



国防科技图书出版基金

Cooperative
Navigation Technology
for
Underwater Vehicles

水下航行器 协同导航技术

■ 刘明雍 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

水下航行器 协同导航技术

Cooperative Navigation Technology for
Underwater Vehicles

刘明雍 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

水下航行器协同导航技术 / 刘明雍著. —北京:
国防工业出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-118-09235-6

I. ①水... II. ①刘... III. ①可潜器-协同-导航-
研究 IV. ①U674.941.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043483 号

※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 $\frac{3}{8}$ 字数 228 千字

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 86.00 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 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助

的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

21 世纪是人类向海洋进军的世纪,是全世界大规模开发利用海洋资源、扩大海洋产业、发展海洋经济和争夺海上权益的新时期。我国是海洋大国,拥有广阔的海洋国土和绵长的海岸线,周边海域丰富的海洋生物和海底矿藏资源为我国经济和社会的可持续发展提供了重要的物质保证。然而,近年来我国海洋安全日益受到威胁,周边国家与我国在东海、南海因岛屿争端摩擦不断,监管力量薄弱,海域不断受到蚕食。海洋问题事关国家的全局战略,加强对海洋的探测与监控对维护我国主权和领土完整、实现中华民族的伟大复兴具有十分重要的意义。

令人遗憾的是,受海洋苛刻的自然条件及人自身的生理条件所限,人类对海洋的探索还处于比较肤浅的阶段。因此,必须借助于现代科技的力量,延伸人类在海洋中的“触角”。国家在“十二五”规划中明确提出要提高海洋科技水平,增强海洋开发利用和海洋权益维护能力。自主水下航行器(AUV)作为海洋探测力量的倍增器,可以在人类无法达到的大深度危险区域进行科学考察和军事活动,受到了世界各国的广泛重视,已投入大量人力物力从事 AUV 的研究工作。

作为发展自主水下航行器的关键技术之一,水下导航技术也随着科技的进步取得了长足的发展。自主水下航行器的协同导航是最近十年发展起来的新兴技术,在降低 AUV 系统配置、增强 AUV 间信息共享性、提高导航精度等方面具有独特的优势,但是目前相应的著作和文献还比较少见,未成体系。本书结合作者近年来的科研成果,力求对自主水下航行器协同导航技术进行全面、系统的介绍。

本书共分8章。第1章绪论,介绍了自主水下航行器的发展历史、几种传统的水下导航与定位技术、水下协同导航技术的发展概况及几种多AUV协作系统的应用实例。第2章介绍了协同导航所用到的数学基础知识,并给出了其数学模型。第3章研究了以移动长基线协同导航为代表的多领航者协同导航算法。第4、5章分别介绍了单领航者距离和方位测量以及单领航者测距的协同导航方法,并详细探讨了导航算法的设计和导航系统的可观测性、稳定性、定位精度等问题。第6章介绍了洋流干扰下的单领航者测距协同导航方法,并重点讨论了洋流估计方法以及洋流对协同定位精度的影响。第7章介绍了在通信数据丢包时的导航与定位方法,给出了量测数据服从Markov随机丢失下的改进扩展Kalman滤波协同导航算法。第8章从通信时延的角度出发,建立了协同导航系统的时延模型,研究了探测定常时延的辨识方法,并讨论了通信时延下协同导航中的滤波问题。

张立川副教授、李闻白博士、姚尧博士为本书的形成做出了卓越的贡献。在本书的写作过程中,杨盼盼博士、刘坤博士、雷小康博士、李红博士等也做了大量的工作。本书的写作得到了西北工业大学徐德民院士、贺昱曜教授,长安大学闫茂德教授的热情帮助,西安交通大学的高峰教授对原书稿进行了详细认真的审阅并提出了许多宝贵意见。此外,本书的写作还得到了国防科技图书出版基金评审委员会的资助和国防工业出版社的大力支持及具体指导,书中所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,衷心希望各位读者不吝批评指正。

作者
2013. 12. 28

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 自主水下航行器的发展概况	1
1.1.1 AUV 发展历史	2
1.1.2 国外发展概况	4
1.1.3 国内发展概况	5
1.2 导航与定位技术概述	7
1.3 水下导航与定位技术简介	9
1.3.1 航位推算与惯性导航方法	9
1.3.2 水声导航方法	10
1.3.3 地球物理导航方法	11
1.3.4 仿生学导航方法	12
1.3.5 组合导航方法	13
1.4 水下航行器协同导航技术简介	13
1.5 水下航行器协同导航技术研究现状	14
1.5.1 并行式协同导航	14
1.5.2 主从式协同导航	15
1.5.3 其他协同导航方法	17
1.6 水下航行器协作系统典型应用实例	18
1.6.1 欧盟“GREX”项目	18
1.6.2 美国自主海洋采样网络	19
1.6.3 美国新泽西大陆架观测系统	20

