



■ 海洋机器人科学与技术丛书 封锡盛 李 硕 主编

智能水下机器人 海底地形匹配导航技术

Seabed Terrain Referenced Navigation for
Autonomous Underwater Vehicle

李 晔 等/著



科学出版社
龍門書局



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

海洋机器人科学与技术丛书

封锡盛 李 硕 主编

智能水下机器人海底地形 匹配导航技术

李 晔 等 著

科 学 出 版 社

龍 門 書 局

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了智能水下机器人海底地形匹配导航的发展与应用,全书共7章,内容主要包括绪论、海底地形匹配导航技术概述、先验数字地形的生成方法、海底地形特征表述与路径规划、地形匹配单元的组建、海底地形匹配导航算法及海底地形辅助导航系统。内容基本上覆盖了智能水下机器人地形匹配技术知识专题及发展动向。

本书适合高等院校船舶与海洋工程、控制理论与控制工程、信号与信息处理等专业的高年级本科生、硕士研究生,以及从事水下导航研究及应用、水下机器人研究及应用、地形匹配技术研究的科研和工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能水下机器人海底地形匹配导航技术 / 李晔等著. —北京: 龙门书局, 2018.11

(海洋机器人科学与技术丛书 / 封锡盛, 李硕主编)

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-5477-9

I. ①智… II. ①李… III. ①水下作业机器人-应用-海底地貌-航海导航-研究 IV. ①TP242.2②U675.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 214843 号

责任编辑: 姜红 常友丽 张震 / 责任校对: 李影
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版
龙 门 书 局

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第一版 开本: 720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 14 插页: 4

字数: 282 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



“海洋机器人科学与技术丛书”

编辑委员会

主任委员 封锡盛 李硕

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王晓辉 李智刚 林 杨

委 员 (按姓氏笔画排序)

田 宇 刘开周 许 枫 苏玉民

李 晔 李一平 何立岩 宋三明

张艾群 张奇峰 林昌龙 周焕银

庞永杰 胡志强 俞建成 徐会希

徐红丽 冀大雄

秘 书 姜志斌

本书作者名单

李 晔 姜言清

王汝鹏 马 腾 陈鹏云 陈小龙

丛书前言一

浩瀚的海洋蕴藏着人类社会发展所需的各种资源，向海洋拓展是我们的必然选择。海洋作为地球上最大的生态系统不仅调节着全球气候变化，而且为人类提供蛋白质、水和能源等生产资料支撑全球的经济的发展。我们曾经认为海洋在维持地球生态系统平衡方面具备无限的潜力，能够修复人类发展对环境造成的任何伤害。但是，近年来的研究表明，人类社会的生产和生活也会造成海洋健康状况的退化。因此，我们需要更多地了解和认识海洋，评估海洋的健康状况，避免对海洋的再生能力造成破坏性影响。

我国既是幅员辽阔的大陆国家，也是广袤无边的海洋国家，大陆海岸线 1.8 万千米，内海和边海水域面积约 470 万平方千米。深邃宽阔的海域内潜含着的丰富资源为中华民族的生存和发展提供了必要的物质基础。我国的洪涝、干旱、台风等灾害天气的发生与海洋密切相关，海洋与我国的生存和发展密不可分。党的十八大报告明确提出，提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国^①。党的十九大报告明确提出，坚持陆海统筹，加快建设海洋强国^②。建设海洋强国已经上升为国家战略，认识海洋、开发海洋需要包括海洋机器人在内的各种高新技术和装备，海洋机器人一直为世界各国海洋强国所关注。

关于机器人，蒋新松院士有一段精彩的诠释：机器人不是人，是机器，它能代替人完成很多需要人类完成的工作。机器人是拟人的机械电子装置，具有机器人和拟人的双重属性。海洋机器人是机器人的分支，它还多了一重海洋属性，是人类进入海洋空间的替身。

