



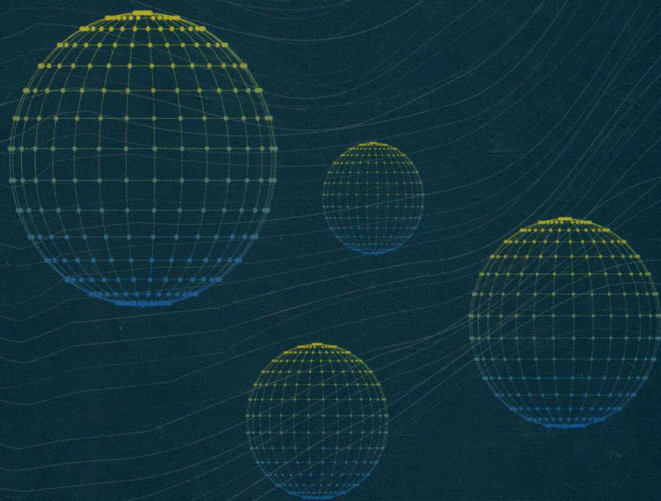
装备科技译著出版基金

 Springer

# 海洋无人航行器 智能自主控制

Intelligent Autonomy for  
Unmanned Marine Vehicles

[英] 卡洛斯·C·因绍拉尔德 (Carlos C. Insaurralde) 著  
张勋 徐博 译 严浙平 审



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

# 海洋无人航行器智能自主控制

Intelligent Autonomy for Unmanned Marine Vehicles

[英]卡洛斯·C·因绍拉尔德(Carlos C. Insaurralde) 著

张勋 徐博 译

严浙平 审

国防工业出版社

·北京·

# 著作权合同登记 图字:军-2017-032号

## 图书在版编目(CIP)数据

海洋无人飞行器智能自主控制 / (英) 卡洛斯·C. 因绍拉尔德 (Carlos C. Insaurralde) 著; 张勋, 徐博译.

—北京: 国防工业出版社, 2018. 12

书名原文: Intelligent Autonomy for Unmanned Marine Vehicles

ISBN 978-7-118-11655-7

I. ①海… II. ①卡… ②张… ③徐… III. ①无人驾驶-可潜器-智能控制 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 273347 号

Translation from the English language edition:

Intelligent Autonomy for Unmanned Marine Vehicles

Robotic Control Architecture Based on Service-Oriented Agents

by Carlos C. Insaurralde

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2015

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer International Publishing AG

All Rights Reserved

版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$  字数 208 千字

2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

## 致 谢

感谢 Yvan R. Petillot 教授和 David M. Lane 教授对我持续不断的支持。特别是 Yvan 教授在日常工作中给我提供不断创新的机会, David 的信任促使我完成了这一挑战性的任务。

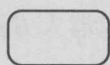
特别感谢海洋系统实验室的所有学生、研究人员和技术人员。特别感谢 Joel J. Cartwright 先生无条件的协助, 以及他在软件开发和 underwater 机器人方面的技术支持。

感谢欧洲委员会的财政支持, 也由衷地感谢 TRIDENT 项目组的同事提供海洋运载器平台的信息, 促进了我的研究工作。

真挚地感谢我亲爱的家人 (Carla、Florence 和 Ariadne) 对我致力于研究工作的理解与支持。特别是我的妻子 Carla 对我不懈的支持和无私的爱。另外, 感谢我的两个小宝贝, Florence 和 Ariadne, 他们使我的生活丰富多彩。

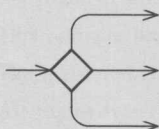
# 符 号

服务通过系统建模语言所构建的图形符号表示。主要的系统建模语言标识如下：



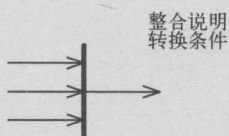
活动  
(服务执行)

系统建模语言的活动是建立在令牌的概念之上的。令牌代表输入值、输出值或由一个动作到另一个动作的流控制。用基本的活动来代表服务执行。当服务被执行时活动发生。活动有使命层、操作层、任务层和行动层四个不同的层级



