

多无人水下航行器协同导航定位研究进展^①

张立川^{②***} 许少峰^{*} 刘明雍^{***} 徐德民^{***}

(^{*} 西北工业大学航海学院 西安 710072)

(^{**} 水下信息与控制国防科技重点实验室 西安 710072)

摘 要 介绍了多无人水下航行器(UUV)协同导航定位的原理,进而详细综述了国内外多 UUV 协作系统及多 UUV 协同导航定位系统的研究进展,重点研究和分析了水声测距及通信一体化、协同导航定位算法、协同导航定位观测、水下 UUV 组网等关键技术的研究特点和发展趋势。研究表明,随着海洋研究的不断深入,多 UUV 协同导航定位系统的发展将会更注重减小体积质量、适应复杂海洋环境和能源限制方面的研究。

关键词 无人水下航行器(UUV),多 UUV,协同导航,水下导航

0 引 言

多无人水下航行器(unmanned underwater vehicle,UUV)协作系统具有低成本、高效率及强容错性、可重构性等突出优势,因而自 20 世纪 80 年代被提出以来一直得到各国 UUV 研究学者的高度关注,并相继展开了多 UUV 技术研究。美国、英国、日本、欧盟及我国都设立了专门的研究机构,而且国际上的一些专业协会如 IEEE 海洋工程协会(IEEE Ocean Engineering Society)、IEEE 机器人和自动化协会(IEEE Robotics and Automation Society)、IEEE 海洋技术协会(Marine Technology Society)都为推动多 UUV 技术的发展做出了贡献。进行多 UUV 协同作业首先需确定每个 UUV 的相对位置关系,即解决多 UUV 协同导航定位问题。本文介绍了多 UUV 协同导航定位的原理,并对国内外多 UUV 协作系统的理论和应用现状进行了综述,分析了水声测距及通信一体化、协同导航定位算法和协同导航系统可观性等关键技术的研究现状和未来发展趋势。

1 多 UUV 协同导航定位原理^[1]

多 UUV 协同导航定位,根据单体 UUV 结构的不同可以分为两种:(1)并行式,即系统中每个 UUV 的功能和结构相同,使用各自的导航系统进行导航定位,通过水声通信,获得“伙伴”UUV 的位置信息;(2)领航式,即系统中少量领航 UUV 装备高精度导航设备,大量跟随 UUV 装备低精度导航设备,跟随 UUV 通过获得与领航 UUV 的位置关系提高自身导航精度,并通过水声通信确定自身在系统中的位置。并行式的结构简单,但每个 UUV 都装备高精度导航设备,成本将增加很多倍,而领航式兼顾了导航精度和成本,成为多 UUV 协同定位导航研究的主要方向。

领航 UUV 装备高精度惯性导航设备、多普勒速度仪、差分全球定位系统(DGPS)、水声通信设备等,导航系统以惯导设备为主,初始位置通过 DGPS 获得,以多普勒速度仪测量的绝对速度作为惯导外部输入,进一步提高了其精度。跟随 UUV 装备低精度航位推算导航设备、GPS、水声通信设备等。跟随

① 国家自然科学基金(51109179, 51179156)和中央高校基本科研业务专项(3102014KYJD010)资助项目。

② 男,博士,副教授;研究方向:水下航行器导航与控制;联系人,E-mail: zlc@nwpu.edu.cn
(收稿日期:2015-10-28)

UUV 在执行任务前,均通过 GPS 进行时间校正,以保证时间同步。

在协同导航定位过程中,如图 1,领航 UUV 按照预先约定的时间间隔向外发射固定频率的声信号脉冲,间隔一段时间后,通过水声通信装置广播领航 UUV 自身位置。跟随 UUV 接收到声信号脉冲和领航 UUV 位置后,由声信号脉冲解算出相对距离,再根据领航 UUV 位置来完成协同定位。协同导航定位的关键是相对距离的确定。

