

# 自治水下机器人的研发 现状与展望

□ 李 晔 常文田 孙玉山 苏玉民

哈尔滨工程大学船舶工程学院

[摘 要] 本文介绍了自治水下机器人的研究意义和分类定义。对水下机器人的研究现状和国内外有代表性的自治水下机器人型号进行了综述。讨论分析了水下机器人研究的关键技术,包括智能水平,能源问题,导航系统,传感器系统,水下通讯技术和多水下机器人协作研究,并指出了水下机器人的未来发展方向。

[关键词] 智能水下机器人,现状,趋势

[Abstract] The research significance of autonomous underwater vehicle was introduced. The present research status and representative autonomous underwater vehicles were overviewed. The key technologies were discussed, including intelligent level, energy problem, navigation system, sensor system, underwater communication and multi-AUVs collaboration research. The development trends of autonomous underwater vehicle were pointed out.

[Keywords] autonomous underwater vehicle, current status, trend

## 0. 引言

21世纪是海洋的世纪,占全球71%面积的海洋将是下一个世纪,也是未来人类赖以生存的资源。海洋对于人类的发展和社会的进步将起到至关重要的作用。在民用上,海洋蕴藏着丰富的矿物资源、海洋生物资源和能源,是人类社会可持续发展的重要财富。因此,对于海洋的开发和争夺成了很多发达国家的战略重点,而且愈演愈烈。在各种海洋技术中,作为用在一般潜水技术不可能到达的深度或区

域进行综合考察和研究并能完成多种作业使命的水下机器人使海洋开发进入了新时代<sup>[1,2,3,4]</sup>。

从20世纪70年代起,世界许多国家开始研制了多种不同结构和功能的水下机器人。现在已有几百种水下机器人作为商品出售,并在海洋开发中发挥着重要作用。

当前常见的水下机器人包括遥控机器人(ROV-Remote Operating Vehicle)和自治水下机器人(AUV-Autonomous Underwater Vehicle)。遥控

\* 国家863机器人技术主题资助项目(2002AA420090)

[作者简介] 李晔(1978-),男,博士研究生,研究领域为智能水下机器人设计与运动控制

机器人不是完全自主的,而是需要人为的干预。这一点极大地限制了机器人的活动区域和工作效率<sup>[5]</sup>。自治水下机器人是新一代的水下机器人,由于其商业上的重要意义和技术上面临的众多挑战,自治水下机器人技术的研究受到越来越多科学家和技术人员的重视。自治水下机器人的商业应用包括海岸和远海结构物检查和修理、铺设电缆、海洋考察等。

## 1. 自治水下机器人的研究现状

### 1.1 智能水下机器人在国外的发展现状

在自治水下机器人技术研究方面,美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利、俄罗斯、日本等国处于领先地位。其中最著名的研究院所有:美国麻省理工学院的Sea Grant's AUV 实验室,美国海军研究生院(Naval Postgraduate School)的智能水下运载器研究中心,美国佛罗里达大西洋大学的高级海洋系统实验室(Advanced Marine Systems Laboratory),美国夏威夷大学的自动化系统实验室(Autonomous Systems Laboratory),美国伍兹侯海洋学院(Woods Hole Oceanographic Institute),美国缅因州大学的海洋系统工程实验室(Marine Systems Underwater Systems Institute),英国的海事技术中心(Marine Technology Center),日本东京大学的机器人应用实验室(Underwater Robotics Application Laboratory (URA))等。

国外有代表性的水下机器人:

(1)美国海军研究生院(Naval Postgraduate School,简称NPS)的海军官员和科学家们正在进行自行设计和建造AUV的研究。NPS的科学家们先后开发了三种类型的AUV:NPS AUV I,凤凰号<sup>[6]</sup>(Phoenix)AUV和白羊座号(ARIES)AUV。

如图1所示的Phoenix有2.44m长及中性浮力,排水量为175.5kg,整体尺寸和形状好像一只小海

豚。续航力为2~3小时,最大速度约2节。

NPS AUV用于控制系统技术、人工智能、科学可视化和系统集成中的基础研究和论文工作。具体的项目任务包括使命规划的研究、导航、避碰、实时作业控制、再规划、目标识别、平台的动力运动控制和后使命数据分析等。在军事上,可用于水雷战,如浅水雷区标图与灭雷(引爆)。

