

文章编号: 1002-0446(2005)01-0001-05

基于 Agent 面向群体合作的 AUV 体系结构*

刘海波, 顾国昌, 沈晶

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 分析了 AUV 体系结构的研究现状及尚未解决的主动性、社会性等问题, 提出了一种基于 Agent 面向群体合作的 AUV 体系结构(ATA AUV)。ATA AUV 具有主动性、自治性、反应性、社会性等良好特性, 适合于复杂海洋环境下 AUV 群体合作应用领域。提出了 4 条 AUV 体系结构功能评价准则, 对 ATA AUV 及已有的典型的 AUV 体系结构进行了对比评价分析, 给出了 ATA AUV 仿真实验结果, 证明了 ATA AUV 的可行性和有效性。

关键词: Agent; BDI; AUV 体系结构; 功能评价准则

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Agent-based and Team-oriented Architecture for AUV

LIU Hai-bo, GU Guo-chang, SHEN Jing

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The state-of-the-art of AUV (autonomous underwater vehicle) architectures and some unsolved problems such as proactiveness and sociability of AUV are discussed firstly. Then, an agent-based and team-oriented architecture for AUV (ATA AUV) is presented. With many good properties such as proactiveness, autonomy, reactivity, sociability, and so on, ATA AUV is suitable for AUV team cooperation in the complex undersea environment. Four functional evaluation criterions for AUV architectures are given for comparing ATA AUV with the existing classical AUV architectures. At last, a simulation experiment on ATA AUV is demonstrated to show the feasibility and validity of ATA AUV.

Keywords: agent; BDI; AUV architecture; functional evaluation criterion

1 引言 (Introduction)

AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 体系结构指 AUV 中智能、行为、信息、控制的时空分布模式。体系结构是 AUV 本体的物理框架, 是 AUV 智能的逻辑载体, 是 AUV 组织、协调、规划、执行、学习、控制等各功能得以实现的基础和相互关联作用的纽带, 选择和确定合适的体系结构是 AUV 研究和开发中最基础的并且非常关键的一个环节。AUV 的作业环境是未知的、非结构化的、动态的、不确定性的、通信困难的、复杂的水下环境, 因而对 AUV 体系结构的性能较地面移动、空间探测、工业装配、医疗服务和娱乐表演等类机器人的体系结构而言有更高的要求。尤其近年来协作机器人学的快速发展^[1], 水下多机器人的研究已成为热点^[2], 深入研究面向群体合作的 AUV 体系结构是适时的而且必要的。

本文在系统地总结和分析目前 AUV 体系结构研

究成果的基础上, 提出了一种基于 Agent 面向群体合作的 AUV 体系结构——ATA AUV (Agent-based and Team-oriented Architecture for AUV), ATA AUV 具有主动性、自治性、反应性、社会性等良好特性, 适合于复杂海洋环境下 AUV 群体合作应用领域。随后, 提出了 4 条 AUV 体系结构功能评价准则, 对 ATA AUV 及已有的典型的 AUV 体系结构进行了对比评价分析。最后, 给出了 ATA AUV 仿真实验, 其结果证明了 ATA AUV 的可行性和有效性。

2 AUV 体系结构现状分析 (State of the art of AUV architecture)

近年来, 随着社会学、组织学、行为学、生物学、心理学、进化计算、智能体等理论和思想的引入, 智能机器人体系结构的研究成果层出不穷^[3], AUV 的体系结构自然也随之不断发展, 文献[4]系统地总结

* 收稿日期: 2004-06-04

了22个典型的体系结构并对各自的结构特征及功能特性进行了分析比较。AUV体系结构中,最具代表意义的是三层结构。纯粹的慎思型结构缺少对陌生环境的反应能力,单一的反应型结构缺乏必要的理性和学习能力。20世纪90年代初,三个不同的研究小组几乎同时独立地提出了极其相似的解决方案——三层结构,三层结构由反馈控制层、慎思规划层和连接二者的序列层构成^[5]。三层结构是慎思型和反应型相融合的混合结构,它既吸取了慎思型结构中高层规划的智能性,又保持了反应型结构中低层反应的灵活性。机器人内部状态是传感信息融合的结果,是对外界环境的反映。三层结构中,序列层维护着状态信息,反映的是环境的过去,控制层直接处理传感信息,面对的是环境的现在,慎思层经过规划推理,预测的是环境的将来,从而保证了机器人在时间维上对环境的准确把握。最初的三层结构的不足之处是忽视了传感信息融合、学习和环境建模(空间维)。其后实现的机器人多采用类似的混合结构,都是基于三层结构进行的改进、扩充或变种。以往的AUV体系结构研究侧重于自治性和反应性,而忽视了AUV的主动性和社会性。AUV群体在复杂的海洋环境中执行任务,没有主动性和社会性将无法完成合作作业任务。1999年,Rooney等根据社会智能假说提出了