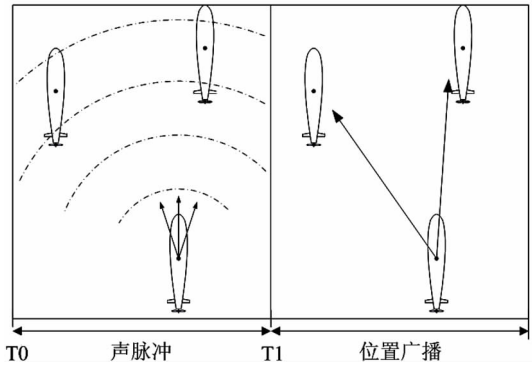


图 1 协同定位原理图

2 国外研究进展

近些年来,具有代表性的多 UUV 协作系统研究机构或项目列举如下:

(1) 欧盟的“GREX”项目^[2-4]

欧盟于 2006 年组织了德国、意大利、葡萄牙、挪威、法国等国家联合开展了主题为协作无人系统的协调和控制的^[5,6] 欧盟 GREX 项目(见图 2),研究核心是解决多 UUV 的协同导航及编队控制、通信等问题。Grex 是拉丁语,意为群体,组队的意思。该项目组对外公开的主要任务是基于多个异构无人水

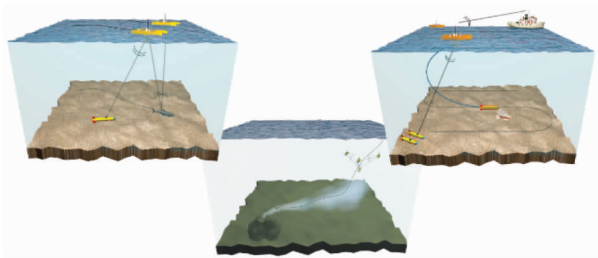


图 2 欧盟 GREX 项目

下航行器的协作完成海底地图测绘,始于 2006 年,结题于 2009 年。2008 年夏季和 2009 年 11 月的二次海试成功完成了多 UUV 协作下的海洋环境绘图任务,验证了可以通过水声通信实现多 UUV 协同导航和控制。

(2) 美国自主海洋采样网络

美国的自主海洋采样网络 (Autonomous Ocean Sampling Network, AOSN) 项目是多 UUV 系统用于科学考察的最典型案例。

ASON I 项目,是最有影响的多 UUV 系统的基础应用研究,由美国麻省理工学院 (MIT) 海洋实验室、伍兹霍尔海洋研究所、华盛顿大学应用物理实验室等多家研究机构共同参与完成。

AOSN II 项目(图 3),由美国蒙特利湾海洋研究所 (Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI) 领导,美国海洋研究局资助。该项目的目的是对一个大范围的海洋空间进行长时间的数据收集,预测海洋的物理特性,利用多个 UUV 搭载不同类型的传感器,在同一时刻测量不同区域或不同深度下的海洋参数,并采取适当的控制策略使得网络中的每个 UUV 成员能够在最重要区域进行信息收集。

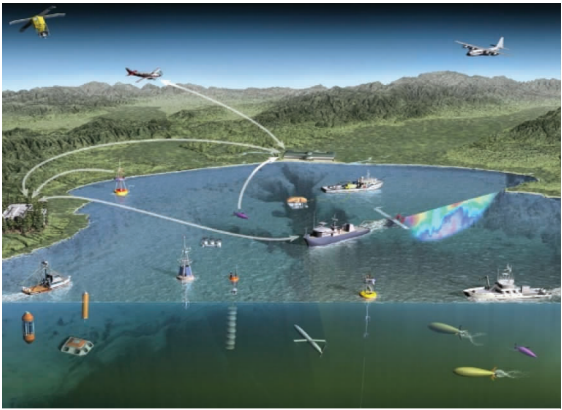


图 3 2003 年蒙特利湾 AOSN II 试验示意图

(3) 美国的新泽西大陆架观测系统

图 4 为美国新泽西海湾布设的大陆架观测系统。在该系统中,水面雷达,水下滑翔 UUV (Slocum Glider, 图 4),空中飞机以及卫星组成了多节点的观测系统。该系统利用多个 UUV 在长期无人值守的