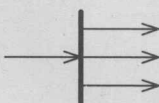
决策节点

一个决策节点有一个输入流和多个输出流(一个输入令牌只能转换为一个输出流)。每条输出流的监护条件是互斥的,令牌会被提供给满足监护条件表达式的输出流。决策节点同时有决定输入行为,用来估计输入令牌,其结果用于监护条件表达式



集合节点

一个集合节点有一个输出流和多个输入流(具有同步多个令牌流的重要特性)。集合节点的默认行为可以被指定附加控制逻辑的整合说明推翻



分支节点

一个分支节点有一个输入流和多个输出流。它将接收的输入令牌复制到每一个输出流。每个输出流的令牌能够被独立地、并行地处理



接收消息

活动通过使用接收消息信号来接收事件。事件有用于接收数据的输出引脚(有时隐藏)



发送信息

活动通过使用发送消息信号来发送信号,一般有被发送信号数据和信号目标方的引脚

系统建模语言注释:

bdd 模块定义图  
pkg 包  
ibd 内部模块图  
uc 用例  
sd 序列图  
act 活动图  
stm 状态机

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 理由和动机	1
1.3 问题阐述	2
1.4 假设和研究目标	2
1.5 研究价值	3
1.6 本书的章节安排	4
第 2 章 现有机器人控制结构	6
2.1 单 agent 和多 agent 航行器	6
2.2 智能 agent	6
2.3 基于 agent 的方法比较	7
第 3 章 智能控制结构	9
3.1 结构基础	9
3.2 分级控制	12
3.2.1 系统架构集成	12
3.2.2 自主水下机器人的分级	13
3.2.3 agent 结构基础	15
3.2.4 agent 分析	16
3.2.5 agent 可靠性	19
3.3 知识表示	20
3.3.1 认知概念化	20
3.3.2 基础本体论	21
3.4 知识推理	25
3.4.1 基于内部信息的规划	25
3.4.2 基于需求的规划	27
3.5 基于功能驱动的全局规划	28
3.6 开发过程	29

---

<b>第4章 智能控制结构设计</b> .....	32
4.1 需求定义 .....	32
4.1.1 系统概述 .....	32
4.1.2 用户需求 .....	32
4.1.3 系统需求 .....	33
4.2 系统体系结构详述 .....	38
4.2.1 AMR 系统组件 .....	38
4.2.2 低级功能和数据耦合 .....	41
4.3 系统体系结构设计 .....	41
4.3.1 服务描述 .....	41
4.3.2 服务协议 .....	43
4.3.3 面向服务的结构协作 .....	46
4.4 agent 设计 .....	46
4.4.1 AMR 系统功能概述 .....	46
4.4.2 agent 概述 .....	48
4.4.3 局部规划的全局化 .....	52
4.4.4 agent 执行过程 .....	69
<b>第5章 智能控制结构实现</b> .....	75
5.1 系统体系结构实现 .....	75
5.1.1 机器人操作系统中间设备 .....	75
5.1.2 服务媒介 .....	76
5.2 系统体系结构整合 .....	81
5.2.1 实体系统整合 .....	81
5.2.2 虚拟系统整合 .....	82
5.2.3 整合规划 .....	83
5.3 运行环境 .....	83
5.4 实例 .....	84
5.4.1 海底勘测 .....	84
5.4.2 目标操纵 .....	87
<b>第6章 智能控制结构评估</b> .....	89
6.1 需求的可追溯性 .....	89
6.2 系统测试 .....	90
6.3 计算机仿真 .....	92
6.3.1 仿真方法 .....	92