(2)美国麻省理工学院 Sea Grant's AUV 实



图1 NPS的Phoenix号水下机器人

验室开发的水下机器人Odyssey (1994)的长为2.15m,直径为0.59m,排水量为140kg。Odyssey主要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。



图2 MIT的Odyssey II号水下机器人

2)检测中部大洋山脊处的火山喷发。

其后,又陆续开发了四部使用更简单、鲁棒性更强的Odyssey b。

(3)美国夏威夷大学的“ODIN”(Omni-Directional Intelligent Navigator)

ODIN<sup>[7,8]</sup>是一个球形机器人，这在水下机器人中是不多见的。它有八个推力器，可以以六个自由度运动。ODIN采用Motorola 68030中央处理器，在陆上以图形工作站监视水下机器人的姿态和位置，他们之间通过RS232c串行传输数据，主要用途为海底地貌观测。

(4)日本东京大学在自治水下机器人方面的研究工

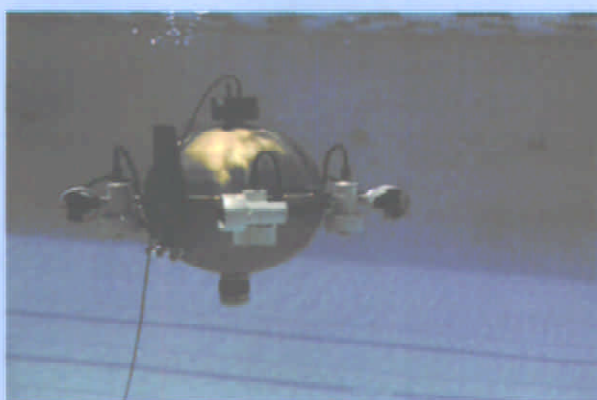


图3 夏威夷大学的ODIN号水下机器人

作主要是以东京大学生产技术研究所的浦环教授所领导的实验室开展的<sup>[9]</sup>。他们开发了Twin-Burger1&2、PTEROA150&250、Tri-Dog1、Tantan等多个型号的观察型智能水下机器人，在水下机器人虚拟世界的仿真方面也做了许多工作。



图4 东京大学的Twin-Burger2号水下机器人

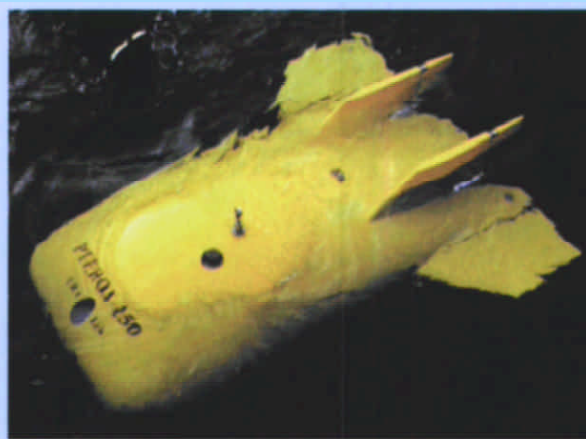


图5 东京大学的PTEROA25号水下机器人



图6 加拿大的RAY号水下机器人



图7 加拿大的Sunfish号水下机器人



(5)加拿大成功开发了若干型号的AUV,其中著名的两种分别称为RAY<sup>[10]</sup>和Sunfish。RAY成功地演示了它可以通过在耐压仓内向艏和艉移动重物来实现的纵倾控制。Sunfish是一个为特殊的科学目的研制的具有搜索功能的AUV。

(6)英国从1988年以来也开始研究水下机器人,以确定军用可能性和工程上需要克服的技术难点。1995年开发的“AUTOSUB-1”AUV<sup>[11,12]</sup>是一部用于海洋科学(海流、温度等)研究的水下机器人,也具有相当的军事应用前景。到1999年,该机器人已经在英国沿海完成了179项工程和科学使命。“AUTOSUB-1”的长度为6.8m,直径为0.9m,重量为1.7t,下潜深度为500m,续航时间为50h,航程为263km。