社会机器人体系结构,其特色之处在于基于BDI(Belief-Desire-Intention)模型的慎思层和基于Agent通信语言Teanga的社会层,BDI赋予了机器人心智状态,Teanga赋予了机器人社会交互能力^[6],但愿望这一重要心智状态并未得以实现,因而该结构缺少主动性。社会机器人结构是面向地面移动机器人设计的(以Nomad Scout II Robot为平台),因而未考虑复杂海洋环境下通信困难、未知环境自适应、水下不确定性传感信息融合以及群体异构等问题。文献[7]将Agent概念引入AUV,但仅仅是用Agent作为AUV的代名词,其OOCAA结构本质上还是三层结构,本文重点研究的是AUV自治性的设计和实现问题。

3 ATA AUV体系结构(Architecture of ATA AUV)

ATA AUV由社会层、慎思层、反应层和物理层构成(如图1),前3层中均包含计算和数据两类组件。物理层包含执行机构(运动机构、作业机构)、传感器(声纳、视觉系统、GPS、深度计等)、通信器(水声通信设备、以太网接口)及其相应的控制板卡等硬件设备,其中,通信器提供的水声通信设备用于AUV群体合作通信,以太网接口用于开发调试、程序下装、任务下达及数据回收。

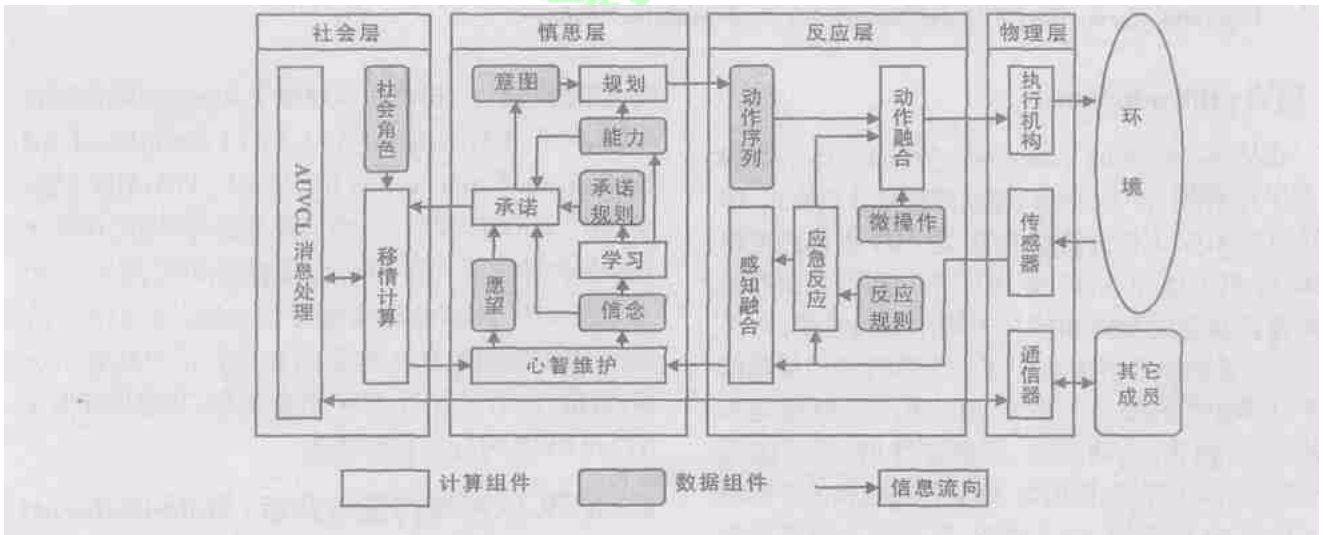


图1 ATA AUV

Fig.1 Agent-based team-oriented architecture for AUV

反应层包含应急反应、感知融合、动作融合3个计算组件及动作序列、微操作和反应规则3个数据组件。来自物理层的传感器信号同时送交感知融合

与应急反应组件,应急反应组件依据反应规则产生应急反应动作(如:避碰、急停、紧急上浮等),感知融合将多路不确定性传感信息及应急反应计算结果模

糊融合后生成事件触发慎思层的心智维护组件,来自慎思层的规划结果(即动作序列)及来自本层的应急响应动作,经由动作融合组件融合后生成可直接控制物理层设备的微操作序列,微操作组件管理 AUV 所能执行的动作名及其相对应的微操作序列,微操作是执行机构的最小指令单位。