海洋机器人可定义为在水面和水下移动，具有视觉等感知系统，通过遥控或自主操作方式，使用机械手或其他工具，代替或辅助人去完成某些水面和水下作业的装置。海洋机器人分为水面和水下两大类，在机器人学领域属于服务机器人中的特种机器人类别。根据作业载体上有没有操作人员可分为载人和无人两大类，其中无人又包含遥控、自主和混合三种作业模式，对应的水下机器人分别称为无人遥控水下机器人、无人自主水下机器人和无人混合水下机器人。

① 胡锦涛在中国共产党第十八次全国代表大会上的报告。人民网，<http://cpc.people.com.cn/n/2012/1118/c64094-19612151.html>

② 习近平在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告。人民网，<http://cpc.people.com.cn/n1/2017/1028/c64094-29613660.html>

水下机器人也称无人潜水器，相应有无人遥控潜水器、无人自主潜水器和无人混合潜水器。通常在不产生混淆的情况下省略“无人”二字，如无人遥控潜水器可以简称为遥控水下机器人或遥控潜水器等。

世界海洋机器人发展的历史大约有 70 年，经历了从载人到无人，从直接操作、遥控、自主到混合的主要阶段。加拿大国际潜艇工程公司创始人麦克法兰，将水下机器人的发展历史总结为四次革命：第一次革命出现在 20 世纪 60 年代，以潜水员潜水和载人潜水器的应用为主要标志；第二次革命出现在 70 年代，以遥控水下机器人迅速发展成为一个产业为标志；第三次革命发生在 90 年代，以自主水下机器人走向成熟为标志；第四次革命发生在 21 世纪至今，进入了各种类型水下机器人混合的发展阶段。

我国海洋机器人发展的历程也大致如此，但是我国的科研人员只用了一半多一点的时间走过上述历程。20 世纪 70 年代，中国船舶重工集团公司第 701 研究所研制了用于打捞水下沉物的“鱼鹰”号载人潜水器，这是我国载人潜水器的开端。1986 年，中国科学院沈阳自动化研究所和上海交通大学合作，研制成功我国第一台遥控水下机器人“海人一号”。90 年代我国开始研制自主水下机器人，“探索者”、CR01、CR02、“智水”系列等先后完成研制任务。目前，我国上海交通大学研制的“海马”号遥控水下机器人工作水深已经达到 4500 米，中国科学院沈阳自动化研究所联合中国科学院海洋研究所共同研制的深海科考型 ROV 系统最大下潜深度达到 5611 米。近年来，我国海洋机器人更是经历了跨越式的发展。其中，“海翼”号深海滑翔机“入选”国家主席习近平 2018 年新年贺词^①；有标志意义的“蛟龙”号载人潜水器将进入业务化运行；“海斗”号混合型水下机器人已经多次成功到达万米水深；“十三五”国家重点研发计划中全海深载人潜水器及全海深无人潜水器已陆续立项研制。海洋机器人的蓬勃发展正推动中国海洋研究进入“万米时代”。

水下机器人的作业模式各有长短。遥控模式需要操作者与水下载体之间存在脐带电缆，电缆可以源源不断地提供能源动力，但也限制了遥控水下机器人的活动范围；由计算机操作的自主水下机器人代替人工操作的遥控水下机器人虽然解决了作业范围受限的缺陷，但是计算机的自主感知和决策能力还无法与人相比。在这种情形下，综合了遥控和自主两种作业模式的混合型水下机器人应运而生。另外，水面机器人的引入还促成了水面与水下混合作业的新模式，水面机器人成为沟通水下机器人与空中、地面机器人的通信中继，操作者可以在更远的地方对水下机器人实施监控。

与机器人和潜水器对应的英文单词分别为 robot 和 vehicle，后者的含义是运

① 国家主席习近平发表二〇一八年新年贺词。新华网，http://www.xinhuanet.com/politics/2017-12/31/c_1122192418.htm