1.6.4 伊拉克战争 AUV 联合扫雷	21
参考文献	21
第 2 章 水下航行器协同导航数学基础与模型	24
2.1 水下协同导航数学基础	24
2.1.1 线性系统理论基础	24
2.1.2 Kalman 滤波理论	29
2.1.3 高等概率论基础	32
2.2 导航系统常用坐标系及其相互关系	37
2.2.1 导航系统的常用坐标系定义	37
2.2.2 AUV 运动参数定义	39
2.2.3 坐标系之间的转换	40
2.3 协同导航系统的感知传感器	42
2.3.1 内部传感器	42
2.3.2 外部传感器	42
2.4 多 AUV 运动学模型	43
2.4.1 单 AUV 三维空间运动学模型	43
2.4.2 单 AUV 二维平面运动学模型	45
2.4.3 多 AUV 运动学模型	47
2.5 多 AUV 水声网络模型	49
2.5.1 相对距离探测	49
2.5.2 相对方位量测	51
2.6 本章小结	53
参考文献	53
第 3 章 多移动领航者的协同导航	56
3.1 长基线水声定位系统	57
3.1.1 长基线水声定位原理	58

3.1.2	长基线水声定位基本算法	59
3.2	多移动领航者协同导航	60
3.2.1	多移动领航者导航原理	61
3.2.2	基于多边定位的多移动领航者协同导航	62
3.3	多移动领航者协同定位误差分析	65
3.3.1	定位误差的几种表示形式	65
3.3.2	Cramer - Rao 边界定理	66
3.3.3	定位误差的方差下界	67
3.4	多移动领航者协同导航仿真验证与分析	69
3.5	非线性滤波在多领航者协同导航中的应用	71
3.5.1	基于 EKF 的多移动领航者协同导航	71
3.5.2	基于 UKF 的多移动领航者协同导航	74
3.5.3	基于粒子滤波的多领航者协同导航	79
3.6	本章小结	82
	参考文献	82
第 4 章	单领航者距离和方位测量的协同导航	85
4.1	单领航者 AUV 协同定位的基本原理	85
4.2	基于相对距离和方位测量的协同导航滤波算法	87
4.2.1	单领航者 AUV 协同导航的运动学建模	87
4.2.2	基于扩展 Kalman 滤波的协同导航算法	91
4.3	协同导航算法性能分析	92
4.3.1	状态估计的误差传播	93
4.3.2	相对距离和方位量测的误差传播	96
4.3.3	协同定位误差的方差上界估计	104
4.4	数值仿真分析	108
4.4.1	与航位推算方法的对比仿真分析	108
4.4.2	航位推算误差和量测误差对协同定位精度的影响	111

4.4.3	初始滤波方差对协同导航算法收敛性的影响	114
4.5	本章小结	117
	参考文献	117
第5章	单领航者距离测量的协同导航	120
5.1	基于移动矢径的协同定位原理	121
5.1.1	移动矢径的概念	121
5.1.2	基于移动矢径协同定位的基本原理	121
5.2	基于扩展 Kalman 滤波的协同导航算法	123
5.3	协同导航系统的可观测性分析	124
5.3.1	系统的局部和一致可观测性	125
5.3.2	欠驱动特性对系统可观测性的影响	128
5.4	协同导航系统的稳定性分析	133
5.5	协同定位精度分析	141
5.5.1	航位推算误差对协同定位精度的影响分析	141
5.5.2	可观测性对协同定位精度的影响分析	143
5.5.3	欠驱动特性对协同定位精度的影响分析	149
5.5.4	滤波初值对协同定位精度的影响分析	151
5.6	本章小结	154
	参考文献	155
第6章	洋流影响下单领航者距离测量的协同导航	158
6.1	洋流影响下协同导航系统的可观测性分析	159
6.2	洋流影响下基于移动矢径的协同导航滤波算法	162
6.2.1	基于加权扩展 Kalman 滤波的协同导航算法	162
6.2.2	数值仿真分析	164
6.3	洋流影响下协同导航系统的稳定性分析	166
6.4	洋流对 AUV 协同定位精度的影响分析	174