慎思层基于 BDI 模型建造,由心智维护、学习、承诺、规划 4 个计算组件和信念、愿望、意图、承诺规则、能力 5 个数据组件构成。来自反应层的事件及来自社会层的消息共同维护 AUV 的信念和愿望,信念包含环境、自身及群体中其它成员的状态信息,愿望包含 AUV 希望达到的目标(任务目标),能力组件管理三元组(Action, Condition, Result)集合,其中 Action、Condition 和 Result 分别为 AUV 所能执行的动作名、执行条件和执行结果,学习组件依据信念调整承诺规则和自身能力以自适应环境及其它成员状态的变化,信念、愿望、能力和承诺规则共同激发和约束承诺组件生成意图,规划组件依据能力自主生成可实现意图的动作序列,凭借自身能力无法完成任务时,则需请求与群体其它成员合作。

社会层由消息处理器、移情计算和社会角色组件构成。消息处理器基于 AUVCL(AUV Communication Language,一种根据水声通信特点改装的 KQML)完成消息的封装和解析。社会角色组件管理 AUV 群体中各 AUV 的角色及其能力,这为实现异构 AUV 提供了体系结构上的支持。移情计算(Empathic Computing,简称 EC)是本文作者提出的一个新概念,是用于解决在水下通信障碍情况下 AUV 群体维持合作的计算策略,关于 EC 的详细工作另文阐述。

4 ATA AUV 功能评价 (Functional evaluation of ATA AUV)

以往的研究中,提出了不少对机器人体系结构性能的评价准则,如鲁棒性、可扩展性、实时性等,但一直缺少对机器人体系结构功能的评价。本文受 Agent 概念的启发,提出了以主动性(Proactiveness)、自治性(Autonomy)、反应性(Reactivity)和社会性(Sociability)作为 AUV 体系结构功能的评价准则,该准则适用于所有面向群体合作的智能机器人体系结构。

主动性准则评价机器人的主动计算能力,即不需要任何外界指令和刺激,仅在心智的驱动下即能持续产生面向目标的智能行为。主动性体系结构中需要具备心智状态及其动态激发和约束机制。ATA AUV 在慎思层提供了对实现主动性的支持。

自治性准则评价机器人的自主计算能力,即不需要外界干预能自行控制其自身状态和行为,凭借自身的规划推理能力或社会交互能力能独立或合作完成任务。自治性体系结构中需要具备规划推理组件,进行群体合作时,还需要社会交互机制。ATA AUV 在慎思层和社会层提供了对实现自治性的支持。

反应性准则评价机器人对外界环境及群体其它成员状态改变的自适应能力,它包括 2 层含义:①对环境中的紧急情况能做出应急反应;②慎思时能考虑到环境及其它成员状态的动态变化。反应性体系结构中需要具备反应、学习组件。ATA AUV 对实现反应性的支持分布在反应层和慎思层。

社会性准则评价机器人的群体合作能力,它包括 3 个方面:①机器人对其它成员的合作请求;②机器人对其它成员合作请求的承诺;③群体合作中必要的协调(显式的或隐式的)。社会性体系结构中需要具备承诺机制、协调机制、多机器人通信机制(语言、协议、通信设备或接口)。ATA AUV 在慎思层、社会层和物理层提供了对实现社会性的支持。

表 1 对几种典型的体系结构进行了功能评价。对比结果显示,以往的绝大部分体系结构在功能上都缺少对机器人实现主动性和社会性支持,而本文提出的 ATA AUV 则全部满足这 4 条评价准则。

5 ATA AUV 仿真实验 (Simulation experiment of ATA AUV)

本文采用 AUSI(Autonomous Undersea Systems Institute, USA)提供的群体 AUV 三维水下仿真环境 CADCON(Cooperative AUV Development Concept)^[21]分别对基于 ATA AUV(以下称“1 号编队”)和基于 OOCAA(以下称“2 号编队”)的两组 AUV 穿越未知雷区进行了仿真对比。

CADCON 仿真系统体系结构如图 2 所示。CADCON 环境服务器维护一个水下三维环境,并负责完成环境中 AUV 的动力学计算。AUVSim 客户端用于模拟 AUV,每个 AUVSim 客户端对应一个 AUV,可以对 AUV 的角色、能力、导航、通信、推进功率、能量和传感器等参数进行配置,通过 Socket 连接到服务器将 AUV 加入到 CADCON 环境中。Visual 客户端为用户提供实时的三维仿真场景,便于用户从各种角度观测 AUV 在水下的运动情况。ASMAC(Autonomous Systems Monitoring and Control)客户端用于 AUV 群体行为监控。