载体，与安装其上的机械手、视觉设备和仿人行为软件一起构成水下机器人系统。显然，海洋机器人是在海洋环境中运载功能与仿人功能的结合体。应用需求的多样性使得运载与仿人功能的体现程度不尽相同，由此产生了各种功能型的海洋机器人，如观察型、作业型、巡航型和海底型等。如今，robot 和 vehicle 两词的内涵逐渐趋同。

信息技术、人工智能技术特别是其分支机器智能技术的快速发展，正在推动海洋机器人以新技术革命的形式进入“智能海洋机器人”时代。严格地说，前述自主水下机器人的“自主”行为已具备某种智能的基本内涵。但是，其“自主”行为泛化能力非常低，属弱智能；新一代人工智能技术，如互联网、物联网、云计算、大数据、深度学习、迁移学习、边缘计算、自主计算和水下传感网等技术将极大增强海洋机器人的智能。而且，新理念、新材料、新部件、新动力源、新工艺、新型仪器仪表和传感器还会使智能海洋机器人以各种形态呈现，如海陆空一体化、全海深、超长航程、超高速度、核动力、跨介质、集群作业等。

海洋机器人的理念正在使大型有人平台向大型无人平台转化，推动少人化和无人化的浪潮滚滚向前，无人商船、无人游艇、无人渔船、无人潜艇、无人战舰以及与此关联的无人码头、无人港口、无人商船队的呈现已不是遥远的神话，有些已经成为现实。无人化的势头将冲破现有行业、领域和部门的界限，其影响深远。需要说明的是，这里“无人”的含义是人干预的程度、时机和方式与有人模式不同。无人系统绝非是无人监管独立自由运行的系统，仍是有人监管或操控的系统。

研发海洋机器人装备属于工程科学范畴。由于技术体系的复杂性、海洋环境的不确定性和用户需求的多样性，目前海洋机器人装备尚未被打造成大规模的产业和产业链，也还没有形成规范的通用设计程序。科研人员在海洋机器人相关研究开发中主要采用先验模型法和试错法，通过多次试验和改进才能达到预期设计目标。因此，研究经验就显得尤为重要。总结经验利于来者是本丛书作者的共同愿望，他们都是在海洋机器人领域拥有长时间研究工作经历的专家，他们奉献的知识和经验成为“海洋机器人科学与技术丛书”的一个特色。

海洋机器人涉及的学科领域很宽，内容十分丰富，我国学者和工程师已经撰写了大量的著作，但是仍不能覆盖全部领域。“海洋机器人科学与技术丛书”集合了我国海洋机器人领域的有关研究团组，阐述我国在海洋机器人基础理论、工程技术和应用技术方面取得的最新研究成果，是对现有著作的系统补充。

“海洋机器人科学与技术丛书”内容主要涵盖基础理论研究、工程设计、产品开发和应用等，囊括多种类型的海洋机器人，如水面、水下、浮游以及用于深水、极地等特殊环境的各类机器人，涉及机械、液压、控制、导航、电气、动力、能源、流体动力学、声学工程、材料和部件等多学科，对于正在发展的新技术以及

有关海洋机器人的伦理道德社会属性等内容也有专门阐述。

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、风雨的温床、贸易的通道以及国防的屏障，海洋机器人是摇篮中的新生命、资源开发者、疆域开拓者、奥秘探索者和国门守卫者。为它“著书立传”，让它为我们实现海洋强国梦的夙愿服务，意义重大。

本丛书全体作者奉献了他们的学识和经验，编委会成员为本丛书出版做了组织和审校工作，在此一并表示深深的谢意。

本丛书的所有作者都承担着多项重大的科研任务和繁重的教学任务，精力和学识所限，书中难免会存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

中国工程院院士 封锡盛

2018年6月28日

丛书前言二

改革开放以来，我国海洋机器人事业发展迅速，在国家有关部门的支持下，一批标志性的平台诞生，取得了一系列具有世界级水平的科研成果，海洋机器人已经在海洋经济、海洋资源开发和利用、海洋科学研究和国家安全等方面发挥重要作用。众多科研机构 and 高等院校从不同层面及角度共同参与该领域，其研究成果推动了海洋机器人的健康、可持续发展。可喜的是一批相关企业正迅速成长，这意味着我国的海洋机器人产业正在形成，与此同时一批记载这些研究成果的中文著作诞生，呈现了一派繁荣景象。

