勤支援:智能水下机器人可以布施通信导航节点,构建侦查、通信、导航网络。⑥相关应用:智能水下机器人还可用于相关水下领域,如:海洋测绘、水下施工、物资运输和日常训练等。智能水下机器人可用于靶场试验、鱼雷鉴定等,把机器人伪装成鱼雷充当靶雷进行日常训练和实验鱼雷性能,以智能水下机器人作为声靶进行潜艇训练。

6 结束语

目前水下机器人在经济和军事领域的应用中已经崭露头角,是水下观察和水下作业方面最具潜力的水下开发工具。水下机器人的高智能化已是大势所趋,高智能式水下机器人这一多学科相互融合的技术在未来将有广阔的应用前景,受到各国特别是发达国家的高度重视,并已制定了正式计划。美国已经将智能水下机器人编队的打造提上了海军建设的日程。综合目前各方面的技术来看,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,离真正意义上大规模工程应用还有一定距离。

(2011年1月4日收到)

[1] 李晔,常文田,孙玉山,苏玉民. 自治水下机器人的研发现状与展望[J]. 机器人技术与应用, 2007, (1): 25-31.

- [2] 金声. 访哈尔滨工程大学徐玉如院士[J]. 舰船知识, 2009, (4): 16.
- [3] 亚斯特列鲍夫 B C, 等. 水下机器人[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [4] 徐玉如, 庞永杰, 甘永, 孙玉山. 智能水下机器人技术展望[J]. 智能系统学报, 2006, 1(1): 9-16.
- [5] 梁霄, 徐玉如, 李晔, 等. 基于目标规划的水下机器人模糊神经网络控制[J]. 中国造船, 2007, 48(3): 123-127.
- [6] 彭学伦. 水下机器人的研究现状与发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2004, (4): 43-47.
- [7] 马伟锋, 胡震. AUV 的研究现状与发展趋势[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 10-13.

Developing Tendency of Unmanned Underwater Vehicles

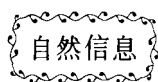
XU Yu-ru^①, LI Peng-chao^②

①CAE Member, ②Master Candidate, National Key Laboratory of Science and Technology on Unmanned Underwater Vehicles, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract With the fast pace of ocean exploitation, unmanned underwater vehicles, as the most important means of ocean exploration for human, gained unprecedented attention and development. In this article, the definition and classification of the unmanned underwater vehicles are given. The current status and developing tendency of unmanned underwater vehicles in recent years are introduced, and the key technologies and future development direction of autonomous underwater vehicle are analyzed.

Key words unmanned underwater vehicle (UUV), autonomous underwater vehicle (AUV), autonomous system, motion control, communication and navigation, hunt and identify, efficient energy

(编辑: 沈美芳)



安慰剂也许能让你感觉好些

面对一位遭受病痛折磨的病人, 或面对一种无药可治的慢性疾病, 医生有时会开出糖丸或维生素的处方。虽然这些“药”没含有效的成份, 但病人常常会感觉好些, 这种叫做“安慰剂效应”。而大多数科学家会说, 只有在病人不知药物是无效的前提下, 药才起作用。但是, 这是一项新的诊疗试验宣称, 即使病人了解真相, 在安慰剂的作用下, 他们的感觉也会好一些。

“这是一项奇妙的、有创造性的重要研究。”在德国 Munich 师范大学搞药物的补偿和替换研究的 Klaus Linde 说。在 Boston 的 Harvard 药学院工作的 Ted Kaptchuk 说, 他搞这项试验的部分原因是由于医生们对安慰剂问题心存芥蒂。Kaptchuk 等人在 2008 年发表的研究报告中披露, 在 1 200 名实习医师和风湿病医生中, 差不多有半数被调查者承认开过安慰剂处方。开的这些药里有些是没什么作用的药丸, 但更普遍的只是普通的安慰剂, 维他命、镇痛药、抗生素或镇静剂, 以致外科医生们相信除了提供一些安慰之外, 于疾病并没有特别的作用。当然很少会向病人公开这些情况。

研究报告披露, 许多人把这样的一种处理方法说成是: 给了一种虽非对症, 但也许有用的药, 或者闪烁其词。Kaptchuk 说: “这一类温柔的欺骗被普遍认为是道德的。按照新的研究, 这样

的做法也无必要”。

研究组招募来了 80 位患有肠过敏综合症(IBS)的病人来完成一项新奇的进行心脑治疗的 IBS 研究, 他们患有习惯性腹泻、不适和无规律的肠蠕动等。每个人要与一位情感真诚的医生或护士交谈 15 min。他们被告知可以得到安慰剂, 或者什么药也没有。他们还同样被告知安慰剂并不含有效成份, 但同样可以产生很强的效果, 因为身体对它们的反应犹如“巴甫洛夫的狗”对铃声的反应一样。安慰剂——蓝色和栗色的胶丸, 瓶上贴着“安慰剂”的标签。毫无疑问, 病人知道它们不起任何作用。Kaptchuk 说: “他们被这样告知了许多次, 已把这些话当成耳边风。”

