

# 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展

徐博<sup>1</sup> 白金磊<sup>1</sup> 郝燕玲<sup>1</sup> 高伟<sup>1</sup> 刘亚龙<sup>1</sup>

**摘要** 自主水下航行器 (Autonomous underwater vehicle, AUV) 协同导航是未来 50 年解决水下中间层区域 AUV 导航定位的重要方法. 本文针对多 AUV 协同导航, 对该领域相关问题的研究进展进行了综述, 包括: 1) 论述多 AUV 协同导航领域的研究现状, 包括协同导航问题界定、特点综述与讨论; 2) 分析多 AUV 协同导航系统模型及相关算法的研究进展, 包括基于优化的、基于参数估计的和基于贝叶斯估计的滤波算法; 3) 对协同导航网络下的误差建模与补偿方法的研究进展进行了综述, 包括未知洋流的影响、水声通信延迟补偿等; 4) 从影响协同导航定位精度的角度出发, 对 AUV 协同导航的可观测性与编队最优构型设计的研究进展进行了一系列的分析; 5) 陈述目前多 AUV 协同导航中存在的 key 问题, 并讨论其发展趋势.

**关键词** 多 AUV 协同导航, 水声通信延迟, 信息融合算法, 编队构型

**引用格式** 徐博, 白金磊, 郝燕玲, 高伟, 刘亚龙. 多 AUV 协同导航问题的研究现状与进展. 自动化学报, 2015, 41(3): 445–461

**DOI** 10.16383/j.aas.2015.c140047

## The Research Status and Progress of Cooperative Navigation for Multiple AUVs

XU Bo<sup>1</sup> BAI Jin-Lei<sup>1</sup> HAO Yan-Ling<sup>1</sup> GAO Wei<sup>1</sup> LIU Ya-Long<sup>1</sup>

**Abstract** Cooperative navigation and localization of autonomous underwater vehicles (AUVs) is a significant approach for solving the navigation problem in middle depth zone of underwater condition in the next fifty years. The issue and research development of autonomous underwater vehicle cooperative navigation are reviewed in this paper. 1) The actual development state of multi-AUV cooperative navigation research is introduced including the problem definition, the characteristics analysis, discussion of cooperative navigation, etc. 2) Multi-AUV navigation models and the progress of algorithms are analyzed, including the method based on optimization, parameter estimation and Bayesian estimation filtering algorithm. 3) The development on error model and compensation method of cooperative navigation network, including the unknown currents impact and underwater acoustic communication delay compensation. 4) The research progress on formation design of AUV from the perspective of effect on cooperative navigation and position accuracy. 5) Key problems and development trend of multi-AUV cooperative navigation are described.

**Key words** Cooperative navigation of multi-AUVs (autonomous underwater vehicles), acoustic communication delay, information fusion algorithm, formation configuration

**Citation** Xu Bo, Bai Jin-Lei, Hao Yan-Ling, Gao Wei, Liu Ya-Long. The research status and progress of cooperative navigation for multiple AUVs. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(3): 445–461

自主水下航行器 (Autonomous underwater vehicles, AUVs) 是无人水下航行器 (Unmanned underwater vehicle, UUV) 的一种, 综合了人工智能、

先进计算技术控制系统、计算机软件、能量储存、传感器、新材料、新工艺和智能武器等高科技产物. 由于 AUV 摆脱了缆线的束缚, 在水下作战和水下作业方面更加灵活机动. 无论在军事侦察与监视、反潜与巡逻、还是海洋测绘、海洋资源勘探、潜水支援等领域都发挥着重要作用, 是当前海洋工程领域的研究热点<sup>[1]</sup>.

目前, 水下导航问题依然是 AUV 面临的一个主要技术挑战. 多 AUV 通过信息的共享, 使各艇都具有误差有界的定位能力, 当某些艇受到环境或传感器的影响导致导航能力丧失的时候, 通过协同导航可以使这些艇的导航能力得到一定程度的恢复, 成为 AUV 导航的热点研究问题. 对协同导航的研究起始于 20 世纪末, 其中针对的平台对象涉及陆上机器人<sup>[2–4]</sup>、卫星<sup>[5–6]</sup>、水下无人航行器<sup>[7–8]</sup>等. 近 10 年以来, 美国 Minnesota 大学 Roumeliotis 领导的研究小组对机器人协同定位基础理论进行了一系列

收稿日期 2014-03-03 录用日期 2014-08-18  
Manuscript received March 3, 2014; accepted August 18, 2014  
国家自然科学基金 (61203225), 黑龙江省自然科学基金 (QC2014C069), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20102304110021), 总装预研项目题目 (51309040602), 中央高校基本科研业务费专项基金 (HEUCF110427), 中国博士后科学基金 (2012M510083) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (61203225), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (QC2014C069), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20102304110021), Assembly and Pre-research Project Title (51309040602), Fundamental Research Special Funds for the Central Universities (HEUCF110427), China Postdoctoral Science Foundation (2012M510083)  
本文责任编辑 孙富春  
Recommended by Associate Editor SUN Fu-Chun  
1. 哈尔滨工程大学导航技术与设备研究所 哈尔滨 150001  
1. Navigation Technology and Equipment Research Institute, Harbin Engineering University, Harbin 150001

的研究工作,包括可观测性分析<sup>[3,9]</sup>、误差分析与补偿<sup>[10-11]</sup>、分析估计一致性<sup>[12-13]</sup>、编队构型优化<sup>[14]</sup>等。

近年来,美、法、英等传统的军事强国在协同技术领域的应用方面处在世界前列,并且已经开发出具有具体型号交付部队使用,战场上智能机器人大多配合士兵进行危险区域侦查和排雷工作,大大降低了士兵伤亡率,在机器人与士兵协同过程中,实现协同的前提是对己方人员进行准确的定位。麻省理工大学由 Bahr 等组成的研究团队在利用水面艇和不利用水面艇的两种条件下,分别研究了潜航器的协同定位方法<sup>[7]</sup>。意大利 Garello 等研究团队开展了一系列工作<sup>[15-17]</sup>,研究了协同定位对终端平均捕获时间的影响,以及一些特定场景下的定位性能并比较了几种常见定位算法的性能。欧盟开展的多水下潜航器项目 MAUVs GREX 中,研究人员提出了在无水声定位的情况下只利用航迹推算和潜航器之间的距离量测<sup>[11]</sup>完成潜航器协同定位的方案<sup>[18]</sup>。隶属于 L-3 公司下属的 IEC 通信公司对基于地球同步卫星的分布式协同导航方法开展了研究<sup>[19]</sup>,同时该公司还对悉尼大学研究中心给予资金上的资助,进行协同导航算法相关的研究。Roumeliotis 等建立了一种集中定位的分散式卡尔曼框架<sup>[3]</sup>,将联合协方差的协关系分布在不同平台上,理论上该方法可以被用于庞大的编队系统。

我国在 AUV 协同技术领域的应用处于初级阶段,西北工业大学的张立川等进行了 AUV 协同导航的性能分析<sup>[20]</sup>,沈阳自动化所研究提出了一种分布式系统结构<sup>[21]</sup>,并成功设计出了一种多机器人协作装配系统。国内相关研究大多集中在协同导航算法、路径规划、编队队形以及编队控制等方面。随着我国海洋开发与应用领域的不断发展,协同技术的研究工作与实际应用将会得到更加快速的发展。

本文首先介绍了多 AUV 协同导航问题界定、特点综述与讨论,针对协同导航中的数学模型及相关算法的研究进展(多 AUV 协同导航问题模型、基于优化的滤波算法、基于贝叶斯估计的滤波算法)、协同导航网络下的误差建模与补偿方法(水声通信延迟与测距误差的建模与补偿、未知洋流的影响与估计)、协同导航编队构型设计方法的研究进展,重点分析这三个方面的研究状况,最后阐述协同导航面临的关键问题及该领域的发展趋势。

## 1 多 AUV 协同导航领域的研究现状

### 1.1 多 AUV 协同导航问题的界定及其定义

#### 1.1.1 协同的概念

协同原本指的是一种物理和化学现象,也称为

协同作用,是指两种或多种组分一起加入,混合在一起,所产生的作用大于各种组分单独应用时作用的总和。而其中对混合物产生这种效果的物质称为增效剂。协同效应常用于指导化工产品各组分组合,以求得最终产品性能增强<sup>[22]</sup>。

赫尔曼·哈肯(德国物理学家)在上世纪 70 年代第一次提出了协同的定义,并出版了相关书籍《协同学导论》等,对协同理论进行了系统地阐述和分析<sup>[23]</sup>,指出整体环境中存在的若干子系统,它们之间有着相互作用、相互影响的联系,并非是独立存在的。在社会中类似的现象比比皆是,比如企业中的各个单位既会相互干扰和制约,又会相互配合和协作等。可以将一个企业看成协同系统,利用协同操作来实现资源的有效利用。这样的企业整体效益大于独立作用的总和的一部分,常常被描述为“ $2 + 2 = 5$ ”或“ $1 + 1 > 2$ ”。

Andrew 等于 2000 年在《战略协同》中形容:“协同就是‘搭便车’。当企业的其他部分可同时、无成本利用另一部分累积资源的时候,协同效应就会发生”。另外,关于协同效应和互补效应,他从资源形态和资产特性的视角分析<sup>[24]</sup>,解释说明了二者的异同点,可以简单概括为“协同效应的实现主要是通过使用隐性资产,而互补效应的实现是通过使用可见资源”。2004 年, Tim Hindle 对 Andrew 等关于实现企业之间相互协同的方式进行归纳总结,提出企业可以通过对资源共享、垂直整合、与供应商谈判、协调策略和其他的方法来实现业务的协同作用。

#### 1.1.2 多 AUV 协同导航概念的提出

作为导航定位领域最具研究前途的方向之一<sup>[25-27]</sup>,协同定位在无线移动网定位、卫星定位及自主水下航行器(AUV)定位<sup>[28]</sup>等研究中正在成为一个新兴的研究主题,受到业界和学术界愈来愈多的关注。由于 AUV 导航系统必须在长时间跨度、远距离范围提供精确位置信息、速度信息和姿态信息,同时还必须考虑体积、质量、能量约束和特殊水下环境、隐蔽性和其他因素,使得实现 AUV 的精确导航定位成为一项艰巨的任务<sup>[20]</sup>。

AUV 导航主要可以分为两类:基于自身敏感器件信号的自主导航与基于外部信号的非自主导航。按照工作方式,可以分为惯性导航、地磁辅助导航、无线电导航、地形匹配导航、光学导航、声学导航、仿生学导航、重力场辅助导航等导航系统。根据使用区域不同,又可以分为 3 层:近海面区域(水深  $< 300\text{ m}$ )、中间层区域( $300\text{ m} < \text{水深} < 2000\text{ m}$ )、海底区域(距海底  $< 100\text{ m}$ ),如图 1 所示,近海面区域可以使用的导航技术有无线电和卫星导航,如 GPS、GLONASS、北斗系统等;海底区域可以利用

海底地形匹配进行导航; 中间层区域距离水面相对远, 无法接收卫星广播信号, 与底部也有相当的距离, 不能获得绝对速度和地形信息, 另外基于海底基阵布设的声学导航也不再适用, 导航问题相比另外两层更加困难. 该区域内能够使用的导航技术有重力场辅助导航、地磁辅助导航、惯性导航等, 因此基于多 AUV 间测距与通信的协同导航应运而生, 导航系统分析见图 1 和表 1 所示. 协同导航能够提高整个 AUV 编队的导航精度, 成为解决水下中间层区域多 AUV 导航的重要技术方法.