情况下自主进行海洋调查工作,经过4年的运行试验,已充分证明了多UUV作为其中关键的部分在沿岸水域快速生态评估、物理化学要素分析等方面发挥了不可替代的作用。

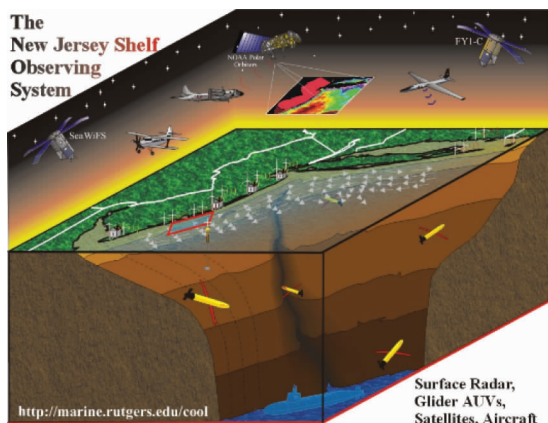


图4 美国新泽西大陆架观测系统

(4) 美国 MIT 的 CADRE 系统^[7]

美国麻省理工学院(MIT)海洋机器人实验室一直从事UUV的技术研究,并于2006年公开了其“自主协同的分散侦察与探测系统”,即“Cooperative Autonomy for Distributed Reconnaissance and Exploration (CADRE) System”。该系统受美国海军研究生院资助,并于2004年完成了湖上试验。

CADRE 系统的关键技术是利用了三种无人平台进行协同导航与控制,共同完成侦察与探测任务,如图5所示。该系统所利用的三类UUV分别为:

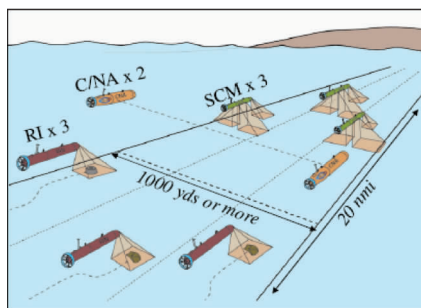
- 1) 基于Bluefin-12的搜索/分类/绘图(Search-Classify-Map, SCM)UUV;
- 2) 基于Bluefin-9和Bluefin-12的获取/辨别(Reacquire-Identify, RI)UUV;
- 3) 基于Bluefin-21和ASV的通信和导航辅助(Communications and Navigation Aid, C/NA)UUV。

其中,SCM UUV和RI UUV是装备低成本、低精度的导航系统和水声通信定位系统,C/NA UUV装备高精度的导航系统和通信系统,由C/NA UUV负责水下通信中继和辅助导航。在执行任务过程中,SCM UUV和RI UUV在C/NA UUV辅助下利用移动长基线定位^[32]方法实现精确定位,SCM UUV在前方进行侦察,探测到可疑目标后,报告给C/NA

UUV,并由C/NA UUV进一步分析和处理,做出决策,再将目标信息告知RI UUV,最后由RI UUV处理可疑目标;若是水雷,当前方编队距离足够远时,引爆水雷,在保证安全的前提下,降低了成本。



(a)



(b)

图5 麻省理工学院的CADRE系统

(5) 欧盟 CADDY 系统^[8]

欧盟第七科技框架计划(FP7)致力于UUV的技术研究,并于2014年开展了“自主认知潜水协同作业项目”,即Cognitive Autonomous Diving Buddy (CADDY)。该项目的目标是开发能够帮助或者协同人类潜水者在危险水区内进行科研、考古或者商业探索活动时完成高效率作业的水下航行器领航跟踪系统(leader tracking system, LTS),如图6所示。整个LTS系统包括在水下扮演潜水助手角色,能够与潜水员以及领航航行器协作的水下航行器,和在水面提供导航监视协助和安全保障功能的水面舰艇。该系统中领航者的身份可以根据任务的需求在UUV和水面舰艇之间进行切换。CADDY项目已与2014年进行了初步的水下航行试验,对协同动作控制与协同导航进行了验证,未来的研究工作将着重于航行器同人类潜水员的协同工作以及整个协同系统的扩展。