---

6.3.2	方案 A:无故障海底勘测 .....	92
6.3.3	方案 B:有故障海底勘测 .....	96
6.3.4	方案 C:无故障目标干预 .....	98
6.4	海上验证试验 .....	99
6.4.1	海试方法与步骤 .....	100
6.4.2	领航者跟踪试验 .....	100
<b>第 7 章</b>	<b>结论和发展前景</b> .....	<b>104</b>
7.1	结论 .....	104
7.2	前景 .....	105
7.3	发展趋势 .....	105
附录 A	实体核心 .....	107
附录 B	自主水下机器人的系统功能 .....	112
附录 C	系统模块 .....	148
附录 D	系统服务 .....	153
附录 E	坐标转换 .....	171
附录 F	使命配置 .....	175
术语汇编	.....	176
参考文献	.....	177

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 背景

本书的研究是在 TRIDENT<sup>[1]</sup>项目背景下完成的。该项目针对于多用途的水下任务提出了新方法,通过自主式水面水下航行器的协作,实现不同海事任务的融合。在实现海洋机器人自主控制的过程中(包括自适应规划、重规划和容错能力),有效的航行器控制体系结构扮演了重要角色。

机器人是一个多工程交叉学科,在许多领域的应用越来越广泛。尤其是工业部门和政府对海洋探索和海洋新能源开发给予极大关注,进而在过去几十年里,水面和水下自主航行器的研究取得了较大进展。因此,无人海洋运载器(UMV)作为交互式自主平台在不同的操作领域发挥了关键作用,已经成为各种海事业务的一种普适性的解决方案。

上述海洋工程技术的主要应用单位是从事海洋相关工作的机构和公司(海上搜救组织、军事和国防工业、航空安全调查机构等)。然而,最重要的应用是水下任务(如海底勘测、海洋生物应用技术的海底数据采集和目标操作;按下一个命令按钮,对象修复),因为海底环境充满危险,人无法到达。此外,对于潜水员来说,还涉及重复性和长时间的冒险任务。

由于受通信信道的限制(因为要进行必要的协调、合作与协作)以及高压(对人体生理和仪器设备的重大影响),因此无论是人还是人造系统,对深水区的访问都不是一件容易的事情。但是,机器人系统比人容易得多,因为对于有线设备来说,带宽并不是一个难题。

但是,其他领域的机器人(如太空或陆地机器人)技术并不能直接应用于海洋机器人,因为它们不适应水下环境(如不同的传感器与效应器以及处理方法和通信技术)。

## 1.2 理由和动机

大部分海底作业如海事救援、水下探测、岸边光缆的铺设和海洋生物学领域

目前都是通过下列水下机器人用机械臂完成的:载人水下航行器(MUV)或遥控潜水器(ROV)。

载人水下航行器的优势在于可以将操作人员送到任务区进行实地考察(如进行目标操作)。这种方案的缺点是工作时间受限(通常几小时),人类处在危险和敌对的环境中,并且成本非常高,因为需要为这种运载器的操作提供昂贵的支持和监管。

遥控潜水器是深干预技术,可以长时间远程操作。但是,它们需要昂贵的、配备重型吊车的供给船;由于必须实时地通过操控机械臂来保证遥控潜水器与脐带缆协调,因此使得遥控潜水器操作员身心疲惫。遥控潜水器不太引人注意的原因还有价格昂贵(主要是由于劳动力成本)以及它们需要与船相连接。

### 1.3 问题阐述

由于载人潜水器与遥控水下机器人的高成本和高风险性,我们必须针对海事任务提出更有效的解决方案。在降低成本和风险的主导思想下,无人水下航行器的应用进入了我们的视野。通过分析无人水下航行器如何与客户端以及其他支撑系统之间交互,它们自己以及通过和其他平台协同作业能够完成多少工作,可以得出解决方案。通过增强上述紧密联合在一起的成员的自治性(操作者、海洋运载器等)设定挑战性的活动,来完成无人水下航行器的设计和操作。

我们面临的挑战是要开发出海洋运载器编队控制系统,通过最少的操作者干预可靠地完成复杂的任务。要实现这一目标,关键问题是设计与构建能够自主处理内部故障和适应环境变化能力的系统,以及能够根据传感器输出信息进行重规划。因此,新型海洋运载器平台需要具有一定的自主性和多体协同工作模式来减少人为干预。