### 1.1.3 多 AUV 协同导航特殊性讨论

和其他平台相比, 多 AUV 的协同导航在运动方式、工作环境、设备配置、工作时间与负载等方面都有其特殊性:

1) AUV 担负着神圣的工作使命, 需要执行水下巡逻、探测甚至进攻等任务, 根据其工作剖面模式, 在水中的运动已成为 6 自由度的空间运动, 包括下潜、上浮、定深直航、变深潜浮、转向机动等. AUV 在水中同时受到重力、浮力与水的阻力等同时作用, 推进动力参数、外测速度参数、姿态参数的变化规

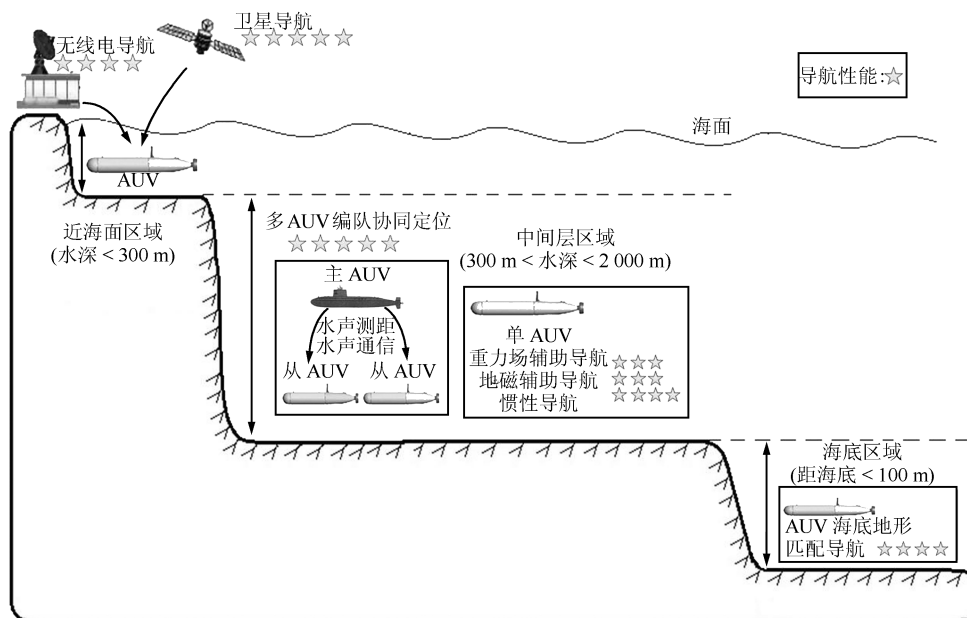


图 1 水下各层导航示意图

Fig. 1 Underwater layers navigation schematic

表 1 导航系统分析

Table 1 The analysis of navigation system

适用区域	名称	特点	导航精度
近海面水域 (水深 $\leq 300$ m)	无线电导航	将导航信息通过无线电波发送给 AUV, 以测定航位和引导航行	罗兰 -C 系统 <sup>[29]</sup> CEP 在几十米内
	卫星导航	AUV 接收卫星的导航信息, 进行导航, 精度高, 实时性好	北斗系统 <sup>[30]</sup> CEP 优于 10 m
中间层水域 (300 m $\leq$ 水深 $\leq 2000$ m)	地磁场辅助导航	将地磁基准图网格化后存储于计算机中, 由磁力仪实时测得地磁数据序列, 以进行匹配导航, 干扰信息大	水下定位 <sup>[31]</sup> CEP 优于 500 m
	重力场辅助导航	与地磁场辅助导航类似, 利用重力场的物理特性来辅助导航, 干扰信息大	CEP 精度 <sup>[32]</sup> 优于 62 m
	惯性导航	利用惯性敏感器件进行航位推算, 误差随时间积累	精度达航程 <sup>[32]</sup> 的 0.02 %
	协同导航	多 AUV 间测距与通信, 实现导航信息共享与互相修正, 提高 AUV 编队导航精度	CEP 范围在几米至几十米内
海地区域 (距海底 $\leq 100$ m)	海底地形匹配导航	将测得海底地形与存储的地形图进行比较, 来决定 AUV 自身的位置	CEP 在 50 ~ 100 m 范围内 <sup>[33]</sup>

律和地面上的运动机器人等平台的运动有着本质的区别。

2) 水下恶劣复杂的工作条件决定了 AUV 必须具备体积小、重量轻、低功耗的要求, 还要考虑避碰等问题, 同时水下环境的特殊性, 如未知的洋流、复杂的水文、地形环境等, 也给导航带来很多的瓶颈。也就是说对其控制和操作必须更加准确, 对多 AUV 协同导航精度提出了更高的要求。

3) 和其他多平台协同导航相比, 水下环境决定了 AUV 只能以惯性导航设备、DVL (Doppler velocity log) 和水声通信与测距装置为核心传感器, 使用基于相对位置测量的滤波模型, 目前惯性导航短航程条件下定位精度高, 但误差会随时间不断累积, 使导航精度降低; 声学测距精度较高, 但需在载体上安装相应水听器, 并且和无线通信相比, 必然存在通信时间延迟、传输距离受限等问题。

由于上述问题的存在, AUV 协同导航系统精度的提高需要从多方面进行考虑<sup>[34]</sup>。从 AUV 内部影响因素方面考虑, 需要精确建立协同导航模型, 同时选用恰当的协同导航算法。从系统中各 AUV 的艇间影响因素方面考虑, 需对协同导航网络中的误差因素, 如通信延迟、洋流等进行补偿。从整个多 AUV 协同系统的方面进行考虑, 需对协同导航系统中的编队构型进行优化设计。如图 2 所示

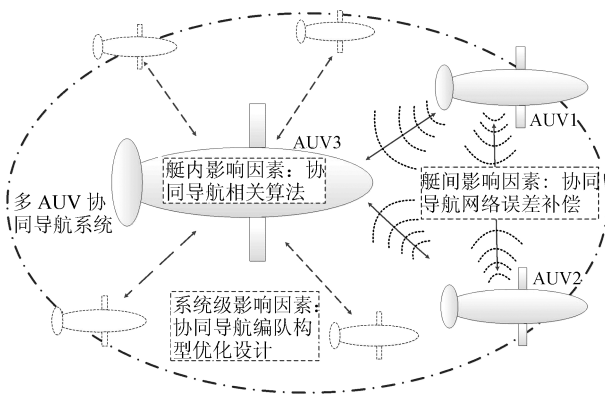


图 2 多 AUV 协同导航精度的影响因素

Fig. 2 Factors of multi-AUV cooperative navigation accuracy

## 1.2 多 AUV 协同导航结构分类

常见的多 AUV 协同导航方式主要可以分为两种: 1) 主从式 (Leader-follower) 协同导航方法 (高低精度搭配); 2) 并行式协同导航方法 (各艇精度相当)。相比主从式协同导航方法, 并行式的协同导航方法不能在根本上协调多 AUV 系统导航的低成本与高精度间的关系。所以, 主从式的协同导航方式是多 AUV 协同导航领域目前研究的主流和重点。

协同导航应用从融合结构的角度的可以分成分散

式、分层式与集中式三种。下面针对 4 个节点组成的系统, 给出相应的三种结构示意图。

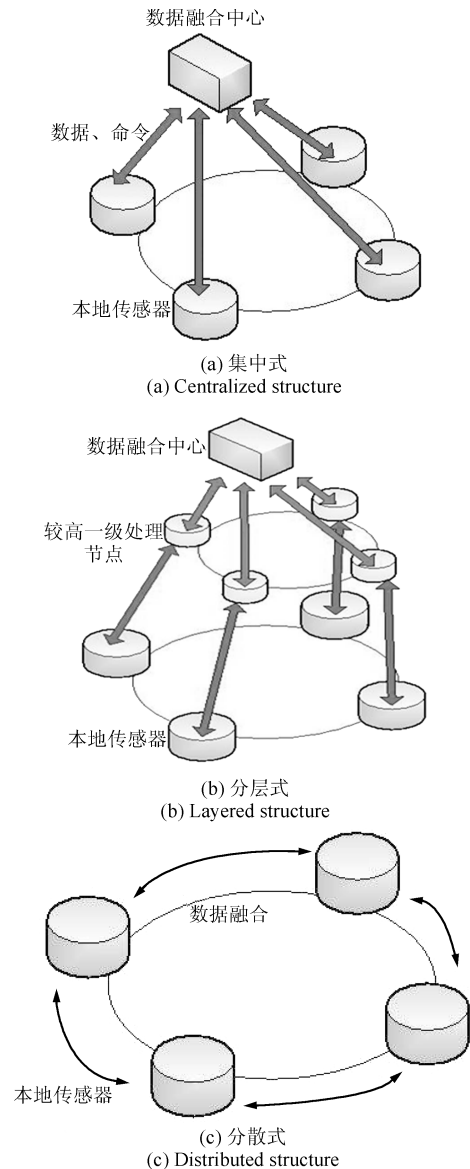


图 3 数据融合的结构图

Fig. 3 Structure of data fusion

集中式结构中, 各 AUV 原始的测量信息被输送至同一个数据处理中心, 然后在这里独立进行数据融合过程。该结构直观、简单, 运行流程清晰。同时缺点也很明显, 容错性不好, 处理中心的故障会导致整个系统瘫痪; 灵活性也不好; 原始信息达到一定程度时, 通信量极其庞大<sup>[35]</sup>。

分层式结构中, 各 AUV 进行一定处理后逐级上传, 最后由最高级节点进行全局估计。分层式数据融合算法容易隔离故障, 但是处理中心仍然存在, 限制了系统的可扩展性、降低其鲁棒性<sup>[24]</sup>。

分散式结构中的每个 AUV 均处理本地信息, 艇

间可相互通信. 因此分散式结构是一种无中心的、无依赖的结构. 这一优点增加了自主解决问题、灵活性和适应性强等优点, 部分单元不工作不影响整体工作. 然而其对通信技术的要求也较高, 使得全局优化时不易找到最优解. 虽然其应用有一定难度, 但仍不失为一种优良的数据融合算法<sup>[12]</sup>.

## 2 多 AUV 协同导航模型及相关算法的研究进展

国内外专家学者从不同的角度出发, 针对多 AUV 协同导航算法开展了相关的分析, 涉及多个学科领域. 从核心算法的角度分类, 大致可以分成基于优化理论的导航算法、基于图论的导航算法和基于贝叶斯估计的导航算法三大类; 其中贝叶斯估计又涉及卡尔曼滤波、粒子滤波等, 这些算法均以状态空间模型为理论基础.