在此背景下“海洋机器人科学与技术丛书”出版，共有数十分册，是目前本领域中规模最大的一套丛书。这套丛书是对现有海洋机器人著作的补充，基本覆盖海洋机器人科学、技术与应用工程的各个领域。

“海洋机器人科学与技术丛书”内容包括海洋机器人的科学原理、研究方法、系统技术、工程实践和应用技术，涵盖水面、水下、遥控、自主和混合等类型海洋机器人及由它们构成的复杂系统，反映了本领域的最新技术成果。中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、中国科学院深海科学与工程研究所、浙江大学、华侨大学、东华理工大学等十余家科研机构 and 高等院校的教学与科研人员参加了丛书的撰写，他们理论水平高且科研经验丰富，还有一批有影响力的学者组成了编辑委员会负责书稿审校。相信丛书出版后将对本领域的教师、科研人员、工程师、管理人员、学生和爱好者有所裨益，为海洋机器人知识的传播和传承贡献一份力量。

本丛书得到 2018 年度国家出版基金的资助，丛书编辑委员会和全体作者对此表示衷心的感谢。

“海洋机器人科学与技术丛书”编辑委员会

2018 年 6 月 27 日

前 言

水下高精度导航技术是智能水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 实现大潜深、长航程、全天候水下作业的关键技术之一。现有的导航技术难以解决导航误差的时间累积效应, AUV 在作业过程中需要定期上浮接受卫星导航信号以修正导航偏差, 频繁的上浮下潜不仅增加 AUV 作业时间消耗, 而且使任务中的能源利用比例减小, 不能满足高精度导航的要求。

本书系统地介绍有关 AUV 海底地形匹配导航的有关技术; 对 AUV 海底地形匹配导航的关键问题、地形匹配导航算法、系统构成及实验等进行分析; 重点阐述先验地形的生成方法, 海底地形特征表述与路径规划, 地形匹配单元的组建, 海底地形匹配导航算法, 海底地形辅助导航系统。本书力图让读者全面而深刻地理解 AUV 海底地形匹配导航技术, 给从事海底地形匹配导航研究及地形匹配导航研究的科研人员提供参考。

本书共 7 章。

第 1 章为绪论, 全面介绍 AUV 水下导航技术和地形匹配导航技术研究现状。

第 2 章为海底地形匹配导航技术概述, 简要介绍海底地形匹配导航系统的组成、模型、典型方法和关键技术。

第 3 章为先验数字地形的生成方法, 从最原始的多波束测深系统的构成开始, 以数据的处理过程为引导, 分别介绍多波束数据处理原理、流程和滤波方法, 最终构建先验地图。