### 1.4 假设和研究目标

先进的电池技术使得交互式遥控潜水器领域发生了技术革命:自主干预水下航行器(IAUV)。因此,理论上自主干预水下航行器可以采用便宜的运载器而不需要系绳管理系统和动力定位系统。此外,即使将操作者从控制回路移除,操作仍然可以持续几天。

水面自主航行器(ASC)替代补给舰可以大大减少操作成本,特别是在执行内河或海岸线任务时。水面自主航行器和自主干预水下航行器共同构成具

有互补能力的海洋机器人混合编队,能够胜任海/洋任务,如海底勘测或操纵干预。

上述机器人团队可以由海洋科考船搭载,自主地执行任务,而其他科学任务是在不同区域的船舶上进行的。此外,水面自主航行器装有超短基线(USBL)、声纳通信、无线电通信,可以确定自主干预水下航行器的位置以及建立通信链路,以实现无人水下航行器团队的远程跟踪和监督。

在上述先进的无人水下航行器配置下,海洋机器人可以在布放之后回收之前自主完成工作,具有一定的“智能性”,这些工作在以前的方案中是由操作员完成的。本书提出的方法同样适用于控制回路中无须人工操作的传统自主式水下航行器(AUV)。它们仅限于海底勘测(在相对于所述海底的一定的安全高度“飞行”,并且实时地记录数据),交互式自治水下航行器非常接近特定的任务场景(感兴趣的目标)进行近距离操作。这种交互式自治水下航行器的精确应用更加具有挑战性。

## 1.5 研究价值

本书提出了一种智能控制体系结构(ICA),使多个海洋运载器开展自主多功能水下任务。智能控制体系结构本质上是通用的,同样也适用于ASC和IAUV的协同工作,不同的自主航行器具有潜在的互补能力,它们在执行复杂的任务时能够自动地协同工作。

不同于固定的任务计划和低级诊断方案,智能控制体系结构采用一个鲁棒性更强的架构来处理上述任务。它还可以应对突发故障,如基于硬件故障或环境变化的传感器和传感器信息处理。面向服务计算的灵活性为智能控制体系结构的实现奠定了基础。每个航行器模块提供基本服务,其中包括向系统公布其功能。该服务还会定期更新当前的状态。

除了面向服务模式,以知识为基础的数据库能够获取人类专家相关领域的特定技能(如何执行特定任务),以及关于环境和平台功能的动态信息。这使得任务可以划分成多个子任务来测试和验证其特定的服务性能。这些信息使顶层推理机监控、优化或根据目前信息改变使命计划。由此提出了一种面向服务agent的方法,适用于单个航行器模块和多个航行器协同工作模式。这些agent被嵌入在海洋运载器。它们具有不同的用途,并提供不同的功能,可作为航行器服务(如导航、测绘、摄像等)的整体系统。智能控制体系结构实际上提供了一种融合方法,是agent发展的关键。

上述两种技术的结合使得开发智能控制体系结构成为可能,能够动态地重

规划和自我调整来应对操作环境的变化。因此,这种实时重规划能力能够大大提高任务的成功率。我们通过一个特殊的案例验证了智能控制体系结构的性能。但这是一种具有一般性的海事任务解决方法,能够应用于其他海事任务以及无人海洋运载器。

## 1.6 本书的章节安排

第1章介绍本书的研究主题。首先将研究内容锁定在工业部门和政府投入大量关注的海上应用领域,海洋机器人发挥了非常关键的作用。重点是基于水面辅助下的海洋飞行器水下任务作业。目前由于受到经济和操作员技术的限制,遥控潜水器在性价比方面不再具有优势。取而代之的是水面和水下自主飞行器,它们对于降低经济成本和操作员干预水平具有很大的潜力。本书提出一种智能控制体系结构,使多个载人水下飞行器能够自主协作完成水下任务。

第2章对目前的机器人控制架构进行回顾。现有技术主要分为两个大类:①单 agent 或多 agent 飞行器;②agent 编队。本章部分内容还对与海洋机器人智能控制体系结构最相关的应用方法进行比较。