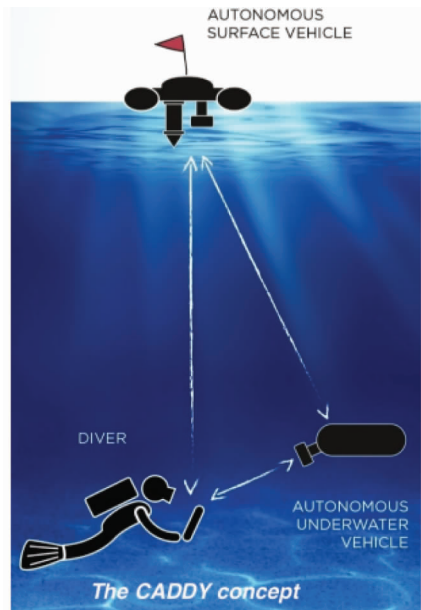


图 6 欧盟的 CADDY 系统

3 国内研究进展

国内方面,中科院沈阳自动化所开展了多 UUV 协作系统研究^[9,10],对国外多 UUV 系统的应用现状进行了综述,着重分析了系统涉及的导航、通信、控制和能源等技术的研究现状并展望了其未来的发展方向;开展了多水下机器人自主海洋特征场跟踪研究^[12],建立海洋特征跟踪模型,并基于此模型将队形控制策略与海洋特征场的估计相结合,设计了多水下机器人队形中心跟踪海洋特征等值线的策略及其控制率。

哈尔滨工程大学开展了多 UUV 协调控制研究^[13,14],针对多 UUV 间通过水声通信进行交互信息时存在时延的问题,研究了在通信时滞下多 UUV 沿多条给定路径编队运动的控制器设计问题;高伟^[15-17]针对多 UUV 协同定位过程中水声通信延迟造成的定位失效问题,提出了一种基于状态估计均方误差最小的延时扩展卡尔曼滤波定位误差修正方法,并针对双领航者多 UUV 协同导航系统的可观测性进行了定性和定量分析,得出了系统可观测性大小取决于主从 UUV 间的距离向量以及从 UUV 速度向量之间的相互关系,同时还提出一种基于双主交替领航的多 UUV 协同导航方法,并进行了试验验证,为利用双主交替领航提高系统可观测性提供了

理论依据。

西北工业大学开展了协同导航的研究,刘明雍^[1]开展了多 UUV 协同导航体系、移动长基线协同导航、单领航者协同导航以及洋流干扰下的单领航者测距协同导航方法。张立川^[18-20]在测量水声传播延迟的条件下,研究了单领航者、双领航者两种模式下多 UUV 协同导航算法。张福斌^[21]针对双领航者广播通信模式下的多 UUV 协同导航系统,基于移动长基线 (MLBL) 导航理论,提出并建立了一种虚拟移动长基线 (SMLBL) 协同导航模型,应用加权最小二乘法,设计了基于单向水声通信的协同导航算法,使得跟随 UUV 内外部导航信息得到有效融合。姚尧^[22,23]研究了多 UUV 之间位置关系对协同定位精度的影响,并提出了存在水声传播延迟情况下多 UUV 协同定位的方法,并提出一种最优编队策略。卢健^[24,25]提出了基于误差修正的多 UUV 协同导航算法,研究了“共同观测环境”的协同结构,给出了低自定位精度 UUV 部分量测误差的量测粗估计算法,包括对距离量测和方位量测的粗估计。李闻白^[6,26-28]研究了考虑未知定常、未知不定常洋流估计情况下,基于单个领航者的多 UUV 协同导航算法,并在基于单信标测距的水下协同导航系统中给出了可观测性分析。