图2 CADCON仿真系统结构

Fig. 2 Architecture of CADCON simulation system

表1 几种典型体系结构的功能评价比较

Table 1 Functional evaluation and comparison of some typical architectures

体系结构	主动性	自治性	反应性	社会性
NASREM ^[8]	×	✓	✓	×
Subsumption ^[9]	×	✓	✓	×
SSS ^[10]	×	✓	✓	×
Social robot ^[6]	×	✓	✓	✓
OOCAA ^[7]	×	✓	✓	×
ATA-AUV	✓	✓	✓	✓

如图3(为清晰起见,图中的AUV和锚雷大小较原比例放大了30倍),实验中,每个编队由5个同构AUV成三维雁翅状排列编成,编队航道前方长500m×宽100m×深100m的水域中随机布设若干锚雷,锚雷数量和分布情况对AUV编队而言均未知,设AUV探测范围为正前方开角90°、半径150m的锥状

空间,锚雷危险半径为90m。AUV编队的任务是以尽可能小的代价(触雷损失、耗时、耗能)穿越雷区。分别对1号和2号编队以相同的避雷策略执行相同任务进行仿真,并对两组编队穿越雷区的代价进行统计对比。图4给出了两组编队的航迹俯视图,表2给出了代价对比结果。

从仿真结果看,两组编队均能探测到未知雷区并在穿越过程中自主规避,从而在无触雷损失情况下安全穿越雷区,充分体现了AUV的反应性和自治性,但1号编队航迹更平滑,耗时和耗能分别比2号编队节约43.6%和8.6%(这在争取战斗时间、保持续航能力上是有重要意义的)。1号编队中的AUV能在信念(对环境、编队中其它成员和自身状态的感知)和愿望(以尽可能小的代价穿越雷区)的驱动下,主动产生群体合作意图,并在社会交互能力的支持下交换信念、共享规划结果,AUV个体做出的航迹规划是编队整体探测范围内的全局规划,而2号编队中的AUV做出的仅是个体局部规划,因而1号编队的航迹优于2号编队。从图4还注意到,在越过雷区后,1号编队中的AUV#0和AUV#4交换了编队位置,这样,有效缩短了编队重组时间。主动性和社会性的发挥,使得AUV能借鉴群体中其它成员的经验教训,降低探测和穿越雷区的局限性和盲目性,从而有效降低代价。实验结果表明,ATA-AUV是可行的、有效的,它为实现具有主动性、自治性、反应性和社会性的AUV在体系结构层面上提供了良好的支持。