第3章介绍架构基础,提出智能控制体系结构的概念以及构建原则。阐述实现上述控制结构体系的各个层次(从目标到行为),并给出对无人水下飞行器人工智能的知识表示和本体推理方法的详细解释。

第4章给出智能控制体系结构的设计细节。对用户与系统要求进行界定和分析,以自上而下的分解方法进行智能控制体系结构设计。智能控制体系结构的本质体现在整个自主海洋机器人(AMR)系统都能享受到网络服务(该服务由无人水下飞行器模块提供)。

第5章给出智能体系结构架构的实现过程。详细介绍智能体系结构的实现步骤、操作环境以及案例分析。该结构的实现包括开发和构建为自主海洋机器人系统提供服务的模块。这种融合架构使得对上述模块和它们的服务进行有效的组合和分配显得非常必要。本章还给出通过两个无人水下飞行器对水下操作环境进行干预的案例,即水面自主飞行器和自主干预水下飞行器。

第6章给出当智能体系结构应用于以上的海洋系统平台(水面自主飞行器和自主干预水下飞行器)的时候,不同海事任务操作的仿真和试验下的结果,以用于对智能体系结构的评估。这些试验借助于计算机仿真和海试来进行。前者侧重于海底勘测的仿真和通过三维模拟器执行水下目标操作的仿真。后者侧重于在两个不同地方,即船闸和港口的实际试验。

第7章给出结论以及未来的研究方向。通过总结关键点、发展里程碑以及

试验验证阐述本书的贡献,并指出今后的研究方向是进一步丰富和完善本体论的数据库,以应付更复杂的应用场景(包括其他潜在的故障和意外情况)。同时还讨论了本书的研究成果在科研、学术和工业领域的应用潜力。

附录 A 给出作为智能体系结构核心的本体论的细节。附录 B 列出所有低级功能的详细规范,它们被包装为服务,由机器人操作系统(ROS)实施。附录 C 对所有服务进行完整描述,并且针对具体案例给出智能体系结构这种服务的编排机制。附录 D 提供机器人操作系统服务界面的详细版本。附录 E 包括坐标构建、坐标调整及坐标变换。附录 F 给出本书任务配置的 XML 文件。

## 第 2 章 现有机器人控制结构

### 2.1 单 agent 和多 agent 航行器

本章提出的机器人控制结构的应用重点是在海洋工程和机器人领域。特别需要指出的是它只涉及船舶 agent 系统,因为本书提出将 agent 技术应用于 ARM 系统,其中每个自主式海洋运载器(AMV)都可以看作一个移动 agent。

在上述背景下,AMV 主要有两种分类方法:一是根据每个航行器上 agent 配置的数量进行分类;二是根据 agent 的基本架构进行分类,尤其是那些真正有意义的智能结构。

目前提出的许多方案都是针对每个独立的移动平台配置多个 agent。这些方案通常将一个 agent 分配给一个功能系统模块(导航器、控制器以及视觉处理器等)。因此,agent 定义为支持系统的关键基本组成部分<sup>[3-9]</sup>。一些研究人员采取了另一种方案,每个移动平台只配置一个 agent<sup>[10-14,27]</sup>。多 agent 解决方案可以在单个航行器中完成分布式计算,使得其中每个 agent 本身更加简单,但需要额外增加 agent 之间的通信任务。单 agent 解决方案增加了计算资源的需要,但使得每个 agent(或者 agent 的集合)得到简化,如 agent 之间的外部通信。

### 2.2 智能 agent

乔治华盛顿大学智能系统研究中心(CISR)的研究人员正在致力于多个自主水下航行器(水下机器人)的分散控制研究。他们针对多 agent 的集体行为提出了本体论的方法,这可以适用于水下机器人编队<sup>[14]</sup>。他们的建议是基于 agent 的集体意向。这比传统单个 agent 的 BDI(Beliefs-Desires-Intentions)模型更加优越,因为它利用多个 agent 相互之间而不仅仅使每个 agent 自己的代价函数的最大化<sup>[15]</sup>。这种集体的方式来管理 agent 有利于降低每个 agent 的任务数量(降低 agent 的繁忙程度),可以使 agent 实现复杂、更有效的互动。