4 关键技术分析

(1) 水声测距与通信一体化

多 UUV 协同定位所需的位置和通信信息均通过水声测量实现,水声测距与通信一体化是将通信和定位信息融合在一个数据包中。在水声测距与通信一体化方面,Eustice^[29-32]等人研制了协同导航定位关键组部件:时钟同步装置 (PPSBoard),用以实现多 AUV 之间的时钟同步。

在多 UUV 水下传感器网络时钟同步算法方面,新加坡国立大学的 Chirdchoo^[33]等人首先提出了一种基于集群的,通过利用两次最小平方误差线性回归来估计时钟歪斜和偏移的时间同步算法。在此基础上,康涅狄格大学的 Liu^[34,35]针对水下移动传感器网络三个难点:传播延迟长、传感器节点的移动性

以及能耗功率的限制,考虑了移动水下传感器网络的空间相关性,提出一种成对、跨层的时间同步方案,准确估计多普勒频移和斜交的影响以及长动态传播延迟特性,在较低的消息开销情况下达到较高的时间同步精度。北约海洋科技实验中心主要针对通信节点移动和水声通信信道有限的问题,利用线性化模型以及通过控制嵌入数据的时间戳来减少通信开销,对内时钟漂移进行补偿,并在 COLLAB-NGAS14 项目中进行了水下移动通信网络的试验验证^[36]。

西北工业大学张兵宇^[37]研究了精确时间同步问题,设计了一种多 UUV 协同导航的时钟同步控制器,实现了时钟实时校准和无外部时钟源情况下时钟保持功能,完成了硬件测试。

在实际信息传播过程中,除了水声传播延迟外,还有信号发射处理延迟以及信息出序到达。卢健^[25]设计了单领航者相邻周期和三领航者同一周期的非顺序量测融合处理算法,将出序量测信息直接对从 UUV 最新的被估计状态进行更新,在信息无损的前提下完成状态的实时估计过程。

(2) 协同导航定位算法

协同导航与单 UUV 导航定位的最大区别是多个 UUV 之间可进行协调、合作与信息交互。其基于水声通信网络和水声探测网络的协同定位形式,利用各 AUV 所携带的传感器,结合水声通信技术,共享自主定位传感器信息,对相对位置观测量进行融合,可有效抑制导航过程中随时间累积的定位误差,从而提高定位精度。

Maczka^[38]利用时间同步和水声通信来测量 UUV 相对位置,对系统模型和分布式 Kalman 滤波进行了研究,并给出了实验结果。

在基于几何解算的协同定位技术研究中,Vaganay^[39]首次提出“移动长基线”的概念。所谓“移动长基线”,即通过改进传统的长基线技术,利用无人水面舰船或水面浮标充当可移动的长基线定位基阵,然后通过 UUV 之间的探测和定位方程的解算确定航行器的位置坐标。随后,Curcio^[40]基于“移动长基线”的概念,对 1 个 UUV 和 1 个无人水面船组成的多 UUV 系统进行了协同定位的试验。此外,意大

利佛罗伦萨大学的 Allotta^[41]等人在水声通信测距的基础之上,利用多 UUV 之间构建的四面体几何关系来确定它们之间的相对位置,并进行了实验验证。

在基于多 UUV 之间相对距离的水声测量基础之上,一些学者开展了对多学科结合的协同导航定位算法以及多种滤波方法(包括且不限于扩展卡尔曼滤波)的应用研究。新加坡国立大学的 Tan Yew Teck^[42]等人结合了海洋测深学的方法,研究了基于海洋测深的多 UUV 协同定位算法,并利用边缘化粒子滤波来进行信息融合。英国艾塞克斯大学的 Sen Wang^[43]等人针对基于单信标测距的协同导航方法,研究了利用滚动时域估计(moving horizon estimation)的滤波方法来进行多协作系统的位置估计,使定位精度更加准确。