第 4 章为海底地形特征表述与路径规划, 分别讲述基于改进人工势场法、扇形搜索、粒子群优化、Astar 算法的路径规划方法原理与流程。

第 5 章为地形匹配单元的组建, 包括实时海底地形的获取、局部地形的插值重构、搜索区域的选择和参考水深偏差的消除。

第 6 章为海底地形匹配导航算法, 重点在于各种算法的原理、公式推导及算法流程。

第 7 章为海底地形辅助导航系统, 主要介绍海底地形匹配辅助导航的修正方式、误差分析、导航策略、基于 Vega 和 VC 的 AUV 海底地形辅助导航系统。

本书由李晔统稿。本书的第 1、2、5、7 章由李晔编写; 第 3、6 章由姜言清编写; 第 4 章由王汝鹏、马腾、陈鹏云、陈小龙合作编写。

本书的研究工作得到国家“万人计划”青年拔尖人才、国家自然科学基金项目 (项目编号: 50909025、51279221) 的支持, 并得到国家出版基金资助出版,

在此表示衷心感谢。

本书在写作过程中参考了国内外相关资料，在此，向参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

作者

2018年6月8日

目 录

丛书前言一

丛书前言二

前言

1 绪论	1
1.1 AUV 水下导航技术	1
1.2 地形匹配导航原理	3
1.3 AUV 海底地形匹配导航技术的研究现状	5
参考文献	9
2 海底地形匹配导航技术概述	13
2.1 海底地形匹配导航系统的组成	13
2.1.1 参考导航单元	13
2.1.2 地形测量单元	14
2.1.3 地形匹配单元	16
2.2 海底地形匹配导航模型	17
2.2.1 状态空间模型	17
2.2.2 数字地形模型	18
2.2.3 影响海底地形匹配定位性能的因素	18
2.3 典型的地形匹配方法	19
2.3.1 基于扩展卡尔曼滤波的地形匹配方法	20
2.3.2 基于相关性的地形匹配方法	21
2.3.3 基于直接概率准则的地形匹配方法	22
2.4 海底地形匹配的特殊性和关键技术	23
2.4.1 飞行器地形匹配导航和 AUV 海底地形匹配导航的比较	23
2.4.2 不同地形测量传感器在海底地形匹配导航中的特点与优势	24
2.4.3 海底地形匹配的关键技术	26
参考文献	26
3 先验数字地形的生成方法	29
3.1 多波束测深系统构成及原理	29

3.1.1	多波束测深系统构成	29
3.1.2	多波束测深原理	30
3.1.3	GeoSwath Plus 相干型多波束测深系统	31
3.2	多波束测深数据处理原理和流程	33
3.2.1	声线的追踪与补偿	33
3.2.2	海底归位处理	36
3.2.3	多波束测深数据处理流程	36
3.3	多波束测深数据的滤波方法	37
3.3.1	多波束测深数据滤波的基本原则	38
3.3.2	基于动态聚类的单 ping 滤波方法	40
3.3.3	基于 Alpha-Shapes 模型的单 ping 滤波方法	47
3.3.4	基于强跟踪卡尔曼滤波的单 ping 滤波方法	51
3.4	先验数字地形的生成	57
3.4.1	测深数据的空间归位	57
3.4.2	测深数据的网格化处理	58
3.4.3	先验数字地形的存储模型	63
	参考文献	66
4	海底地形特征表述与路径规划	68
4.1	海底地形特征的表述	68
4.1.1	地形高程标准差	69
4.1.2	地形信噪比	70
4.1.3	地形费希尔信息量	71
4.1.4	地形高程熵	72
4.1.5	地形高程绝对值粗糙度	74
4.1.6	局部地形相关系数与相关长度	74
4.1.7	局部地形平均坡度及坡度方差	75
4.2	基于改进人工势场法的地形匹配路径规划	76
4.2.1	改进人工势场法	76
4.2.2	最优路径搜索方案	78
4.2.3	路径规划结果	79
4.3	基于扇形搜索的地形匹配路径规划	80
4.3.1	适配区域的扇形搜索方法	81
4.3.2	扇形搜索方法的开角分析	82
4.3.3	目标点处限制线	85

4.3.4	目标点前的适配区域选择	87
4.3.5	引入临界高程熵的路径优化	89
4.3.6	路径规划结果	90
4.4	基于粒子群优化算法的地形匹配路径规划	91
4.4.1	粒子群优化算法	91
4.4.2	问题分析与建模	92
4.4.3	路径规划结果	94
4.5	基于 Astar 算法的地形匹配路径规划	95
4.5.1	环境建模	95
4.5.2	算法的设计与实现	96
4.5.3	最优路径规划方法实现流程	97
	参考文献	98
5	地形匹配单元的组建	99
5.1	实时海底地形的获取与建模	99
5.1.1	单波束测深数据建模	99
5.1.2	多波束测深数据建模	101
5.1.3	DVL 测深数据建模	104
5.1.4	实时测深数据的选择模式	105
5.2	局部海底数字地形的插值重构	107
5.2.1	地形插值重构模型分析	107
5.2.2	双线性插值	109
5.2.3	基于分形补偿的双线性插值	111
5.2.4	海底地形插值重构精度统计特性	116
5.2.5	基于索引的快速插值策略	118
5.3	搜索区域的选择	120
5.4	参考水深偏差的消除	122
	参考文献	123
6	海底地形匹配导航算法	125
6.1	地形匹配导航算法的分类	125
6.2	地形匹配搜索定位算法	126
6.2.1	参数估计算法	126
6.2.2	脉冲耦合神经网络算法	136