赫瑞瓦特大学海洋系统实验室已经开始针对 AUV 的面向服务 agent 的状

态感知进行研究。态势感知(SA)是 agent 的一种有意识的感知内部和外部状态的能力。SA 所提供的信息对决策行为至关重要。SA 水平越高,做出的决策越好。相关的研究主要集中在基于语义知识表达的 SA 优化<sup>[9]</sup>、分布式本体论世界模型<sup>[17]</sup>、实时任务规划<sup>[18]</sup>。上述方法为基于面向服务 agent 的海上航行器自主控制中的可重构控制结构奠定了基础。他们为 AUV 适应任务要求提供了灵活性。如自我修复规划的能力、无须操作员干预下重新计划或修复计划(完全或部分)的能力是非常有价值的,在 AUV 执行任务时能节省时间。

有很多水下操作的成功案例,如场区的温度、盐度测量或在严重污染的环境中的 AUV 编队控制<sup>[19]</sup>。防御系统也需要由自主式空中和海洋运载器构成多源平台网络,用以控制海洋局势,包括多个水下机器人协同作战和无人作战飞行器<sup>[20]</sup>。它给出了上述系统所面临的一些常见问题,如有关硬件软件一体化设计、协调控制策略、操纵、沟通和实时避障等。

### 2.3 基于 agent 的方法比较

本书的主要贡献是为海洋自主航行器提供了一个通用的结构方案。ICA 所提出的是一种更优的解决方案,它通过融合和延伸上述特性,主要利用自主在线决策能力,基于自适应规划任务来处理单个和多个 AMV 的跟踪任务。尽管有一些方法<sup>[15,16]</sup>提出了利用 agent 处理海洋运载器的协作,但 ICA 在此基础上提出了一种动态发现平台功能的机制和支持自适应规划任务<sup>[18]</sup>的知识数据库<sup>[17]</sup>。本节中没有一种方法对以下几种功能的综合能力进行讨论:①发布;②发现;③重规划;④监控健康;⑤执行系统功能,同时处理海上任务的容错方式。

系统功能的发现与宣传以及基于语义知识数据库的动态规划决策是 ICA 与当前方法的主要区别。而这些因素对于 UMV 的智能自主性是必要的。这两种基本类似人类的机制,使运营商可以完全委派海洋自主系统(ASC 和 IAUV)去自主开展当前援助等海上活动,而这些在其他方法中是靠人工操作完成的。这在海事自主程度上显著提高,旨在减少 ROV 昂贵的部署和操作成本。低自主程度使得传统方法(MUV、ROV、大多数 AUV)在执行复杂的多运载器协作任务时束手无策。它们的计算和力学性能受到集成在船上安装的限制。

表 2.1 给出本书提出的 ICA 与现有方法的比较,所评估的是每个架构处理故障的能力(处理程度)、航行或飞行中的决策、系统中的动态识别服务和数据计算的能力。

表 2.1 适用于海洋机器人的相关智能控制体系结构方法比较

架构方法	故障诊断与缓解	规划和重规划	发布和发现能力	运载器内部计算范例
PN-MAS <sup>[14]</sup>	部分支持	仅用于障碍物检测	无	agent
SKR <sup>[9,17,18]</sup>	部分情况下支持	离线决策	无	目标
MARIOUS <sup>[7]</sup>	少数情况支持	在线决策	无	多 agent
MAA <sup>[10]</sup>	不支持	离线决策	无	多 agent
DVMA <sup>[13]</sup>	不支持	离线决策	无	序贯
T-RES <sup>[27]</sup>	不支持	基于约束的推理决策	无	agent
JAUS <sup>[22]</sup>	不支持	开放式平台决策	无	基于服务的组件
REMORAS <sup>[28]</sup>	不支持	在线决策	agent 的预知功能	多 agent
ICA	支持	在线决策	支持	基于服务的多 agent