(3) 协同导航定位可观性分析

西北工业大学刘明雍^[44]针对单信标测距导航方法中的系统可观性问题,通过建立 AUV 的三维运动学模型,利用线性时变系统的局部可观性理论得到了导航系统关于 AUV 三维运动路径的可观测性条件,并在此条件下实现了对 AUV 运动位置的在线估计。

李闻白^[45]针对单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统,利用扩展卡尔曼滤波方法建立了导航系统的整体定位误差关于相对位置量测误差的传递方程;在此基础上,通过求解系统定位误差随时间演化的代数黎卡提方程,得到了其在稳态情形下的方差上界估计。

(4) 水下 UUV 组网研究

前文所述研究都是基于两三个 UUV 进行的单领航、双领航等模式下的协同导航,仅考虑了主从式情况下的协同导航问题,缺少组网 UUV 情况下的协同导航研究。随着 UUV 个数的增多,每个 UUV 可获得的量测变量也越来越多。在 n 个 UUV 的协作环境中,UUV 能够观测到其它 UUV 的相对方位和相对距离,则在最多观测情形下,UUV 可获得所有其它 $n-1$ 个 UUV 的相对距离和相对方位,共 $2(n-1)$ 个观测量。那么,现在的问题就是如何选择观测量,选择哪些观测量,使得既能满足 UUV 的定位需求又使系统能耗最少。

针对这一问题,一些学者将基于信息论和信息熵的研究方法应用于导航与定位信息处理领域^[46],证明了系统的定位性能与量测数据的数量和质量之间的非线性关系,并在陆上移动机器人进行了验证^[47-49]。但在水下环境中,对 UUV 组网方面的研究还较少。Moradi^[50]等人研究了水下无线网络的逆向定位方法,提出一系列基于无线通信的水下节点网络定位方法。上海交通大学^[49-51]研究了变拓扑的水下观测网络队形控制问题,在线性时变系统稳定性分析基础上,提出了变拓扑网络队形可镇定的充分条件,给出了相应的分布式控制器设计方法,研究中未考虑部分水下环境对导航和通讯能力的影响,如通讯延迟、水声丢包等问题。

5 结 论

本文介绍了多 UUV 协同导航定位原理,在此基础上,详细介绍了国外多 UUV 协作系统发展现状和国内多 UUV 协同导航定位系统的研究进展,同时对协同导航系统所涉及的水声测距与通信一体化、协同导航定位算法、协同导航定位可观测性分析以及 UUV 组网等关键技术进行了总结与分析。随着海洋研究的不断深入,复杂的海洋环境、UUV 的体积、质量、能源的限制以及水介质的特殊性使多 UUV 协作系统越来越受到人们的关注,应用前景也更加宽广,这也意味着对多 UUV 协同导航定位技术提出了更高的要求。研究多 UUV 协同导航定位技术是多 UUV 协作系统发展的必然趋势。

参考文献

[1] 刘明雍. 水下航行器协同导航技术. 北京: 国防工业出版社, 2014. 14-21

[2] Kalwa J. Final results of the European project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. In: Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy, 2010. 181-186

[3] Brignone L, Alves J, Opperbecke J. GREX sea trials: First experiences in multiple underwater vehicle coordination based on acoustic communication. In: Proceedings of OCEANS '09 IEEE Bremen, Bremen, Germany, 2009.

1-6

[4] Engel R, Kalwa J. Relative positioning of multiple underwater vehicles in the GREX Project. In: Proceedings of OCEANS '09 IEEE Bremen, Bremen, Germany, 2009. 1-7

[5] 卢健,徐德民,张福斌. 共同观测环境多 UUV 协同导航. 西北工业大学学报, 2013, (3): 378-385

[6] 李闻白,刘明雍,高俊钗等. 洋流影响下基于单领航者的多 AUV 协同导航. 鱼雷技术. 2010, 18(4): 277-281

[7] Willcox S, Goldberg D, Vaganay J, et al. Multi-vehicle cooperative navigation and autonomy with the bluefin CADRE system. In: Proceedings of 2006 IFAC (International Federation of Automatic Control) Conference, Prague, Czech, 2006. 20-22