### 2.1 以优化理论为基础的多 AUV 协同导航算法

通过优化技术来实现算法的方式不尽相同. 有些对求解导航状态进行近似, 拆分成若干子问题, 并分别应用优化技术求解每个子问题. 有些则是利用某种优化技术对整个协同导航问题进行求解, 之后找到优化算法的等价形式.

文献 [3] 采用极大似然估计分析多运动平台协同导航, 并且利用其中的 4 个移动平台进行的相关实验验证. 文献采用的思路是将整体状态的估计进行拆分, 分解成若干个子问题, 之后每个平台相应解决一个子问题, 也就是依据与其他平台间的相对测量以及自身运动测量数据完成局部优化, 优化求解的过程中, 通常把其他平台的定位信息当作常值进行处理. 由于没有考虑各平台间的相关性, 所以可能会引起过优估计.

协同导航可以归类于二次约束二次规划问题, 并通过拉格朗日松弛原理把它转化成凸优化问题进行求解. 和贝叶斯估计 (如卡尔曼滤波) 相比, 这种算法忽略了各平台状态之间的相关性以及模型的线性化, 从而得到一致的估计结果<sup>[36]</sup>. 该算法针对静止条件下的多平台协同定位, 但是经过进一步推广, 能够应用到多运动平台中, 并且它的分散式实现只需要各个平台之间进行观测信息交流.

在协同定位的建模问题中, 可以利用非线性最小二乘法对建模方式进行优化, 采用 Levenberg-Marquardt 最小化算法求解方程组, 用极大验后估计出系统的状态结果<sup>[37]</sup>. 利用分布式技术来实现共轭梯度法与高斯-约旦法是该方法的核心部分. 但此方法关于平台间计算的同步性要求严格, 存在一定的缺陷.

李代数均值法可用来分析多平台的协同定位.

在协同定位过程中, 将不同时刻单一平台的或同一时刻不同平台的相对位姿在特殊欧氏群中表示, 再通过李代数完成李群均值的定义, 将平台间相对位姿信息融合, 进而得到每个平台的位姿估计; 最小二乘法是此算法的核心<sup>[38]</sup>. 文献 [39] 则采用分散式数据融合结构, 每个平台都视为数据处理中心, 估计本身姿态信息, 同时广播自身的解算信息以及与其他平台间的相对观测数据, 在利用李代数均值法进行协同导航时, 平台的运动模型误差对其影响很小. 然而在理论上, 此方法的性能分析不足, 如何保证此方法的有效性有待于进一步的探索和研究.

### 2.2 基于图论的多 AUV 协同导航算法

利用图论理论对协同导航问题进行建模是一种独特的思路. 首先建立协同导航问题的测量图模型, 此时全体平台所有历史时刻的导航状态与测量图的结点集合相对应. 传感器的测量与测量图的边相对应, 包含相同时刻不同平台间的相对测量与同一平台在相邻时刻的运动测量.

文献 [40] 引用这种思路, 通过对线性方程组进行迭代求解, 得到最优线性无偏估计; 针对每个平台建立测量子图, 子图包含状态信息, 其边与自身状态结点相关联, 结点含有自身状态和相邻状态. 各平台将相邻状态视为已知量, 并利用它估计自身状态. 迭代完成后, 广播当前估计, 并接收邻居状态的最新估计, 然后进行下一次迭代. 该算法的估计结果在没有先验知识的情况下等价于卡尔曼滤波估计. 不管平台间是异步迭代还是同步迭代<sup>[41]</sup>, 计算结果都渐近收敛于集中最优估计, 对于动态平台系统来说, 进行最优线性无偏估计时, 存储量和计算量随时间增长而趋于极大, 为了抑制计算量和存储量的增加, 只近似估计近期状态, 在尽量不损失精度的情况下, 保证了算法的实时性和有效性.

在多 UUV 的路径跟踪控制中, 为了减少通信数据量, 引入了代数图论, 解析具有复杂通信拓扑结构的数学表达, 设计协调控制器, 得到期望的速度; 李雅普诺夫判据证明系统在任意球域内指数稳定, 验证了多 UUV 能够保持编队构型, 实现路径跟踪<sup>[42]</sup>. 该方法可以推广到多 AUV 系统中, 原理相近.

### 2.3 基于贝叶斯估计的多 AUV 协同导航算法

#### 2.3.1 基于 Kalman 滤波的协同导航算法

卡尔曼滤波 (Kalman filter, KF) 是协同导航算法中最常见也最基本的方法之一, 围绕着算法精度、稳定性和通信量、计算量, 国内外学者做了大量的相关工作.

针对同一个观测量被多次融合造成的过优估计

和滤波发散的问题,文献 [7] 提出采用多个子卡尔曼滤波器的分散策略. 但方差矩阵传播引起较大通信量. 为此, 针对一种针对水下潜航器, 文献 [43] 提出用群发测量值来完成协同导航定位. 在此条件下各潜航器可以获得其他平台的运动测量值以及它与任意平台间的相对测量值, 可以采用卡尔曼滤波对整个潜航器群的状态量进行估计, 以计算量的增加为代价达到降低通信量的目的.

针对基于非线性模型的水下潜航器协同导航, 文献 [44] 设计了基于无迹卡尔滤波 (Unscented Kalman filter, UKF) 算法来避免非线性方程的线性化, 但是其采用主从式导航方式, 对主潜器依赖性较高. 对于多 AUV 编队在未知环境中的问题, 文献 [45] 采用基于 BP (Back propagation) 神经网络优化的扩展 KF 滤波算法, 有效降低系统的不稳定性, 但其算法略显复杂. 文献 [46] 分析了扩展卡尔曼滤波方法 (Extended Kalman filter, EKF) 与平台分布和运动的关系及存在的缺陷, 提出了改进措施, 使该方法的可靠性和实用性得到增强, 但没有对算法复杂度进行分析, 因此算法应用于大规模系统时, 性能优劣不得而知.

基于 KF 的协同导航定位实现形式较多. 有的算法简单易行, 但无法保证估计的最优性; 有的估计精度虽然很高<sup>[43, 47]</sup>, 但是计算量很大或者通信复杂.

### 2.3.2 基于粒子滤波的协同导航算法

自 20 世纪 90 年代以来, 粒子滤波的提出受到了相关研究人员的强烈关注, 协同导航领域也不例外. 如图 5 所示. 基于粒子滤波的协同导航从平台间是否共享粒子的角度可以分成两种; 1) 各平台均进行完整的粒子滤波. 文献 [48] 对平台间相对观测带来的相关性进行简化, 各平台融合自身的运动传感器信息、对环境的感知信息以及平台间的相对观测信息, 利用蒙特卡洛滤波来对自身导航状态进行估计. 其简化了相关性, 容易使估计结果成为过优估计. 2) 平台间共享部分粒子信息, 例如基于三边定位原理的多平台协同导航<sup>[49]</sup>, 这种方法只利用到同一个三角形之内平台间的相对测量, 没有利用隶属不同三角形的平台间的相对测量. 值得注意的是同 H-SPAWN 算法相似<sup>[50]</sup>, 该算法需要一个较为精确的初始位置, 可以考虑使用卡尔曼滤波对粒子滤波进行初始化.

### 2.3.3 基于信息滤波的协同导航算法

信息滤波是以信息矩阵为参数的高斯滤波, 较卡尔曼滤波具有不同的计算特征<sup>[51-52]</sup>, 如图 6 所示, 可完成更简单的估计更新, 更容易解耦和分散, 对于非线性的协同导航模型来说, 绝大多数采用的是信息滤波的扩展形式. 基于信息滤波的文献大多是基于降低滤波算法的计算量和通信量展开的.