6.2.3	ICP 算法	142
6.2.4	节点信息融合算法	147
6.2.5	搜索定位的有效性判定	155
6.3	地形匹配导航滤波算法	158
6.3.1	地形匹配导航的贝叶斯滤波模型	158
6.3.2	基于扩展卡尔曼滤波的地形匹配导航	160
6.3.3	基于无迹卡尔曼滤波的地形匹配导航	162
6.3.4	基于粒子滤波的地形匹配导航	165
6.3.5	基于高斯和滤波的地形匹配导航	173
6.3.6	基于点群滤波的地形匹配导航	177
6.4	海底地形匹配导航算法研究的发展方向	182
	参考文献	183
7	海底地形辅助导航系统	185
7.1	地形匹配导航对导航系统的修正方式	185
7.2	海底地形匹配导航的误差分析	188
7.2.1	实时地形获取误差	188
7.2.2	匹配算法误差	189
7.3	定位-跟踪模式的地形匹配导航策略	189
7.3.1	搜索定位规划点的设置	191
7.3.2	基于定位-跟踪模式的地形匹配导航流程	191
7.4	AUV 海底地形辅助导航系统	192
7.4.1	硬件系统	192
7.4.2	导航系统体系结构	193
7.5	AUV 海底地形辅助导航仿真系统	194
7.5.1	载体运动模块建模	195
7.5.2	参考导航模块建模	196
7.5.3	地形测量模块建模	197
7.5.4	仿真管理模块设计	197
7.5.5	仿真实验	199
	参考文献	202
	索引	203
	彩图	

绪论

21 世纪是海洋的世纪, 人类利用和开发海洋的重要工具——智能水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV) 受到各海洋强国的广泛重视, 得到越来越深入的研究。AUV 可应用于海底地形地貌探测、海洋环境监测、海底生物和矿产资源的勘测采样、海洋工程维护、小型沉物打捞等^[1-5]。

在 AUV 的各个子系统中, 导航系统的精度和可靠性直接关系到 AUV 是否能够顺利完成预定任务并安全返回, 因此, 构建精确、可靠、自主的导航系统一直是 AUV 研究的一个重要内容和关键技术^[6-8]。

1.1 AUV 水下导航技术

导航技术是指通过确定载体的位姿信息, 并引导载体沿一定航线从空间的一点运动到另一点的技术^[9]。大气层内的智能载体通常依靠无线电、扩频通信和全球定位系统 (global positioning system, GPS) 进行导航定位。由于高频信号在水下环境中会快速衰减, 以及 AUV 载体本身的特性, AUV 水下导航并不能照搬大气层内智能载体的导航方法。根据导航所采用传感器的不同, 常用于 AUV 的水下导航技术可根据图 1.1 所示进行分类^[10,11]。

从图 1.1 中可以看出, AUV 所使用的水下导航技术大致可分为三类: 惯性/航位推算导航、水声学导航、地球物理导航。

1. 惯性/航位推算导航

惯性导航系统 (inertial navigation system, INS) 通过对加速度计获取的数据和陀螺仪数据进行两次积分, 解算出当前的位置信息。近年来惯性导航的研究热点集中在融合多普勒测速仪^[12] (Doppler velocity log, DVL)、差分全球定位系统^[13]