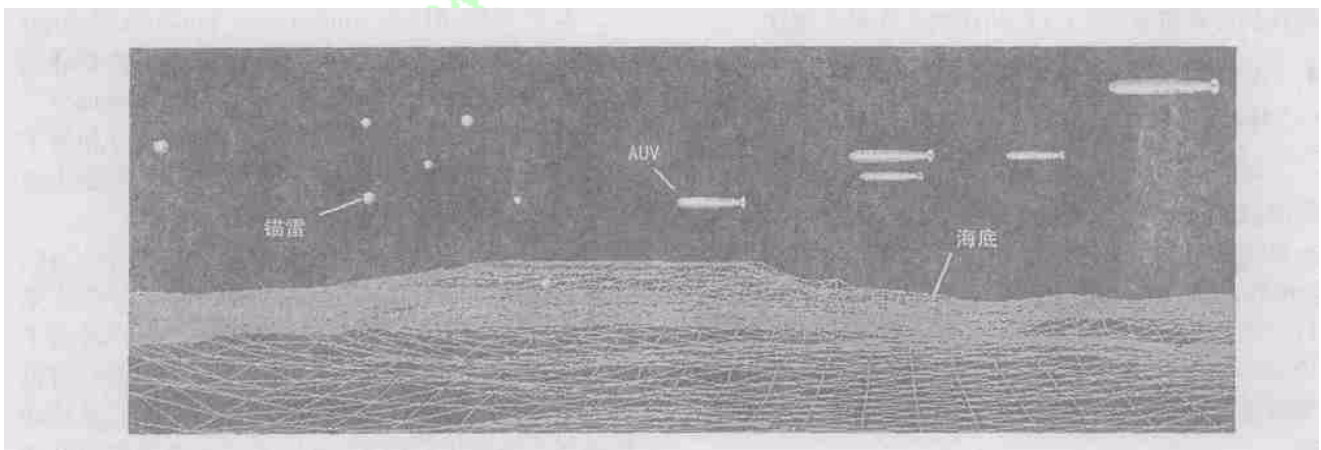


图3 AUV编队及雷区布设

Fig. 3 AUV formation & the distribution of mines

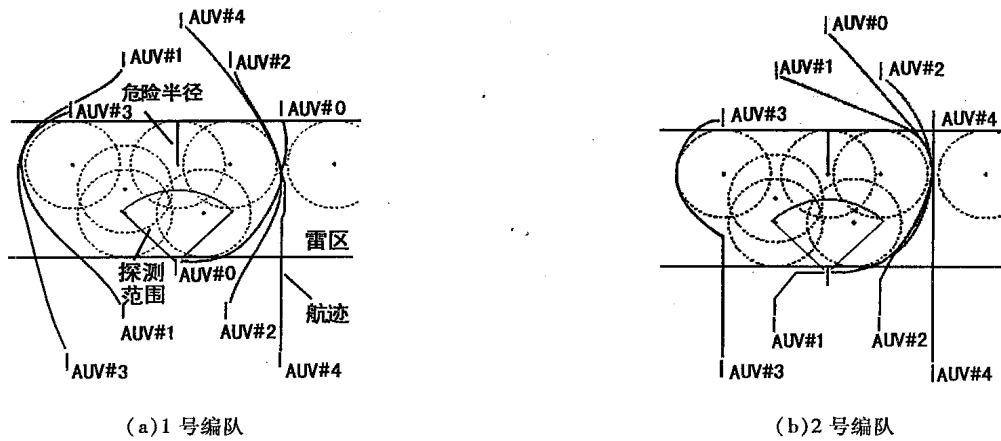


图 4 航迹俯视图

Fig.4 Planform of tracks

表 2 AUV 编队穿越雷区的代价

Table 2 Costs of AUV team cruising through mine area

代价指标	1 号编队	2 号编队	1 号编队节约率
触雷损失(个)	0	0	0 %
耗时(s)	851	1510	43.6 %
耗能(mWh)	161056.3	176300.3	8.6 %

6 结论 (Conclusion)

ATA-AUV 在保持良好的反应性的同时,对 AUV 的智能本质(心智)进行了细致地刻画,从而为实现 AUV 的主动性和自治性在体系结构层面上提供了更好的支持. ATA-AUV 还对 AUV 的社会交互特性进行了实现和封装,从而为有效地进行群体合作奠定了基础. ATA-AUV 适合于复杂海洋环境下 AUV 群体合作应用领域,实验结果已表明其可行性和有效性.

参考文献 (References)

[1] 王越超,等.协作机器人学的研究现状与发展[J].机器人,1998, 20(1): 69 - 75.

[2] Chappell S G, et al. Cooperative AUV development concept (CADCON) an environment for high-level multiple AUV simulation [A]. Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST99)[C]. Durham, USA: 1999.112 - 120.

[3] 刘海波,等.智能机器人体系结构分类研究[J].哈尔滨工程大学

学报, 2003, 24(6): 664 - 668.

[4] Ridao P, et al. Recent trends in control architectures for autonomous underwater vehicles [J]. International Journal of Systems Science, 1999, 30(9): 1033 - 1056.

[5] Gat E. On three-layer architectures [A]. Artificial Intelligence and Mobile Robots[C]. Menlo Park: MIT/AAAI Press, 1998. 195 - 210.

[6] Rooney C F B, et al. The social robot architecture: towards sociality in a real world domain (UMCS - 99 - 3 - 1)[R]. Manchester, UK: Manchester University, 1999.

[7] Ridao P, et al. An underwater autonomous agent: from simulation to experimentation [A]. 2nd Congress Catala de Inteligencia Artificial[C]. Vilanova, Spain: 2000. 53 - 57.

[8] Albus J. NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture (NASREM) (Technical Note 1235)[R]. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology, 1988.

[9] Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1): 14 - 23.

[10] Connell J. SSS: A hybrid architecture applied to robot navigation [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Nice, France: 1992. 2719 - 2724.

作者简介:

刘海波 (1976-),男,博士研究生.研究领域:多智能体系统,智能机器人.

顾国昌 (1946-),男,教授,博士生导师.研究领域:智能控制与智能机器人.

沈晶 (1969-),女,博士研究生.研究领域:多智能体强化学习,人工免疫,智能机器人.