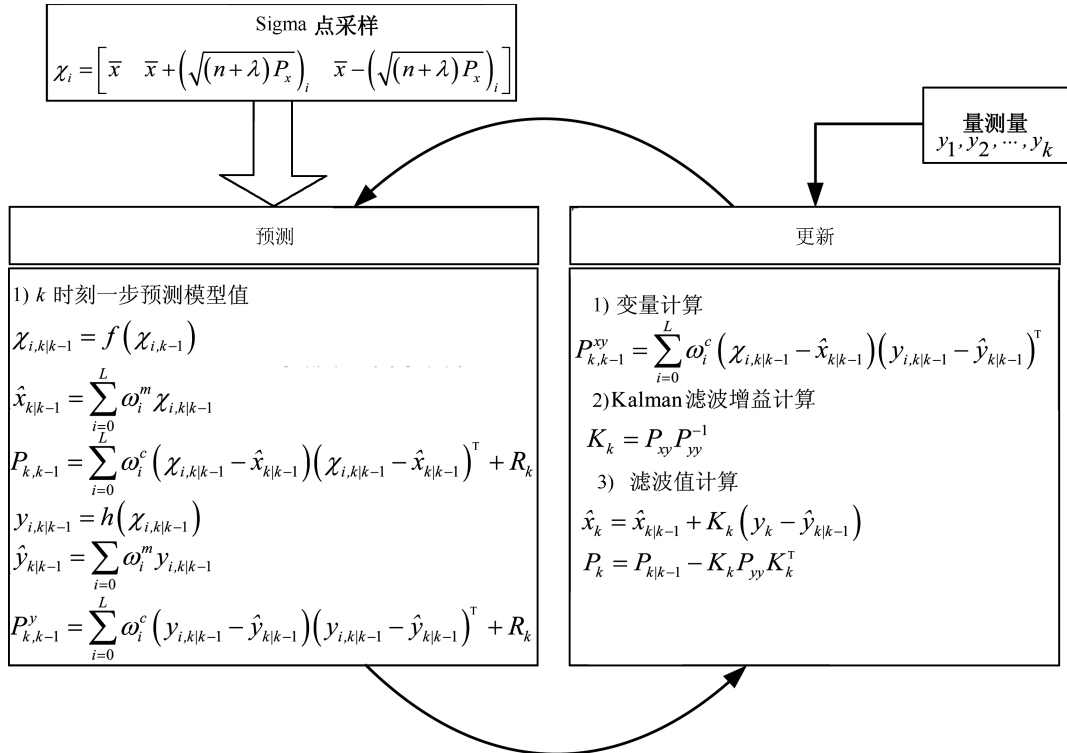


图 4 UKF 算法流程

Fig. 4 UKF algorithm process

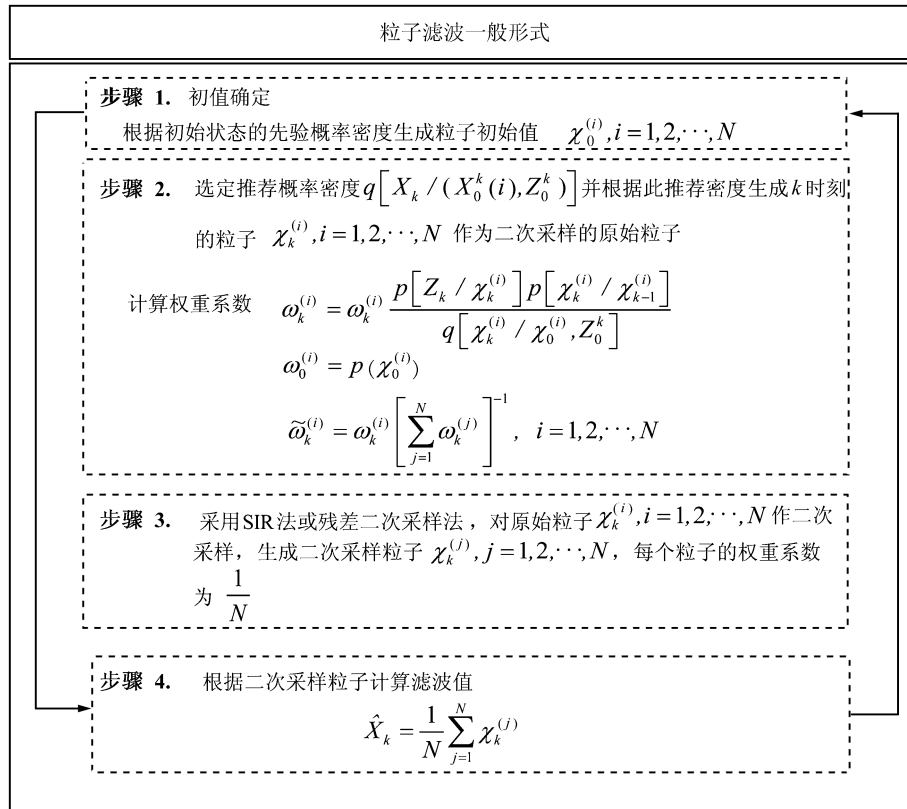


图 5 粒子滤波算法流程

Fig. 5 Particle filter algorithm process

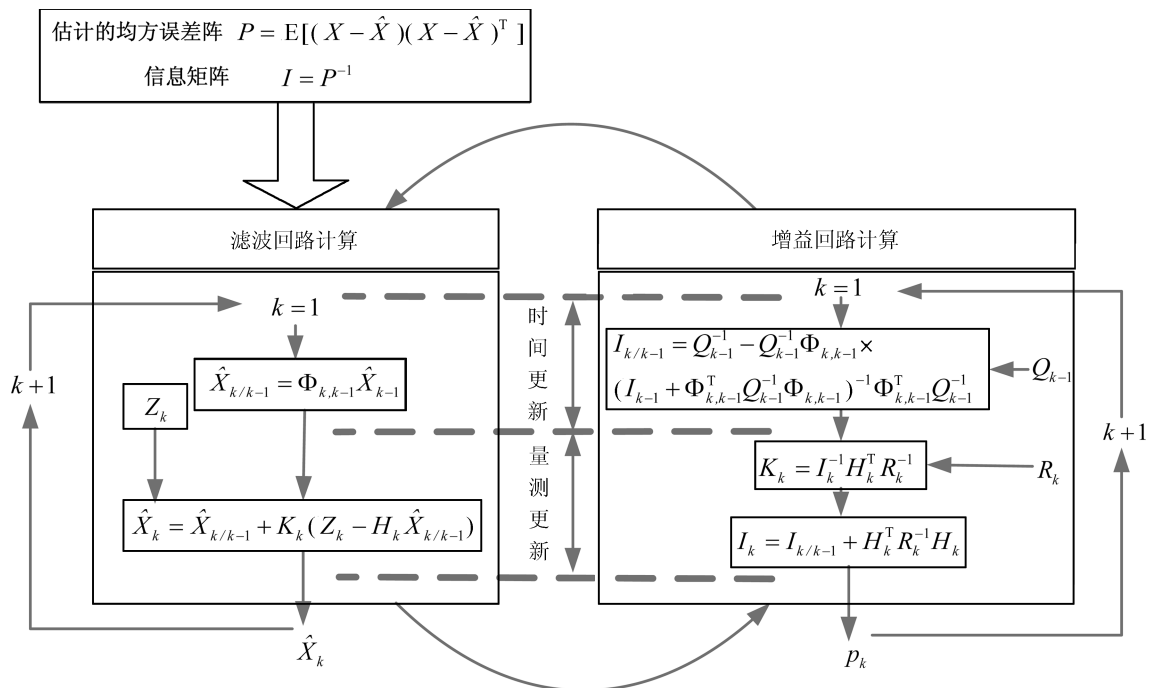


图 6 信息滤波算法流程

Fig. 6 Information filtering algorithm process

针对扩展信息滤波的两个缺点: 泰勒级数线性化的精度限制和雅可比行列式的估算问题, 文献 [53] 提出了中心差分信息滤波 (Center differential information, CDIF), 进行非线性估计和传感器融合, 在进行 SPIFS (Sigma point information filters) 结构的 Sigma sign 生成中, 同等精度条件下所需参数更少, 计算量更小. 文献 [54] 研究了稀疏扩展信息滤波, 使得可扩展的 SLAM (Simultaneous localization and mapping) 研究有了新的方向, 针对近似稀疏过程和它对构图误差一致性的影响问题, 提出一个稀疏化过程的细微修正法. 文献 [55] 在此基础上提出了一种新的基于稀疏扩展信息滤波算法的双

视觉同步定位和构图方法, 用于处理 SLAM 中数据融合规模随着地图的增加而增加的问题. 该方法用在视觉 SLAM 中可以显示 SEIF (Sparse extended information filter) 算法的计算复杂度是一个恒量, 不依赖于环境特征.

文献 [35] 针对协同导航常用滤波方法计算量和通信量过于复杂、工作均衡性不佳等问题, 研究出基于分散式增广信息滤波 (Distributed augmented information filter, DAIF) 的多艇协同导航方法, 引入马尔科夫随机场进行辅助设计, 使用“累积链式”通信管理, 完成状态恢复在动态分布式环境中的实现, 为分散式数据融合提供新的科学依据.

表 2 常用滤波算法对比

Table 2 The comparison of common filtering algorithm

名称	理论基础	适用条件	算法特点分析	
极大似然估计	非随机参数估计方法	对系统模型无明确要求	不需要待估参数的验前知识, 计算较简单, 可忽略各平台间相关性, 但易造成过估估计	
基于优化理论	二次约束二次规划	拉格朗日松弛将其转化为凸优化问题求解	对系统模型无明确要求	不考虑平台状态间的相关性及模型线性化, 可以给出一致估计结果; 计算较复杂
的协同算法	非线性最小二乘	采取 LM 最小化算法完成迭代求解	非线性系统	1) 估计结果为极大验后估计; 2) 对平台间计算同步要求严格; 3) 减少存储和步骤; 4) 降低计算量的同时保持较高精度
法	李代数均值法	把各艇状态在特殊欧氏群中表示, 用李代数定义李群的均值	非线性系统	1) 对平台的运动模型误差敏感; 2) 需要测量各平台间的相对姿态; 3) 对存储量的需求是一个与时间无关的有界常量, 对时间同步的要求有待研究
基于图论的协同算法	高斯影响图算法	由先验概率和似然函数求得后验概率	高斯线性二次型模型	贝叶斯原理图形化表达, 形象直观; 属于直接算法, 较复杂, 但过程直观
	联合树算法	用联合树表示估计量的概率分布	适用于任意的贝叶斯网络	1) 引入树这一拓扑结构和簇的概念; 2) 降低了平台间计算同步的要求; 3) 精确推理中的间接算法, 较复杂; 4) 具有动态性和分布性, 是概率分布的图形化表达
	马尔科夫随机场	使用马尔科夫随机场进行描述	可建立贝叶斯网络系统	1) 状态观测更新直接在马尔科夫随机场上操作, 直观; 2) 精度与信息滤波相当; 3) 对运动模型有严格限制
基于贝叶斯估计的协同导航算法	无迹卡尔曼滤波 UKF	基于 UT 变换的点拟合	观测方程为线性高斯, 状态方程属于非线性高斯	1) 不必线性化, 免雅阁比矩阵求取; 2) 在高维系统中出现数值不稳定及精度降低复杂度和计算量均大于 KF、EKF; 3) 非线性越强, 和 EKF 相比优势越明显
	CKF	Cubature 准则选取点集, 对概率分布均值方差进行参数化	任何形式的非线性模型	无需对非线性模型进行线性化, 算法相对独立, 计算量大, 在线实时计算困难
	粒子滤波 (PF)	非线性变换求取样本点, 合成被估计状态的均值和方差	任何非线性、非高斯系统	1) 估计误差会收敛于零, 条件是使用的粒子数趋于无穷; 2) 粒子滤波的运算量大、精度高; 3) 只有在非线性、非高斯条件, 在估计精度上的优势才能体现
	信息滤波 (IF)	基于信息参数描述线性最小方差估计	状态方程和量测方程均为线性高斯分布	1) 联合状态的信息矩阵是稀疏矩阵; 2) 信息参数物理意义不明确, 需要进行状态恢复; 3) 滤波精度等同于 KF, 可避免状态初值造成的均方差溢出

如上所述,多 AUV 协同导航算法的实现方式多种多样,文献 [16] 对当前协同定位中的几种算法(最小二乘法、卡尔曼滤波、粒子滤波、H-SPAWN 算法)进行了阐述,对利用“审查机制”(Censoring scheme)<sup>[56]</sup>改进算法进行了论述,并进行了算法性能比较.同时我们也注意到其中或多或少都存在一些缺陷,如通信量、计算量过大,对平台间的计算同步要求严格,估计最优性得不到保证等,算法性能还有进一步提升的空间.

### 3 多 AUV 协同导航网络误差建模与补偿方法的研究进展

由于水下环境的特殊性,如未知的洋流、声学通信与测距的延迟,均会对多 AUV 的协同导航模型带来误差.因此必须进行误差建模与补偿研究.

#### 3.1 水声通信延迟和测距误差的建模与补偿

多 AUV 间的协同是通过艇间通信与测距来实现的,因此艇间的通信测距手段极其重要.无线通信技术的通信范围大、数据速率快,但是隐蔽性差、易受到环境和敌方的干扰.从测距的角度考虑,激光测距采用的是相位频移的方法,测量精度高,但是对于安装载体的动态性能要求苛刻.无线电测距方法对于时间的同步性要求苛刻.相比之下,水声通信与测距对运动状态及时间同步均无苛刻要求,是水下多 AUV 协同导航的首选方案.但是水声通信存在着传输延迟,还有时钟漂移,再加上各传感器信息处理时间有长有短,导致系统状态滤波需要的量测信息普遍存在延迟.因此水下环境的特殊性使得相对位置关系的准确测量成为 AUV 协同一个不可避免的难点.为解决这个问题,国内外学者提出了大量的研究方法.

协同导航存在两种时间延迟<sup>[57]</sup>:一是通信时滞,二是单向传输时差,针对 AUV 间的时钟同步问题,张福斌等<sup>[58]</sup>分析了 AUV 时钟偏差与相对漂移模型,并将 AUV 的时钟偏差作为未知量,提出了一种考虑时钟同步问题的多 AUV 协同定位算法,有效地提高了性能. Alexander 在 1991 年提出了一种基于状态量补偿的时间延迟滤波方法<sup>[59]</sup>,推导出由延时时刻的量测信息缺失所造成的系统状态偏差量,进而提出在延时时刻对系统的量测敏感矩阵先进行预估,代入滤波方程中正常解算,当延时信息到达再对系统状态偏差进行补偿,从而达到减少由于时间延迟对系统造成估计误差的目的.