三周之后, 这些服了安慰剂的病人在 IBS 常规药物试验的健康状况分级指标中得分显著地高(这种分级全部是以调查问答为基础, 因为 IBS 病不可能用比较客观的方法来测定)。例如, 根据 IBS 全球改善标准, 病人的健康改善可以分为 1 到 7 级, 而使用安慰剂的病人平均可达 5 级, 而其他组的病人只有 3.9 级。“这样的差别是很大的”, Kaptchuk 说, “事实上, 这种成绩与那些使用对症的真药来治疗 IBS 的效果相比, 症状得到的改善并不逊色。”

Kaptchuk 说, 他的小组并非只仅仅提倡广泛使用安慰剂, 小组还试图对不同的疾病和大量的病人来重复他们的发现成果。

Linde 说, 这项研究的一个潜在的弱点是对安慰剂效果的认定太主观, 服用安慰剂的病人可能为了取悦研究人员而

夸大其疗效。

“真是那么回事,”英国 Hull 大学的一位心理学家, 研究报告的合作者 Irving Kirsch 说, “在这一类研究中, 要想消除这样的偏见是不可能的。”

“公开使用安慰剂来做试验是相当少见的,”意大利 Turin 大学的 Fabrizio Benedetti 说, “45 年前曾在患神经过敏症的病人中开展过一项这样的研究, 但是当时没有可控支架。”仅有的另一例是近期的研究工作, 安慰剂公开地用于有缺失性的功能亢进失调(ADHD)的病人。这些研究表明, 倘若同时给服安慰剂, 儿童可以减半服用他们常规的 ADHD 药物的剂量而不产生任何负面结果。

“我们意识到硬性区分心智和身体两者的不同是没什么用的,”ADHD 研究者之一——North Carolina 大学的 James Bodfish 说, “我想身体上的不适可以借助于心理学的帮助, 反之亦然。”“病人和他们的父母也许没有强调要用安慰剂, 但是他们确实对此持开明的态度。”他的合作者——位于 North Carolina, Asheville 的儿童医院的 Adrian Sandler 如是说。

Bodfish 还看到 IBS 研究中的另一项潜在不足之处, 不管怎么说, 上面提到过的方法也许只能吸引那些比较开朗, 对安慰剂的效果有所期待的病人, 他们也许对安慰剂的效果有溢美之词。“有趣的是, 从另一角度来看, 这项不足之处也是一种力量。”他补充说, “在个性化的药品目录里, 只针对那些希望通过安慰剂得到改善的病人, 有选择性地开安慰剂处方不失是一种明智之举。”

[林凤生 译自 ScienceNOW, 2010-10-22]



图 1 美国海军研究生院的 ARIES



图 2 麻省理工学院的 Odyssey-II



图 3 美国的 ABE



图 4 日本的 R2D4 水下机器人

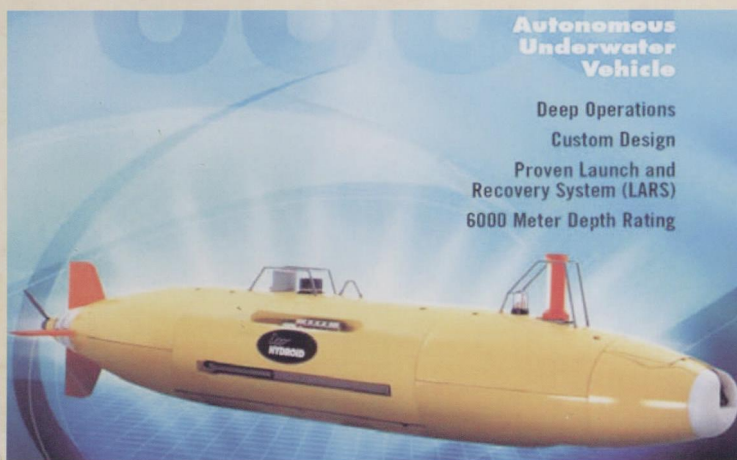


图 5 美国 Hydroid 公司的 REMUS 6000 水下机器人

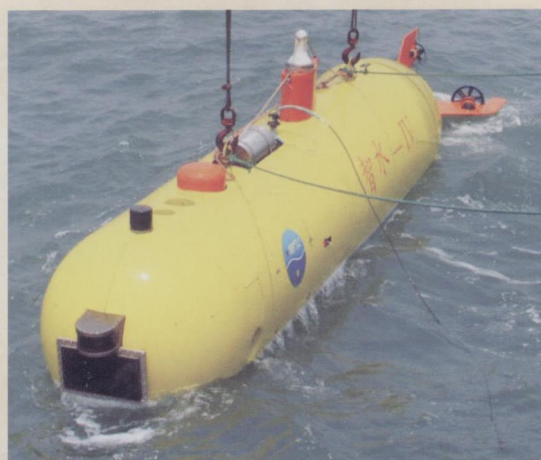


图 6 哈尔滨工程大学“智水-4”水下机器人



图 7 哈尔滨工程大学综合探测智能水下机器人



图 8 沈阳自动化所的 CR01 预编程水下机器人

参见“水下机器人发展趋势”一文