图8 英国的AUTOSUB-1号水下机器人

## 1.2 自治水下机器人在国内的发展现状

我国在水下机器人的研究上,主要研究院所有中科院沈阳自动化研究所和哈尔滨工程大学等。中科院沈阳自动化研究所研制开发了工作水深1000m的“探索者”号无缆水下机器人,1994年完成海试。中科院沈阳自动化研究所通过与俄罗斯合作,共同开发了观察型、预编程控制的“CR-01”<sup>[13]</sup>无缆水下机器人,工作水深为6000m。该机器人完成了太平洋深海的考察工作,达到了实用水平。为适应国际海底

区域资源调查,特别是深海海底锰结核调查的需要,研制成功新型深水机器人“CR02”<sup>[14,15]</sup>。其主尺度0.8m×4.5m(直径×长度),空气中重量1500kg,最大速度2.3节,最大续航能力25h,可进行海底地形地貌勘测,海底浅地层剖面测量及海洋要



图9 “CR-01”号水下机器人



图10 “CR-01”和“CR-02”号水下机器人

素测量。

## 2. 现阶段研究的关键技术

### 2.1 如何提高机器人智能水平的研究

自治水下机器人不同于其他水下机器人的最大特点在于其具有自主作业能力,因此研究如何提高智能水下机器人的智能水平一直是科研人员研究的热点<sup>[18,19]</sup>。80年代以来,科研人员在如何赋予水下机器人一定水平的智能,以使其具有能够完成指定任务的能力方面,开展了广泛的研究。研究的内容包括智能体系结构设计、任务规划、机器人感知和环境评测等方面。虽然取得了一定的成果,但是许多问题仍然有待解决。

## 2.2 可用于水下机器人的能源的研究

随着水下机器人技术的发展,水下机器人的续航力也逐步提高,水下机器人的续航力从几个小时、几十个小时甚至几天不等。在大多数早期水下机器人系统中,能源主要由铅酸电池提供。少数水下机器人由银锌电池提供能源,但是银锌电池的造价高昂,限制了它的广泛应用。近年来,在镍锰电池研究方面取得的进展为水下机器人提供了新的能源。当前许多水下机器人都使用了镍锰电池作为能源。同时科研人员也对其他能源应用到水下机器人上进行了研究。其中,美国AUSI(Autonomous Underwater Systems Institute)的水下机器人使用太阳能作为能源<sup>[20]</sup>。

## 2.3 水下机器人导航问题的研究

早期的水下机器人系统依赖于航位推算法进行导航。当前许多水下机器人采用了惯性导航系统和全球定位系统相结合的导航方式。在导航方面,当前的研究热点是研究如何利用水下机器人工作的环境特征进行导航<sup>[21]</sup>。这种导航方式利用诸如海底地貌、重力变化等特征进行匹配导航。

## 2.4 水下机器人传感器系统的研究

早期的有关水下机器人传感器系统的研究主要是研究如何将现有的传感器与水下环境的特殊性相结合。近年来,科研人员结合水下机器人的特殊要求开发了专用于水下机器人的传感器,同时,研究人员也利用多水下机器人协作来克服传感器系统所带来的不确定性。

## 2.5 水下通讯技术的研究

自治水下机器人的控制指令、载体的状态反馈及图像信息,目前还是以水声通讯来实现,由于声音在水中的传播速度远远低于光速,因此产生很大传输时延,难以对水下机器人实现实时控制,而且传输的距离又受到载波频率和发射功率的限制。目前通讯

距离仅10千米左右,使水下机器人作业空间受到限制<sup>[22,23]</sup>。激光通讯是正在开发的一种通讯手段,蓝绿激光在水中的吸收最小。美国利用蓝绿激光实现了空中对水下100米深处的潜艇的通讯。利用飞机、卫星进行空中转发是实现水中大范围通讯的一种有效手段,但目前蓝绿激光器的体积过大,效率低,能源消耗大,尚不能用于自治水下机器人。

## 2.6 多水下机器人协作技术研究

多水下机器人协作的概念在80年代首次被提出来。研究人员在这方面开展了一部分的工作,但最终没有完成。从那时起,多水下机器人协作方面的研究工作被暂时搁置。直到最近几年,有关多水下机器人协作完成任务的研究才重新引起人们的注意。当前多水下机器人研究主要集中在多机器人协作进行水下目标的探测和处置。