由于某些系统的量测矩阵不能简单估计,因此 Alexander 方法存在着局限性.为了避免这种由量测估计带来的系统误差, Larsen 等在 Alexander 方法的基础上提出了一种基于量测更新的延时滤波方

法,在延时发生时间段,保存系统的全部状态信息,利用延时时刻量测信息直接对延时达到时刻量测进行更新,并且基于估计最小方差原则重新推导滤波方程<sup>[40]</sup>,计算简单且行之有效,但对长时间工作的系统存储硬件提出了极高要求.

在某些潜行器的系统状态有时间延迟时,量测误差与状态误差存在一定的关系,这种关系与一个基于延时发生时间段系统状态累加的影响因子有关<sup>[60]</sup>. Luca<sup>[61]</sup>针对 NCS (Network control system) (网络控制系统)的时间延迟和数据包丢失问题,提出了一种基于有限时间序列的延时滤波问题.文献 [61] 提出在一定步长内对延时状态进行优化估计的滤波方法,在滤波增益为常值的情况下,滤波效果不会发生大的偏差而滤波效率会大大增加,最后利用鲁棒理论证明了引入延时滤波对系统稳定的影响.

#### 3.2 洋流的影响与估计

多 AUV 协同导航的另外一个难点是洋流问题.不可预知的洋流在海洋环境中普遍存在,其大小、方向均可能随时间变化.洋流问题对 AUV 编队造成的影响是会引起编队运动轨迹的漂移,使主 AUV 产生定位误差并使得主从 AUV 间的测距产生误差,误差累积到一定阈值,最终使得算法误差发散.不同于固定信标导航模式,因为没有静态的定位参考点,也就不能直接量测到 AUV 受洋流的影响所发生的漂移,洋流干扰成为协同导航方法中的重要误差来源之一<sup>[62-65]</sup>.近几年,国内外学者开展了较多的相关工作,取得了一些有意义的成果.

针对未知定常洋流干扰,法国 Baccou P & Jouvencel B 团队研究了基于单固定信标的多 AUV 路径跟踪与协同导航,利用扩展卡尔曼滤波方法估计洋流误差<sup>[65-67]</sup>;美国 Gadre A & Stilwell D 团队等分析了多 AUV 协同导航中未知和已知定常洋流的可观测性<sup>[68-71]</sup>.

针对一般的洋流模型,可以采用近似思想,设定未知时变洋流仅有方向随机变化,研究了多 AUV 协同导航问题<sup>[72]</sup>.其思路为量测从 AUV 的本身位置和洋流干扰的初始估计,建立主从 AUV 间的导航滤波模型,利用 EKF 算法实时估计洋流干扰和从 AUV 的位置,从而达到补偿和提高定位精度的目的.刘明雍等<sup>[73]</sup>在此基础上,提出一种适用于未知定常洋流条件下的基于运动矢径的 AUV 协同定位方法,建立运动学模型,设计 AUV 协同定位算法,实验仿真分析验证了算法的正确性.另外,为了削减洋流带来的定位误差,还可以把洋流在东北天三个方向的速度分量作为状态添加到组合导航卡尔曼滤波中进行建模,在 DVL 测量速度中补偿洋流的速度

分量<sup>[74]</sup>.

## 4 多 AUV 协同导航编队构型设计方法的研究进展

从本质上讲,多 AUV 协同导航是一种相对观测的信息融合算法,编队规模、间距直接影响着协同导航的整体性能和定位精度.针对此方面问题,国内外学者分别从不同角度开展了研究.

### 4.1 编队构型对协同导航可观测性的影响

编队构型影响着协同导航的可观测性<sup>[75]</sup>,而可观测性直接决定协同导航定位精度<sup>[76]</sup>,可见很有必要对可观测性进行分析.线性系统的可观测性理论不再适用于非线性的多 AUV 协同导航系统<sup>[77]</sup>.到目前为止,国内外学者已开展了相关研究.

第一种思路是将非线性模型线性化,文献 [78] 采用统计特性描述系统,进行线性化,采用线性系统能观性理论,并对滤波算法的稳定性进行了评估.文献 [3] 分析了线性化的协同导航系统的可观性,指出至少有一个子平台具有全局定位能力,系统才是可观的.对于可观系统,所有平台的稳态定位误差都是有界的<sup>[79]</sup>,其误差上界取决于艇间的相对测量关系、运动传感器的精度以及艇间相对测量传感器的精度,和初始的定位误差没有关系.针对单固定信标的导航定位系统,美国 Grade 等<sup>[80]</sup> 提出了一种分析非线性系统可观测性的算法,要求先将系统进行线性化处理,之后采用线性时变系统理论分析可观测性,并得出了结论:只要测量距离的方向随时间一直在变,那么就可通过相应滤波算法估计 USV (Unmanned surface vehicle) 的位置.

第二种思路是引入非线性的可观测性方法,高伟等针对双领航者协同方案,采用非线性系统可观测性的李导数分析方法,同时参考文献 [81–84] 提出的基于条件数的系统可观测性分析理论对系统的可观测性进行定性和定量分析,指出当相邻时刻测距方向相同时,系统不可观测导致协同导航定位无法实现;然而如果不对系统进行线性化,因为跟随艇的位置可通过求解两个圆的交点而获得,实际系统仍然可观;这说明了线性化满足系统可观的状态条件时,会造成非线性系统重要信息的丢失.

针对如何提高协同导航的可观测性,法国学者 Baccou 等<sup>[65–66]</sup> 采用基于 L-M (levenbery-Marquardt) 的非线性最小二乘法,设定 AUV 进行环形机动航行,该算法可明显提高导航定位精度,但其计算量大,无法保证导航定位的实时性.北京理工大学翟光等<sup>[85]</sup> 针对测量设备在系统中的配置特点,在未获得冗余测量信息的条件下,系统不具有良好的观测性,提出了一种基于分布式滤波的联合定位

算法.综上,非线性系统可观测性理论的研究<sup>[86–89]</sup> 值得进一步深入,同时它本身算法复杂度的简化以及在协同导航方面的应用也有待进一步完善.

### 4.2 协同导航最优编队构型的设计

#### 4.2.1 单领航艇协同导航

单领航艇协同导航中,依靠一艘领航艇向跟随艇广播自己的精确位置信息以及艇间测距信息,进而完成协同导航.若领航艇与跟随艇之间一直保持相同队形而没有相对位置变化,则系统会近似不可观测,此时需要调整领航艇与跟随艇的运动轨迹,使其具有相对位移以保持系统的可观测性<sup>[90]</sup>.法国学者 Baccou 等<sup>[65–66]</sup> 采用基于 L-M 的非线性最小二乘法,设定 AUV 进行环形机动航行,该算法可明显提高导航定位精度,但其计算量大,无法保证导航定位的实时性.文献 [89] 从可观测性角度着手,证明若领航艇和跟随艇的间距一直在变化,则非线性系统一定是可观的,进而设计了一种领航艇 Z 字型机动方式,这样可以有效地提高协同导航系统的可观测性,从而提高协同导航定位精度.

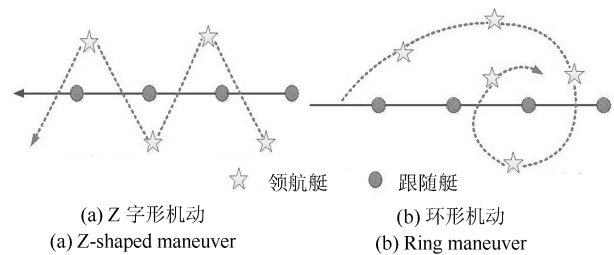


图 7 单领航艇最优编队构型

Fig. 7 Single leader optimal formation configuration

#### 4.2.2 双领航艇协同导航

当领航艇数目是 2 个或 2 个以上时,协同导航的几何算法包括双曲线、球面交会法、双曲面法<sup>[40, 59]</sup>.用 2 个基准点可以得到 2 个解,经过信息融合就可以得到位置信息的唯一解.如果用到 3 个基准点,两两分别做双曲线可确定一个解.如果领航艇的数目继续增多,则利用数学方程可得到更为密集的点区域,但不见得几何方程解算精度比信息融合更精确<sup>[40]</sup>,而且会使队列拓扑结构复杂化.

文献 [10] 分析了协同定位中,定位误差与平台个数及传感器精度的关系.通过推导定位误差的解析表达式,得出以下两点结论:1) 协同定位误差的增长速度与平台数目成反比.因此,平台数目的增加可以抑制定位误差的增长,同时单个平台对定位误差的抑制作用越来越小;2) 协同定位误差的增长速度与平台数目、里程计误差和方位测量误差有关,与平台之间距离和相对方位测量的精度无关.

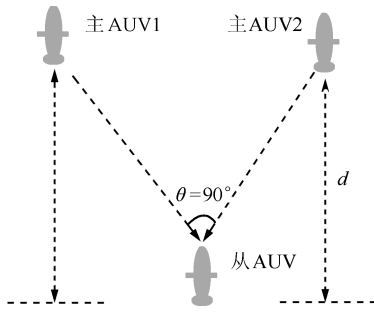


图 8 主从 AUV 相对结构示意图

Fig. 8 Leader-follower AUV relative schematic structure

文献 [91] 分析了基于距离量测提出多 AUV 移动长基线定位系统, 利用 Cramer-Rao 下界 (Cramer-rac lower bound CRLB) 和 Fisher 信息矩阵 (Fisher information matrix, FIM) 理论建立与 AUV 队形结构参数有关的定位性能评价函数, 通过评价函数极大化实现定位性能最优化, 在不提高传感器配置前提下进一步优化定位系统的定位性能, 得出了两个领航 AUV 与从 AUV 保持 90° 分离角相对运动的最优队形。

文献 [87] 则从矩阵条件数的角度, 通过求取系统可观测矩阵条件数的倒数极值的方法, 得出了主从 AUV 间距离相互正交时, 系统可观测性最优的结论。

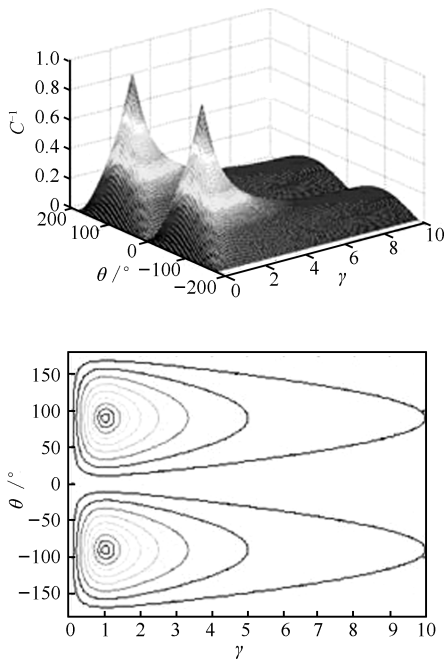


图 9 条件数倒数与主从 AUV 相对距离向量关系

Fig. 9 The relationship between reciprocal of condition number and leader-follower AUV relative distance vector

### 4.2.3 多 AUV 分布式协同导航

分布式 AUV 协同导航中, 各 AUV 互相定位,

互为修正. 分布式协同导航中不区分领航艇和跟随艇, 而是采用关键节点及其相互关系来描述环境, 该关键节点为协同导航系统中的每个子 AUV.