[8] Abreu P, Bayat M, Botelho J, et al. Cooperative Control and Navigation in the Scope of the EC CADDY Project. In: Proceedings of OCEANS '15 MTS/IEEE Genova, Genova, Italy, 2015. 1-5

[9] 许真珍,封锡盛. 多 UUV 协作系统的研究现状与发展. 机器人, 2007, 29(2): 186-192

[10] 许真珍,李一平,封锡盛. 一个面向异构多 UUV 协作任务的分层式控制系统. 机器人, 2008, 30(2): 155-159, 164

[11] 徐红丽,许真珍,封锡盛. 基于局域网的多水下机器人仿真系统设计与实现. 机器人, 2005, 27(3): 423-425

[12] 张少伟,俞建成,张艾群等. 多水下机器人自主海洋特征场跟踪研究. 科学通报, 2013, 58(S2): 67-74

[13] 牟春晖,边信黔,王宏健等. 具有通信约束的多 UUV 协调路径跟踪控制. 鱼雷技术, 2011, 19(3): 195-200

[14] 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, 2013, 45(1): 106-111

[15] 高伟,刘亚龙,徐博等. 基于双主交替领航的多 AUV 协同导航方法. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 36(6): 735-740

[16] 高伟,杨建,刘菊等. 基于水声通信延迟的多 UUV 协同定位算法. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 539-545

[17] 高伟,刘亚龙,徐博. 基于双领航者的多 AUV 协同导航系统可观测性分析. 系统工程与电子技术, 2013,

- 35(11): 2370-2375
- [18] 张立川,刘明雍,徐德民等. 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): 1674-1678
- [19] Zhang L X, Xu D, Liu M. Cooperative navigation and localization for multiple UUVs. *Journal of Marine Science and Application*, 2009, 8(03): 216-221
- [20] 张立川,徐德民,刘明雍等. 基于移动长基线的多AUV协同导航. 机器人, 2009, 31(6): 581-585
- [21] 张福斌,马朋. 一种基于虚拟移动长基线的多AUV协同导航算法. 鱼雷技术, 2013, (2): 115-119
- [22] 姚尧,徐德民,张立川等. 通信延迟下的多UUV协同定位——基于航迹预测的实时更新算法. 机器人, 2011, 33(2): 161-168
- [23] Yao Y, De-Min X, Wei-Sheng Y, et al. An optimal measure choosing strategy to AUVs Cooperative Localization. In: Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, China, 2009. 1889-1894
- [24] 卢健,徐德民,张立川等. 基于移动长基线和误差修正算法的多UUV协同导航. 控制与决策, 2012, 27(7): 1052-1056
- [25] 卢健,徐德民,张福斌等. 异时量测序贯处理的多AUV协同导航. 计算机工程与应用, 2011, 47(31): 12-16
- [26] 李闻白,刘明雍,雷小康等. 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
- [27] 李闻白,刘明雍,张立川等. 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
- [28] 李闻白,刘明雍,赵涛等. 基于线性规划算法的多机器人系统的协同定位. 计算机仿真, 2010, 27(3): 151-155
- [29] Eustice R M, Whitcomb L L, Singh H, et al. Recent advances in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation. In: Proceedings of OCEANS '06 MTS/IEEE Boston, Boston, USA, 2006. 1-6
- [30] Eustice R M, Whitcomb L L, Singh H, et al. Experimental results in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation for autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007. 4257-4264
- [31] Walls J M, Eustice R M. Experimental comparison of synchronous-clock cooperative acoustic navigation algorithms. In: Proceedings of OCEANS '11 MTS/IEEE Kona, Kona, USA, 2011. 1-7
- [32] Webster S E, Eustice R M, Singh H, et al. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 2012, 31(8): 935-950
- [33] Chirdchoo N, Soh W, Chua K C. MU-Sync: a time synchronization protocol for underwater mobile networks. In: Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Underwater Networks, San Francisco, USA, 2008. 35-42
- [34] Liu J, Wang Z, Zuba M, et al. DA-Sync: A doppler-assisted time-synchronization scheme for mobile underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2014, 13(3): 582-595
- [35] Liu J, Zhou Z, Peng Z, et al. Mobi-Sync: Efficient time synchronization for mobile underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(2): 406-416
- [36] Vermeij A, Munafo A. Real-time clock synchronisation in underwater acoustic networks. In: Proceedings of OCEANS '15 MTS/IEEE Genova, Genova, Italy, 2015. 1-6
- [37] 刘明雍,张兵宇,张立川. 多AUV协作时钟同步控制算法设计与实现. 西北工业大学学报, 2013, 31(6): 848-852
- [38] 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 OCEANS '07 MTS/IEEE Vancouver, Vancouver, Canada, 2007. 1-6
- [39] Vaganay J, Leonard J J, Curcio J A, et al. Experimental validation of the moving long base-line navigation concept. In: Proceedings of Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES, Sebasco, USA, 2004. 59-65
- [40] Curcio J, Leonard J, Vaganay J, et al. Experiments in moving baseline navigation using autonomous surface craft. In: Proceedings of OCEANS '05 MTS/IEEE Washington, Washington, USA, 2005. 730-735
- [41] Allotta B, Costanzi R, Meli E, et al. Cooperative localization of a team of AUVs by a tetrahedral configuration.

Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(8): 1228-1237

[42] Tan Y T, Chitre M, Hover F S. Collaborative bathymetry-based localization of a team of autonomous underwater vehicles. In: Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014. 2475-2481

[43] Sen W, Ling C, Dongbing G, et al. Single beacon based multi-robot cooperative localization using Moving Horizon Estimation. In: Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 2014. 1625-1630

[44] 刘明雍,李闻白,刘富樯等. 基于单信标测距的水下导航系统可观测性分析. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 87-92

[45] 李闻白,刘明雍,李虎雄等. 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

[46] Wang H, Yao K, Pottier G, et al. Entropy-based sensor selection heuristic for target localization. In: Proceedings of 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Berkeley, USA, 2004. 36-45

[47] Zhang S, Xie L, Adams M D. Entropy based feature selection scheme for real time simultaneous localization and map building. In: Proceedings of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Alberta, Canada, 2005. 1175-1180

[48] Caglioti V, Citterio A, Fossati A. Cooperative, distributed localization in multi-robot systems; a minimum-entropy approach. In: Proceedings of IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and ITS Applications, Prague, Czech, 2006. 25-30

[49] 王玲. 未知环境中基于相对观测量的多机器人合作定位研究: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 2006. 90-124

[50] Marjan M, Javad R, Abdul Samad I. A reverse localization scheme for underwater acoustic sensor networks. *Sensors*, 2012, 12(4): 4352-4380

[51] 陈煦蔚,冯正平. 移动式水下观测网络的队形稳定性. 海洋工程, 2010, 28(2): 122-127

Advances in cooperative navigation and localization for multi-UUV systems

Zhang Lichuan^{***}, Xu Shaofeng^{*}, Liu Mingyong^{***}, Xu Demin^{***}
(^{*} College of Marine Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)
^{**} National Laboratory of Underwater Information and Control, Xi'an 710072)

Abstract

The principle of multi-UUV (unmanned underwater vehicle) cooperative navigation and localization is briefly introduced. Then, the developments of multi-UUV cooperative navigation and localization systems and the relevant studies in theory and practice are reviewed in detail, and the key techniques of integrating underwater ranging and communication, algorithm for cooperative navigation and localization, UUV networking, etc., are emphatically investigated and analyzed. The study concludes that the research on multi-UUV cooperative navigation and localization tends to optimize the volume and mass of UUVs to meet complex marine environments and energy limitations.

Key words: unmanned underwater vehicle (UUV), multiple UUV, cooperative navigation, underwater navigation