## 3. 水下机器人的未来发展方向

纵观现代AUV技术的发展,可以看出AUV技术有以下几个发展方向:

### 3.1 向远程发展

十年前美国National Sea Grant Office of NOAA 和Naval Surface Weapons Center 就委托卡内基梅隆大学、佛罗里达大西洋大学、沛瑞公司、威斯汀豪斯公司共同进行可行性研究。上述单位提供的研究报告认为,基于当时的通讯、导航、控制、感知、人工智能、体系结构、环境建模等技术基础,研制航程在500海里以上的远程AUV是完全可行的。法国IFRMER的海洋机器人研究所、法国工业自动化研究所(INRIA)也有类似的远程AUV计划。

### 3.2 向深海发展

6000米以内水深的海洋面积占海洋总面积的97%,因此许多国家把发展6000米水深技术作为一个目标。法国、美国、俄罗斯等国都先后研制了6000米级的AUV,向更大的深度12000米进军,也提

上了日程。

### 3.3 向高可靠性发展

自治水下机器人技术经过多年的研究,各项技术正在逐步走向成熟,自治水下机器人的研究已经从实验室研究阶段逐步走向商业应用阶段。因此,研究如何提高水下机器人的可靠性的问题被提上了日程,并得到了广大研究人员的关注。

### 3.4 向多水下机器人协作完成任务发展

多AUV技术在军事上和海洋科学研究方面潜在的用途很大,也是当前的一个发展方向。加拿大的ISE公司,曾利用DOLPHIN潜水器研究过3个AUV和8个AUV的协同控制技术,美国新罕布尔大学也研究过两个AUV的协同控制技术,并在湖中进行侦察演示。美国麻省理工学院Sea Grant's AUV实验室<sup>[24,25]</sup>、日本东京大学<sup>[26]</sup>、美国佛罗里达大西洋大学的高级海洋系统实验室(Advanced Marine Systems Laboratory)、美国伍兹霍尔海洋学院(Woods Hole Oceanographic Institute)等研究院所联合提出了多水下机器人协作海洋数据采集网络的概念,并进行了大量的研究工作。


## 4. 结论

随着计算机技术的进步与水下机器人智能水平的提高,自治水下机器人的优势将进一步突现出来。国外在此方面的投入越来越大,已经取得了许多令人鼓舞的成果,并且不断有新领域的拓展。国内的智能水下机器人研究起步较晚,目前仍处于科研研究阶段。本文介绍了自治水下机器人的现状与技术的发展方向,希望自治水下机器人的发展起到一定促进作用。

## 参考文献


- [1] L.B. Gary. The evolutionary development of the military autonomous underwater vehicle. in Proc. Fifth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, vol. Chicago, IL, 2000(5) 3239-3243,.
- [2] P. Borot, J.L. Michel and H. LeRoux. Operational utilization development of the unmanned untethered submersible Systems, in Proc. Third International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 1983(1). Chicago, IL: 4-12.
- [3] B. Thomas. Potential application of autonomous underwater vehicles. in Proc. Third International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, ,1983(1). Chicago, IL:223-229.
- [4] X.S. Jiang, X.S. Feng Xi-sheng. Research and development of underwater vehicle in China. in Proc. China International Workshop on Intelligent Robot. Beijing, 1991,8:25-28.
- [5] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- [6] V. Kanakakis, K.P. Valavanis and N. C. Tsourvelis. Fuzzy-logic based navigation of underwater vehicles. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2004(40):45 - 88.
- [7] A. Hanai, H.T. Choi, S.K. Choi, J. Yuh. Experimental study on fine motion control of underwater robots. Advanced Robotics, 2003(18):963 - 978.
- [8] Gianluca, Antonelli. Underwater robots: motion and force control of vehicle-manipulator systems. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2003(2):55 - 134.
- [9] Tamaki Ura. Development of autonomous underwater vehicles in Japan. Advanced Robotics, 2002, 16(1):3-15
- [10] <http://www.ensc.sfu.ca/research/url/auv/ray.html>.
- [11] <http://www.mbari.org/seminars/1998/griffiths.htm>.
- [12] G. Griffiths. Ocean science applications for autonomous underwater vehicles-the work plan for autosub-1 for 1997-2000 and Beyond. Unmanned Underwater Vehicle Showcase, 1997, 9:24-25.