Yukikazu 等<sup>[92]</sup> 通过建立协同导航定位状态估计的协方差阵与编队几何构型之间的解析函数, 从极值求解的角度来完成编队构型的最优化, 并给出了 6 条艇以下规模的编队最优构型设计.

从通信角度来说, AUV 间越接近越好. 距离越远, 通信设备产生误码或者中断的几率也越大. 另外, 考虑到水声时延误差和艇间距、航速有很大关系, 距离越大、航速越大则测距误差越大<sup>[93]</sup>, 因此尽量不要使两艇距离过大造成延时过大. 其次, 任意艇间距不能小于实际限制的最小距离 (避碰).

未来 AUV 编队的规模会趋于大型化, 系统中艇间的导航参数大量增加, 统一进行参数分析不仅会带来算法的复杂度, 还可能降低定位的最佳精度; 所以在保证最佳定位精度的条件下, 进行编队“分组”, 组间再次进行协同定位, 不失为一种好的解决方案, 类似方案的算法有待进一步提高. 例如定义每 3 个运载体的分组为一个元素, 使用迭代最小二乘配方的估计状态量, 设计编队的 CMAP (Collaborative multi-aircraft positioning) 算法, 增强容错性<sup>[94]</sup>; 应用“扩展-分解-聚集”策略去实现多 AUV 协同编队控制, 无论编队规模的大小, 此方法均可将复杂的编队控制问题转换成一系列简单的子系统控制问题<sup>[78, 95]</sup>, 简洁有效.

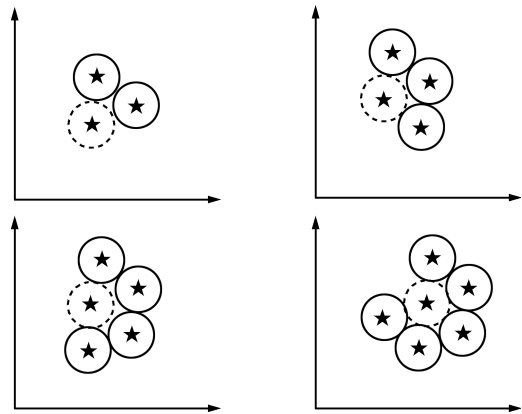


图 10 多 AUV 分布式编队构型

Fig. 10 Multi-AUV distributed formation configuration

## 5 多 AUV 协同导航面临的关键问题和未来发展趋势

多 AUV 协同导航受到业界越来越多的关注, 诸多国内外学者针对多 AUV 协同导航开展了大量研究与分析, 获得了相当的研究成果<sup>[96]</sup>. 针对目前存在的关键问题和发展趋势, 多 AUV 协同导航研究重点和方向主要有:

1) 当前大部分研究工作是针对多 AUV 协同导航建模与补偿算法的, 从理论分析角度对协同导航网络的误差传播特性进行研究的文章并不多见, 因此对多 AUV 协同导航的误差传播特性有待进一步研究.

2) 复杂恶劣的水下工作环境决定 AUV 只能以惯性导航设备、水声通信与测距装置为核心传感器, 建立基于相对位置测量的滤波模型. 再考虑水下通信不仅会产生时间延迟及时钟漂移, 而且还很可能出现数据丢失、误码等情况<sup>[97-99]</sup>, 根据这些特性, 迫切需要设计出精度高、鲁棒性强的多 AUV 协同导航滤波算法, 对实际工程起到指导性作用. 另外, 有必要依据协同导航特有的通信、负载均衡性及计算并行性等性能指标, 完善协同导航性能指标评价体系.

3) 编队构型的优劣直接影响着协同导航定位性能. 航路规划作为多 AUV 协同导航的一个新问题, 也是今后一个发展方向. 多艇协同航路规划更是多 AUV 协同导航的发展和升华. 今后可以考虑从多 AUV 在时间、空间的相关性入手, 研究协同航路规划的多种约束条件, 根据其协同特征完成解析数学模型的建立, 进行协同航路规划, 使得多 AUV 实现全局性、全方位和全过程整体协同. 考虑多 AUV 协同导航是一个复杂的实时变化系统, 可以引入动态二次规划<sup>[100]</sup>, 可以视为更近距离的再次离线航路规划, 它既要考虑多 AUV 协同导航的自身因素, 又要考虑传感器和彼此间交互机制的影响, 涉及的方面更广、问题也更复杂, 因此也是今后需要深入研究的问题.

4) 在特殊工况下, 如严重恶劣海况或 AUV 剧烈机动航行时, 航向变化角速率频繁超值, DVL 测得的速度强烈变化, 使用经典的滤波算法或恒定的滤波增益会使得误差增大. 此时应该降低滤波中航迹推位的比重, 更加依赖主从艇直接的距离量测更新, 以保证导航定位精度. 当 DVL 测速趋于平缓时, 可增加航迹推算的比重并通过量测更新加以修正, 此种实际工况下滤波算法的改进是一个发展方向.

5) 低成本、高精度是 AUV 协同导航网络发展的方向, 为了降低成本, MEMS (Micro-electro mechanical system) 等新型的传感器肯定会越来越多地用在跟随艇的惯性导航系统中<sup>[101]</sup>. 而目前来说 MEMS 存在着陀螺漂移大、随机噪声大等诸多问题<sup>[102]</sup>. 如何对 MEMS 器件的动态时间序列分析建模 (包括统计分析、模型形式选取、模型参数估计、模型适用性检验), 补偿高动态下 MEMS 陀螺标度因数常值、不对称误差及非线性, 并完成整个协同导航网络模型的改进势必会成为今后 AUV 协同导航技术研究的热点问题<sup>[103-107]</sup>.

## 6 结论

协同导航是解决中间层水域中 AUV 导航定位的热点和难点. AUV 受到环境或传感器的影响丧失导航能力时, 其他 AUV 的信息共享, 可以使非正常 AUV 的导航能力得到一定程度的恢复, 因此, 深入分析和研究多 AUV 协同导航问题具有重要的理论意义和实际工程意义. 多 AUV 协同导航理论方兴未艾, 本文介绍了协同导航问题的界定和特性, 重点分解出多 AUV 协同导航理论中的数学模型、算法、通信延迟、误差补偿和编队构型等问题, 逐个综述、分析其特性和存在的问题, 阐述多 AUV 协同导航的发展趋势, 希望通过本文的叙述, 能够为其他学者研究和丰富协同导航理论时提供一定的借鉴作用.

## References

- 1 James E T. The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan. Technical Report, USA, 2007
- 2 Howard A, Matarić M J, Sukhatme G S. Localization for mobile robot teams: a distributed MLE approach. *Experimental Robotics VIII*, 2002, 5: 146-155
- 3 Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multi-robot localization. In: *Proceedings of the 2002 IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Manitoba, Canada: IEEE, 2002. 781-795
- 4 Madhavan R, Fregene K, Parker L E. Distributed heterogeneous outdoor multi-robot localization. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, D. C., USA: IEEE, 2002. 374-381
- 5 Park C W, Ferguson P, Pohlman N, How J P. Decentralized relative navigation for formation flying spacecraft using Augmented CDGPS. In: *Proceedings of the 2001 Institute of Navigation GPS Conference*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2001. 1-5
- 6 Ferguson P, How J. Decentralized estimation algorithms for formation flying space-craft. In: *Proceedings of the 2003 AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit*. Austin, Texas: AIAA, 2003. 541-553
- 7 Bahr A, Walter M R, Leonard J J. Consistent cooperative localization. In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan: IEEE, 2009. 3415-3422
- 8 Fallon M F, Papadopoulos G, Leonard J J. A measurement distribution framework for cooperative navigation using multiple AUVs. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Alaska, USA: IEEE, 2010. 4256-4263
- 9 Martinelli A, Siegwart R. Observability analysis for mobile robot localization. In: *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Alta: IEEE, 2005. 1471-1476

- 10 Roumeliotis S I, Rekleitis I M. Propagation of uncertainty in cooperative multi-robot localization: analysis and experimental results. *Autonomous Robots*, 2004, **17**(1): 41–54
- 11 Engel R, Kalwa J. Coordinated navigation of multiple underwater vehicles. In: Proceedings of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, USA: ISOPE, 2007. 246–230
- 12 Bailey T, Durrant Whyte H. Decentralized data fusion with delayed states for consistent inference in mobile ad hoc networks. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, **14**(8): 415–427
- 13 Huang G P, Trawny N, Mourikis A I, Roumeliotis S I. On the consistency of multi-robot cooperative localization. In: Proceedings of the 2005 Robotics Science and Systems Conference. Berkeley, California, USA: IEEE, 2005. 1–6
- 14 Hidaka Y S, Mourikis A I, Roumeliotis S I. Optimal formations for cooperative localization of mobile robots. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Barcelona, Spain: IEEE, 2005. 4126–4131
- 15 Garello R, Jaron S, Maurizio A S. Peer-to-Peer cooperative positioning part I: GNSS-aided acquisition. *Journal of Heuristics*, 2012, **4**(2): 55–63
- 16 Garello R, Jaron S. Peer-to-Peer cooperative positioning part II: hybrid devices with GNSS terrestrial ranging capability. *Journal of Heuristics*, 2012, **13**(5): 56–64
- 17 Gabelli G, Deambrogio L, Palestini C, Bastia F, Corazza G E, Samson J. Cooperative code acquisition based on the P2P paradigm. In: Proceedings of the 2012 International Technical Meeting of the Institute of Navigation. Newport Beach, USA: ITM, 2012. 195–203
- 18 Antonelli G, Caiti A, Calabro V, Chiaverini S. Designing behaviors to improve observability for relative localization of AUVs. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, USA: IEEE, 2010. 4270–4275
- 19 Nicosia J. Decentralized cooperative navigation for spacecraft. In: Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2007. 1–6
- 20 Zhang Li-Chuan, Liu Ming-Yong, Xu De-Min, Yan Wei-Sheng. Cooperative localization for multi-UUVs based on time-of-flight of acoustic signal. *Acta Armamentari*, 2009, **30**(12): 1675–1678  
(张立川, 刘明雍, 徐德民, 严卫生. 基于水声传播延迟的主从式多无人水下航行器协同导航定位研究. *兵工学报*, 2009, **30**(12): 1675–1678)
- 21 Wang Ming-Hui, Ma Shu-Gen, Li Bin, Wang Yue-Chao. Control architecture and implementation of modularized control system for RPRS. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1179–1182  
(王明辉, 马书根, 李斌, 王越超. 可重构机器人体系结构及模块化控制系统的实现. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(10): 1179–1182)
- 22 Dictionary Editing Office of Language Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences. *Contemporary Chinese Dictionary*. Beijing: Commercial Press, 2012.  
(中国社会科学院语言研究所词典编辑室. 现代汉语词典. 北京: 商务印书馆, 2012.)
- 23 Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer-Verlag, 1977. 4–15
- 24 Andrew C, Catherine S L. *Synergy Effects*. Beijing: China Machine Press, 2000. 10–35
- 25 Moe Z W, Andrea C, Santiago M. Network localization and navigation via cooperation. *IEEE Communication Magazine*, 2011, **49**(5): 56–62
- 26 Dardari D, Falletti E, Luise M. *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective*. UK: Academic Press, 2012. 195–207
- 27 Cui R X, Ge S S, How B, Yoo S C. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Oceanic Engineering*, 2010, **37**(17–18): 1491–1502
- 28 William S. Doppler Based Localization for Mobile Autonomous Underwater Vehicles [Master dissertation], The State University of New Hersey, USA, 2011.
- 29 Hu An-Ping. Combinatorial application of LORAN-C and satellite navigation. *Navigation of China*, 2005, **63**(2): 32–41  
(胡安平. 罗兰 C 和卫星导航的组合应用. *中国航海*, 2005, **63**(2): 32–41)
- 30 Tan Shu-Sen. Development and thought of compass navigation satellite system. *Journal of Astronautic*, 2008, **29**(2): 391–396  
(谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考. *宇航学报*, 2008, **29**(2): 391–396)
- 31 Guo Cai-Fa, Hu Zheng-Dong, Zhang Shi-Feng, Cai Hong. A survey of geomagnetic navigation. *Journal of Astronautic*, 2009, **30**(4): 1314–1319  
(郭才发, 胡正东, 张士峰, 蔡洪. 地磁导航综述. *宇航学报*, 2009, **30**(4): 1314–1319)
- 32 Li Jun, Xu De-Min, Song Bao-Wei, Yan Wei-Sheng. Development and prospect of AUV navigation technology. *Ship Building of China*, 2004, **45**(3): 70–77  
(李俊, 徐德民, 宋保维, 严卫生. 自主式水下潜器导航技术发展现状与展望. *中国造船*, 2004, **45**(3): 70–77)
- 33 Chen Xiao-Long. A Study on Underwater Terrain Matching aided Navigation Technology of AUV [Ph. D. dissertation], Harbin Engineering University, Harbin, China, 2013.  
(陈小龙. AUV 水下地形匹配辅助导航技术研究 [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 中国, 2013.)
- 34 Liam P, Sajad S, Mae S, Howard L. AUV Navigation and Localization: A Review. *Oceanic Engineering*, 2014, **39**(1): 131–149
- 35 Mu Hua. Decentralized Algorithms of Cooperative Navigation for Mobile Platforms [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2010.  
(穆华. 多运动平台协同导航的分散式算法研究 [博士学位论文], 国防科技大学, 中国, 2010.)