6.4.1	洋流作用下航位推算误差对协同定位精度的影响分析	174
6.4.2	洋流幅度变化对协同定位精度的影响分析	175
6.4.3	洋流作用下采样周期变化对协同定位精度的影响分析	177
6.5	本章小结	181
	参考文献	182
第7章	通信受限下的协同导航——通信丢包	184
7.1	水声通信概述	184
7.2	Gilbert - Elliott 信道模型	186
7.3	通信受限下基于移动矢径的协同导航滤波算法	188
7.3.1	改进的扩展 Kalman 滤波协同导航算法	188
7.3.2	数值仿真分析	190
7.4	协同导航系统的稳定性分析	193
7.4.1	协同导航系统的峰值方差稳定性	193
7.4.2	几种不同稳定性定义之间的关系	201
7.5	信道参数对协同定位精度的影响分析	202
7.6	本章小结	206
	参考文献	207
第8章	通信受限下的协同导航——通信时延	209
8.1	多 AUV 协同导航时延模型	209
8.1.1	水声探测时延模型	209
8.1.2	水声通信时延模型	210
8.2	探测定常时延的在线辨识	210
8.2.1	定常时延辨识算法设计	211
8.2.2	定常时延辨识算法分析	212

8.2.3	仿真实验及结果分析	213
8.3	通信时延下的协同导航滤波算法设计	215
8.3.1	状态转换延迟滤波算法	215
8.3.2	解相关的一致延迟滤波算法	227
8.4	本章小结	242
	参考文献	242

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The state of the art of autonomous underwater vehicles	1
1.1.1 History of autonomous underwater vehicles	2
1.1.2 The development of AUVs in foreign countries	4
1.1.3 The development of AUVs in China	5
1.2 Introduction to navigation and localization technology	7
1.3 Introduction to underwater navigation and localization technology	9
1.3.1 Dead reckoning and inertial navigation method	9
1.3.2 Underwater acoustic navigation method	10
1.3.3 Geophysical navigation method	11
1.3.4 Bio-inspired navigation method	12
1.3.5 Integrated navigation method	13
1.4 Introduction to cooperative navigation technology for AUVs	13
1.5 The state of the art of cooperative navigation technology for AUVs	14

1. 5. 1	Parallel mode cooperative navigation	14
1. 5. 2	Leader-follower mode cooperative navigation	15
1. 5. 3	Other cooperative navigation method for AUVs	17
1. 6	Example of cooperative system for AUVs	18
1. 6. 1	“GREX” project of European Union	18
1. 6. 2	Autonomous Ocean Sampling Network	19
1. 6. 3	New Jersey Shelf Observing System	20
1. 6. 4	Cooperative mine sweeping in Iraq war	21
	Reference	21

Chapter 2 Mathematical basis and model for the cooperative navigation of AUVs 24

2. 1	Mathematical basis for the cooperative navigation of AUVs	24
2. 1. 1	Foundations for linear-system theory	24
2. 1. 2	Kalman filtering theory	29
2. 1. 3	Foundations for advanced probability theory	32
2. 2	Coordinates in navigation system and correlations	37
2. 2. 1	Definition of coordinates in navigation system	37
2. 2. 2	Definition of motion parameters for AUVs	39
2. 2. 3	Transformation of coordinates	40
2. 3	Sensors for cooperative navigation system	42
2. 3. 1	Internal sensors	42
2. 3. 2	External sensors	42

2.4	Kinematics model for multiple AUVs	43
2.4.1	Kinematics model in three-dimensional space for a single AUV	43
2.4.2	Kinematics model in two-dimensional plane for a single AUV	45
2.4.3	Kinematics model for multiple AUVs	47
2.5	Underwater acoustic network model for multiple AUVs	49
2.5.1	Relative distance measurement	49
2.5.2	Relative bearing measurement	51
2.6	Summary	53
	Reference	53

Chapter 3 Cooperative navigation with multiple moving

	leaders	56
3.1	Long baseline acoustic localization system	57
3.1.1	Principle of long baseline acoustic localization	58
3.1.2	Basic algorithm of long baseline cooperative localization	59
3.2	Cooperative navigation with multiple moving leaders	60
3.2.1	Principle of cooperative navigation with multiple moving leaders	61
3.2.2	Multilateral localization based cooperative navigation with multiple moving leaders	62
3.3	Error analysis for the cooperative localization with multiple moving leaders	65