- [13] 李一平, 封锡盛. "CR—01" 6000m 自治水下机器人在太平洋锰结核调查中的应用. 高技术通讯, 2001, 11(1): 85-87.
- [14] 陈洪海, 李一平. 滑模模糊控制应用于自治水下机器人的实验研究. 控制与决策, 2002, 17(1): 788-790.
- [15] 李一平, 燕奎臣. "CR—02" 自治水下机器人在定点调查中的应用. 机器人, 2003, 25, (4): 359-362.
- [16] 庞永杰, 彭良, 顾国昌, 徐玉如. 智能潜器控制系统的实航验证. 海洋工程, 1998, 16(1): 88-94.
- [17] 刘建成, 万磊, 戴捷, 庞永杰. 水下机器人推力器容错控制技术研究. 机器人, 2003, 25( 2): 163-166.
- [18] 李晔. 多水下机器人实时避碰规划. 哈尔滨工程大硕士学位论文, 2004.
- [19] 于华南. 开架是水下机器人辨识与控制技术研究. 哈尔滨工程大博士学位论文, 2003.
- [20] D.R. Blidberg, J.C. Jalbert, M.D. Ageev. A solar powered autonomous underwater vehicle system. International Advanced Robotics Program, 1998, 2: 17-19.
- [21] J. Catipovic. Performance limitation in under water acoustic telemetry. IEEE J. Ocean Eng, 1990 (15): 205-216.
- [22] O. Hinton, G. Howe, A. Adams. An adaptive high bit rate sub-sea communication system. in Proc. The European Conference on Underwater Acoustic, Brussels, Belgium: 75-79.
- [23] B.H. Robison. The coevolution of undersea vehicles and deep-sea research. MTS Journal, 2003 (33): 122-131.
- [24] D.K. Atwood, J.J. Leonard, J.G. Bellingham, B.A. Moran. An acoustic navigation system for multiple vehicles. in Proc. International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, New Hampshire, 1995: 202-208.
- [25] Bellingham, G. James. New Oceanographic Uses of Autonomous Underwater Vehicles. Marine Technology Society Journal, 1997, 31(3): 34-37
- [26] Yoji Kuroda, Tamaki Ura. Vehicle control architecture for operating multiple vehicles. in Proc. AUV94. Tokyo, 1994, 7: 323-329. 

## 德国开发出帮助中风患者恢复行走的机器人

德国科学家日前开发出一种新型康复机器人, 能帮助中风患者锻炼下肢, 早日恢复行走。这种机器人名为“触觉行走者”, 由柏林自由大学和柏林慈善医院等机构的研究人员共同开发。它主要由两块人脚大小的机械板组成, 机械板与电脑相连。如果将中风患者的两脚固定在两块机械板上, 它们就可以带动患者的下肢进行平地行走以及上台阶等模拟训练。对恢复较快的病人还能提供模拟蹬自行车和滑雪的训练。

据统计, 德国每年大约有 20 万名中风患者, 其中 70% 的患者行走困难。研究人员说, 这种康复机器人能像康复治疗师一样帮助中风患者锻炼腿部肌肉, 使患者早日站起来行走。 

## 日本机器人在印度洋海底发现熔岩平原

日本研究人员最近使用海洋探测机器人在印度洋海底发现了世界最大的熔岩平原。中央海岭是板块诞生并向两侧扩张的地方, 研究人员于 2006 年 12 月探测了位于毛里求斯岛东约 800 公里的印度洋中央海岭附近海底。探测使用了东京大学开发的“r2D4”海洋探测机器人, 依靠海底对机器人发出的声波的反射分析海底地形, 并采集了岩石材料。这种机器人可自行躲避障碍, 并拍摄高精度图像。

机器人经过 3 次潜航作业, 探测到水深约 2700 米的海岭中心相当于山谷的部分被熔岩填满, 形成了平坦的地势。这块海底平原沿着南北走向的印度洋中央海岭分布, 长约 26 公里、宽约 2.7 公里。研究小组还发现了因海岭扩张而形成的裂痕, 他们推测从数万年前开始, 粘稠度较低的岩浆大量从海岭的裂痕中喷涌而出, 最终形成了巨大的海底熔岩平原。

科学家认为, 这一发现对研究中央海岭附近的火山活动具有重要意义。 