- 36 Taylor C J, Spletzer J. A bounded uncertainty approach to cooperative localization using relative bearing constraints. In: Proceedings of the 2007 International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA: IEEE, 2007. 2500–2506
- 37 Nerurkar E D, Roumeliotis S I, Martinelli A. Distributed maximum a posteriori estimation for multi-robot cooperative localization. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009. 1402–1409
- 38 Govindu V M. Lie-algebraic averaging for globally consistent motion estimation. In: Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, D. C., USA: IEEE, 2004. 684–691
- 39 Knuth J, Barooah P. Distributed collaborative localization of multiple vehicles from relative pose measurements. In: Proceedings of the 47th Annual Allerton Conference. Illinois, USA: UIUC, 2009. 314–321
- 40 Larsen T D, Andersen N A, Ravn O, Poulsen N K. Incorporation of time delay measurement in a discrete-time Kalman filter. In: Proceedings of the 37th IEEE Conference. Seattle WA, USA: IEEE, 1998. 3972–3977
- 41 Barooah P, Hespanha J P. Distributed optimal estimation from relative measurements. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing. Bangalore, India: IEEE, 2005. 226–231
- 42 Bian Xin-Qian, Mou Chun-Hui, Yan Zhe-Ping. Coordinated control for multi-UUV formation motion on a set of given paths. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, **45**(1): 106–111  
(边信黔, 牟春晖, 严浙平. 多 UUV 沿多条给定路径运动的协调编队控制. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **45**(1): 106–111)
- 43 Fallon M F, Papadopoulos G, Leonard J J. A measurement distribution framework for cooperative navigation using multiple AUVs. In: Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Alaska, USA: IEEE, 2010. 4256–4263
- 44 Liu Ming-Yong, Shen Jun-Yuan, Zhang Jia-Quan, Hu Jun-Wei. A cooperative localization method of UUV based on unscented Kalman filter. *Torpedo Technology*, 2011, **19**(3): 205–208  
(刘明雍, 沈俊元, 张加全, 胡俊伟. 一种基于无迹卡尔曼滤波的 UUV 协同定位方法. 鱼雷技术, 2011, **19**(3): 205–208)
- 45 Yu Cong. Research on Technology of AUV Integrated Navigation System Based on Multivariate Information Fusion [Master dissertation], Ocean University of China, China, 2010.  
(于聪. 基于多元信息融合的 AUV 惯性导航系统方法研究 [硕士学位论文], 中国海洋大学, 中国, 2010.)
- 46 Wang Ling, Liu Yun-Hui, Wan Jian-Wei, Shao Jin-Xin. Multi-robot cooperative localization based on relative bearing. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(4): 794–799  
(王玲, 刘云辉, 万建伟, 邵金鑫. 基于相对方位的多机器人合作定位算法. 传感技术学报, 2007, **20**(4): 794–799)
- 47 Wang Xiao-Chu, You Zheng, Zhao Kai-Chun, Li Bin. A cooperative navigation estimation method in distributed satellite system. *Journal of Astronautics*, 2013, **34**(8): 1107–1114  
(王晓初, 尤政, 赵开春, 李滨. 分布式卫星系统的协同导航估计方法. 宇航学报, 2013, **34**(8): 1107–1114)
- 48 Fox D, Burgard W, Kruppa H. A probabilistic approach to collaborative multi-robot localization. *Autonomous Robots*, 2000, **8**(3): 325–344
- 49 Peasgood M. Cooperative Navigation for Teams of Mobile Robots [Ph.D. dissertation], the University of Waterloo, Canada, 2007.
- 50 Caceres M A, Penna F, Wymeersch H, Garello R. Hybrid cooperative positioning based on distributed belief propagation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, **29**(10): 1948–1958
- 51 Dellaert F, Kaess M. Square root SAM: simultaneous localization and mapping via square root information smoothing. *International Journal of Robotics Research*, 2006, **25**(12): 1181–1203
- 52 Chen Tian-Ru, Qiu Kai, Pan Quan. Optimal information sharing algorithm for the federated information filter without feedback. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(5): 1064–1067  
(陈天如, 邱恺, 潘泉. 无反馈最优联邦信息滤波算法研究. 传感技术学报, 2007, **20**(5): 1064–1067)
- 53 Liu G L, Worgotter F, Markelic I. Nonlinear estimation using central difference information filter. In: Proceedings of the 2011 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). Nice, France: IEEE, 2011. 593–596
- 54 Capitan J, Merino L, Caballero F, Ollero A. Delayed-state information filter for cooperative decentralized tracking. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009. 3865–3870
- 55 Huang S D, Wang Z, Gamini D. Exact state and covariance sub-matrix recovery for submap based sparse EIF SLAM Algorithm. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008. 1868–1873
- 56 Das K, Wymeersch H. Censored cooperative positioning for dense wireless networks. In: Proceedings of the 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010. 262–266
- 57 Zhou Tao. Cooperative navigation of multiple torpedoes with communication delays. *Command Control & Simulation*, 2013, **35**(2): 63–67  
(周涛. 通信时滞下的鱼雷战术群协同导航算法. 指挥控制与仿真, 2013, **35**(2): 63–67)
- 58 Zhang Fu-Bin, Zhang Xiao-Long, Ma Peng. An algorithm of multi-AUVs cooperative location considering clock synchronization. *Torpedo Technology*, 2013, **21**(5): 355–359  
(张福斌, 张小龙, 马朋. 一种考虑时钟同步问题的多 AUV 协同定位算法. 鱼雷技术, 2013, **21**(5): 355–359)

- 59 Alexander H L. State estimation for distributed systems with sensing delay. *Data Structures and Target Classification*, 1991, 1470: 103–111
- 60 Li Jia-Liang. Development and application of unmanned surface vehicle. *Fire Control & Command Control*, 2012, **37**(6): 203–207  
(李家良. 水面无人艇发展与应用. 火力与控制指挥, 2012, **37**(6): 203–207)
- 61 Luca S. Optimal estimation in networked control systems subject to random delay and packet drop. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, **53**(5): 1311–1317
- 62 Chand R V, Yoo S C, How V E. Localization in under water sensor networks survey and challenges. In: Proceedings of the 1st International Workshop on Underwater Networks. Los Angeles, USA: ACM, 2006. 33–40
- 63 Stutters L, Liu H H, Tiltman C, Brown D J. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. *IEEE Transactions on Systems*, 2008, **38**(4): 581–589
- 64 Baccou P, Jouvence B. Simulation results, post-processing experimentations and comparisons results for navigation, homing and multiple vehicles operations with a new positioning method using on transponder. In: Proceedings of the 2003 IEEE /RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems. Las Vegas, UAS: IEEE, 2003. 811–817
- 65 Baccou P, Jouvencel B, Creuze V. Single beacon acoustic for AUV navigation. In: Proceedings of the 2001 International Conference on Advanced Robotics. Budapest, Hungary: 2001. 617–624
- 66 Vaganay J, Baccou P, Jouvencel B. Homing by acoustic ranging to a single beacon. In: Proceedings of the 2000 IEEE Conference & Exhibition, Providence. RI, USA: IEEE, 2000. 1457–1462
- 67 Gadre A, Stilwell D. Toward underwater navigation based on range measurements from a single localization. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, USA: IEEE, 2004. 4472–4477
- 68 Gadre A, Stilwell D. Underwater navigation in the presence of unknown currents based on range measurements from a single localization. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, Oregon, USA: ACS, 2005. 656–661
- 69 Gadre A S, Stilwell D J. A Complete solution to underwater navigation in the presence of unknown currents based on range measurements from a single localization. In: Proceedings of the 2005 International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York, USA: IEEE, 2005. 1420–1425
- 70 Gadre A S, Mach J J, Stilwell D J, Wick C E. Design of a prototype miniature autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2003. 842–846
- 71 Maczka D K, Gadre A S, Stilwell D J. Implementation of a cooperative navigation algorithm on a platoon of autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of the Ocean's 2007 Conference on Exhibition. Vancouver, USA: IEEE, 2007. 1–6
- 72 Li Wen-Bai, Liu Ming-Yong, Lei Xiao-Kang, Pei Xuan. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles with single leader in unknown ocean current. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(3): 292–297  
(李闻白, 刘明雍, 雷小康, 裴譞. 未知洋流干扰下基于单领航者的多自主水下航行器协同导航. 兵工学报, 2011, **32**(3): 292–297)
- 73 Liu Ming-Yong, Zhang Jia-Quan, Zhang Li-Chuan. AUV cooperative localization method based on motion radius vector in the presence of unknown currents. *Control and Decision*, 2011, **26**(11): 1632–1636  
(刘明雍, 张加全, 张立川. 洋流影响下基于运动矢径的 AUV 协同定位方法. 控制与决策, 2011, **26**(11): 1632–1636)
- 74 Zhang Fu-Bin, Bao Hong-Jie, Duan Xiao-Wei, Shen Jun-Yuan. A AUV integrated navigation algorithm considering the effect of ocean current. *Computer Measurement and Control*, 2012, **20**(2): 513–515  
(张福斌, 鲍鸿杰, 段小伟, 沈俊元. 一种考虑洋流影响的 AUV 组合导航算法. 计算机测量与控制, 2012, **20**(2): 513–515)
- 75 Arrichiello F, Antonelli G, Aguiar A P, Pascoal A. Observability metric for the relative localization of AUVs based on range and depth measurements: theory and experiments. In: Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo Big Sight, Japan: IEEE, 2011. 3166–3171
- 76 Li W B, Liu M Y, Lei X K, Xu F. Observability analysis for cooperative navigation system in autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Taipei, China: IEEE, 2010. 155–161
- 77 Papadopoulos G, Fallon M F, Leonard J J, Patrikalakis N M. Cooperative localization of marine vehicles using nonlinear state estimation. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems. Shanghai, China: IEEE, 2010. 4874–4879
- 78 Yang A, Naeem W, Irwin G, Li W K. Novel decentralised formation control for unmanned vehicles. In: Proceedings of the 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain: IEEE, 2012. 13–18
- 79 Mourikis A I, Roumeliotis S I. Performance analysis of multirobot cooperative localization. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(4): 666–681
- 80 Grade A S, Stilwell D J. A complete solution to underwater navigation in the presence of unknown currents based on range measurements from a single location. In: Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems. Edmonton, Alta: IEEE, 2005. 1420–1425
- 81 Hong Yi-Guang, Cheng Dai-Zhan. *Analysis and Control of Nonlinear Systems*. Beijing: Science Press, 2005. 109–125  
(洪奕光, 程代展. 非线性系统的分析与控制. 北京: 科学出版社, 2005. 109–125)

- 82 Georgios P. Underwater Vehicle Localization Using Range Measurements. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2010. 79–83
- 83 Haykin S, Yee P, Derbez E. Optimum nonlinear filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, **45**(11): 2774–2786
- 84 Gao Wei, Liu Ya-Long, Xu Bo. Observability analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on two-leaders. *System Engineering and Electronics*, 2013, **35**(11): 2370–2375  
(高伟, 刘亚龙, 徐博. 基于双领航者的多 AUV 协同导航系统. 系统工程与电子技术, 2013, **35**(11): 2370–2375)
- 85 Zhai Guang, Zhang Jing-Rui, Zhang Yao. Co-localization of non-cooperative targets based on multiple space robot system. *Robot*, 2013, **35**(2): 249–256  
(翟光, 张景瑞, 张尧. 基于多空间机器人系统的非合作目标联合定位技术. 机器人, 2013, **35**(2): 249–256)
- 86 Antonelli G, Arrichiello F, Chiaverini S, Sukhatme G. Observability analysis of relative localization for AUVs based on ranging and depth measurements. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, Alaska, USA: IEEE, 2010. 4276–4281
- 87 Wang F, Chen X Q, Tsourdos A, White B A, Wu Y H. Nonlinear relative position control of precise formation flying using polynomial eigenstructure assignment. *Acta Astronautica*, 2011, **68**(11): 1830–1838
- 88 Fang Xin-Peng, Yan Wei-Sheng, Li Jun-Bing. An effective observability analysis for the leader-follower autonomous underwater vehicles (AUVs) cooperative localization based on range measurements. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, **30**(4): 547–552  
(房新鹏, 严卫生, 李俊兵. 基于距离量测的主从式 AUV 协同定位系统观测性研究. 西北工业大学学报, 2012, **30**(4): 547–552)
- 89 Yang Jun-Wei. Research on Navigation Data Fusion Technology for Autonomous Underwater Vehicle [Ph.D. dissertation], Harbin Engineering University, China, 2012.  
(杨峻巍. 水下航行器导航及数据融合技术研究 [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 中国, 2012.)
- 90 Li Wen-Bai, Liu Ming-Yong, Zhang Li-Chuan, Liu Fu-Qiang. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles based on relative displacement measurement with a single leader. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(8): 1002–1007  
(李闻白, 刘明雍, 张立川, 刘富樯. 单领航者相对位移测量的多自主水下航行器协同导航. 兵工学报, 2011, **32**(8): 1002–1007)
- 91 Fang Xin-Peng, Yan Wei-Sheng. Formation optimization for cooperative localization based on moving long baseline with two leader AUVs. *Acta Armamentarii*, 2012, **33**(8): 1020–1024  
(房新鹏, 严卫生. 双领航多自主水下航行器移动长基线定位最优队形研究. 兵工学报, 2012, **33**(8): 1020–1024)
- 92 Yukikazu S H, Anastasios I M, Stergios I R. Optimal formations for cooperative localization of mobile robots. In: Proceedings of the 2005 International Conference on Robotics and Automation. Alicante, Spain: IEEE, 2005. 4126–4131
- 93 Liu Ming-Yong, Huang Bo, Cai Ting. A cooperative navigation method of EKF moving long baseline for AUV based on pseudo-range measurements. *Torpedo Technology*, 2012, **20**(6): 432–436  
(刘明雍, 黄博, 蔡挺. 一种基于量测伪距的 EKF 移动长基线 AUV 协同导航方法. 鱼雷技术, 2012, **20**(6): 432–436)
- 94 Rife J. Journal of guidance control and dynamics. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc*, 2013, **26**(2): 304–307
- 95 Shao Yi-Long, Duan Xin-Hao. Multi-UAV cooperative formation control. *Science and Technology Information*, 2013, (20): 111–112  
(邵义龙, 段欣好. 多无人飞行器协同编队控制. 科技信息, 2013, (20): 111–112)
- 96 Tian Shi-Wei, Dai Wei-Heng, Li Guang-Xia, Lv Jing. On the research of cooperative positioning: a review. In: Proceedings of the 4th Annual Meeting of China's Satellite Navigation. Wuhan, China, 2013. 157–163  
(田世伟, 戴卫恒, 李广侠, 吕晶. 协同定位研究综述. 第四届中国卫星导航学术年会论文集. 武汉, 中国, 2013. 157–163)
- 97 Li Wen-Bai, Liu Ming-Yong, Li Hu-Xiong, Chen Xue-Yong. Localization performance analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on relative position measurements with a single leader. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(6): 724–736  
(李闻白, 刘明雍, 李虎雄, 陈学永. 基于单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统定位性能分析. 自动化学报, 2011, **37**(6): 724–736)
- 98 Horner D, Xie G. Undersea acoustic communication maps for collaborative navigation. In: Proceedings of the 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Conference (AUV). Southampton, England: IEEE, 2012. 1–7
- 99 Zhang Li-Chuan, Xu De-Min, Liu Ming-Yong. Cooperative navigation method of multiple autonomous underwater vehicles base on double acoustic measurement. *Fire Control & Command Control*, 2013, **38**(1): 34–36  
(张立川, 徐德民, 刘明雍. 双伪测量的多水下航行器移动长基线协同导航算法. 火力与控制指挥, 2013, **38**(1): 34–36)
- 100 Liu Gang, Lao Song-Yang, Tan Dong-Feng, Zhou Zhi-Chao. Research status and progress on anti-ship missile path planning. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 347–358  
(刘钢, 老松杨, 谭东风, 周智超. 反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展. 自动化学报, 2013, **39**(4): 347–358)
- 101 Lzadian A, Dawson J, Famouri P. Input-output synchronization for bias drift reduction of MEMS gyroscopes. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, Washington, USA: ACS, 2008. 3751–3754
- 102 Guan T N, Ceysens F, Puers R. Fabrication and testing of a MEMS platform for characterization of stimuli-sensitive hydrogels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, **22**(8): 8701–8709
- 103 Jengnan J, Huang Y C. *Intelligent Technologies and Engineering Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 735–742

- 104 Li Ling-Yu, Lu Yi, Chen Xing, Xu Gao-Bin. Design of and research on MEMS gyroscope. *Electronic Science and Technology*, 2013, **26**(9): 172–176  
(李凌云, 卢翌, 陈兴, 许高斌. 微机械陀螺仪设计与研究. 电子科技, 2013, **26**(9): 172–176)
- 105 Gu Yu. MEMS technology status and development prospects. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2013, (8): 1–8  
(谷雨. MEMS 技术现状与发展前景. 电子工业专用设备, 2013, (8): 1–8)
- 106 Yole D. MEMS front-end manufacturing trends. *Research and Markets*, 2013, **5**(3): 96–114
- 107 Yan X, Chen W J, Peng W H. Research on random drift modeling and a Kalman filter based on the differential signal of MEMS gyroscope. In: Proceedings of the 25th Chinese Control and Decision Conference. Guiyang, China: CCDC, 2013. 3233–3237



**徐博** 哈尔滨工程大学自动化学院讲师. 2011 年获得哈尔滨工程大学精密仪器及机械博士学位. 主要研究方向为传递对准, 组合导航, 协同导航. 本文通信作者. E-mail: xubocarter@sina.com  
(**XU Bo** Ph.D., lecturer at the College of Automation, Harbin Engineering University. He received his Ph.D.

degree from Harbin Engineering University in 2011. His research interest covers transfer alignment, integrated navigation, and cooperative navigation. Corresponding author of this paper.)



**白金磊** 哈尔滨工程大学自动化学院硕士研究生. 2014 年获得哈尔滨工程大学自动化学院学士学位. 主要研究方向为协同导航, 组合导航.  
E-mail: 15045621605@163.com  
(**BAI Jin-Lei** Master student at the College of Automation, Harbin Engineering University. He received his

bachelor degree from Harbin Engineering University in 2014. His research interest covers cooperative navigation and integrated navigation.)



**郝燕玲** 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 主要研究方向为组合导航, 惯性导航及定位. E-mail: hao.yanling@163.com  
(**HAO Yan-Ling** Professor at the College of Automation, Harbin Engineering University. Her research interest covers cooperative navigation and inertial navigation and positioning.)



**高伟** 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 2008 年获得哈尔滨工程大学自动化学院教授学位. 主要研究方向为光学陀螺及其捷联导航技术, 惯性测量技术.  
E-mail: gaow@hrbeu.edu.cn

(**GAO Wei** Professor at the College of Automation, Harbin Engineering University. He received his bachelor degree from Harbin Engineering University in 2008. His research interest covers optical gyro and its strap-down navigation technology, and inertial measurement technology.)



**刘亚龙** 哈尔滨工程大学自动化学院博士研究生. 2013 年获得哈尔滨工程大学自动化学院硕士学位. 主要研究方向为多水下航行器协同导航, 信息融合技术.  
E-mail: 13604883463@163.com

(**LIU Ya-Long** Ph.D. candidate at the College of Automation, Harbin Engineering University. He received his master degree from Harbin Engineering University in 2013. His research interest covers multi-AUV cooperative navigation and information fusion technology.)