

水下无人飞行器导航定位技术研究

黎明学

昆明船舶设备集团有限公司, 云南 昆明 650051

[摘要] 水下无人飞行器在海洋勘探及资源开采等方面有着越来越广泛的应用, 对水下无人飞行器进行导航定位的要求也越来越高, 而该类设备的导航误差大小及稳定性直接影响着航行作业是否安全有效的问题。文章详细介绍了水下无人飞行器开展导航定位存在的主要难题有: 惯性导航误差较大导致误差积累严重、复杂海底地形的影响、声纳导航存在局限性、多种传感器之间无法很好融合等等。为解决这些问题, 从提升其导航精度、减弱误差叠加、增加抗外部干扰的能力、完善声纳测距装置、加强各来源信号融合处理、增强设备实时性和可靠性这六点提出具体的技术手段。研究发现, 联合导航和多种信息集成是提高水下无人飞行器导航定位精度的一种方法。

[关键词] 水下无人飞行器; 导航定位; 惯性导航; 声学定位

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19555

中图分类号: TP39

文献标识码: A

Research on Navigation and Positioning Technology for Underwater Unmanned Aerial Vehicles

LI Mingxue

Kunming Shipbuilding Equipment Co. Ltd., Kunming, Yunnan, 650051, China

Abstract: Underwater unmanned aerial vehicles have become increasingly widely used in marine exploration and resource exploitation, and the requirements for navigation and positioning of underwater unmanned aerial vehicles are also increasing. The navigation error size and stability of such equipment directly affect the safety and effectiveness of navigation operations. The article provides a detailed introduction to the main challenges faced by underwater unmanned aerial vehicles in navigation and positioning, including the accumulation of errors caused by large inertial navigation errors, the impact of complex seabed terrain, limitations of sonar navigation, and the inability to integrate multiple sensors well. In order to solve these problems, specific technical measures are proposed from six aspects: improving navigation accuracy, reducing error accumulation, increasing the ability to resist external interference, improving sonar ranging devices, strengthening signal fusion processing from various sources, and enhancing equipment real-time performance and reliability. Research has found that joint navigation and multiple information integration are methods to improve the navigation and positioning accuracy of underwater unmanned aerial vehicles.

Keywords: underwater unmanned aerial vehicles; navigation and positioning; inertial navigation; acoustic positioning

引言

近年来, 在海洋开发战略不断实施的过程中, 水下无人飞行器已经成为进行海洋科学研究、海底矿物开采、水下工程设施探测, 以及维护国家安全的重要设备。不论是进行海底地貌测量、深海资源勘探, 亦或是完成水下电缆巡视监测、打捞搜寻等工作, 都需要飞行器能够在水下有较长的时间稳定工作的能力, 而在水下准确导航定位的能力, 才是飞行器能够完成预定任务并顺利返回的基础条件。“水下导航技术精确度”是水下进行搜寻、探测、反潜等多种任务的必要条件。但是由于电磁波在海水中传播很快就会衰减, 所以 GPS 信号也不能穿过海洋, 在水下的航

行器也无法像陆地和空中平台一样得到绝对坐标值, 它只能依靠船上的各种设备自己进行定位, 这就对它的导航系统有了很高的要求, 要具有很强的自我生存能力并且要在水下恶劣条件下长时间保持良好的定位效果, 这对进行导航定位的技术提出了很大的难题, 下面我就围绕这些问题来加以论述并给出改进方案。

1 导航定位技术在水下任务中的重要性

水下无人飞行器的价值就在于它可以在人类无法面临的复杂海洋环境下承担各种各样的任务, 其中导航定位系统就成为了实现这个价值的基础保障, 精确可靠的连续性的导航定位信息是无人驾驶飞行器能够按照预定路

线进行工作避免障碍物以及顺利返航的基础,也是决定整个水下作业质量好坏的关键因素之一。比如对海底地貌进行测量,如果定位偏差不能得到有效的控制那么所得到的数据就会跟地理坐标产生较大的偏差从而降低其科学的研究价值甚至需要重新测量;而在进行水下考古或者寻找沉船残骸时,导航定位精度关系到探测搜索的效率和精准度。从国家安全方面来看,水下定位导航技术对保障潜艇以及无人驾驶水下航行器等武器装备的隐蔽精确导航定位功能是非常重要的。可以说,导航定位系统就是水下无人航行器最为核心的尖端科技。

2 水下无人航行器导航定位存在的问题

2.1 导航定位精度不足与误差累积问题

水下无人航行器导航以惯性导航为主要方式,最大的优点是完全独立于外界信号源的干扰,但是也有很大的缺点。惯性导航利用积分加速度计、陀螺仪的数值计算得出位置信息,而测量误差会在不断的积分过程中越来越大以至于造成位置偏差越来越大。水下航行器惯性导航误差会随着时间不断的叠加积累,地形高程匹配技术是基于地形特征进行定位的方式,在获得实测地形的基础上可以为惯性导航系统提供需要连续的位置更新修正量。对于长时间的航行任务来说,虽然开始时进行了一次很好的初始化,但是在几个小时之后进行水下的航行,仅仅依靠惯性导航所造成的误差也会达到几百米以上,这对需要开展高精度测量、定点作业的航行器来说是不能容忍的,而且航行器在水下没有足够的外界参照以修正这种累积误差,这就造成了累积误差的问题成为了影响水下无人航行器长时间工作的主要障碍之一。

2.2 复杂水下环境干扰问题

水下环境极端复杂且不稳定,对导航系统造成多种类型的干扰因素。水体是一种非均质介质,声波在不同介质中传播的速度会受到温度、盐度以及深度的影响(声速剖面),从而产生复杂的声径曲率现象并影响声波测距型定位系统的效果。同时由于水下的复杂情况,比如光衰减、散射、流等都会使得水下导航研究十分困难。除此之外还有海流、潮汐活动以及航行器自身产生的震动、动作也会引起附加的随机扰动影响惯性测量单元的工作状态,使得导航系统的噪声无法通过简单的统计模型进行刻画。

2.3 声学导航性能受限问题

声学定位法是当前用于水中取得绝对坐标位置的方法之一,但是该方式也存在一些不足的地方。声波在海水中的传播速率仅有大约 1500ms,在此情况下远远小于电磁波传播的速度,这就意味着采用声学定位时会有很大

的延时问题,而在多个无人航行器相互配合的情况下,这种延时会使得定位变得不够及时。再者,声学信号在传播过程中还会受到多重反射的影响——从发射源发出的声音波被海水底部、水面或者是别的物体反复地反射回来,从而导致接收机很难捕捉到直达波的信息。最后,声呐探测距离越长就需要更大的发射功率以及更庞大的基阵结构,而这对于体积较小或者可以携带的水下滑翔机来说显然是不太现实的。不同的声学定位系统其精度差距也是比较大的,为了更合理地声学系统做出划分的话,可以以声基线的距离作为划分依据,按照其距离的大小来分可分为超短基线系统(USBL/SSBL)、长基线系统(LBL)、短基线系统(SBL),其中USBL/SSBL定位精度较高,误差在两到三点之间,但是到了深水或者远程时其精度就会大大降低。

2.4 多传感器融合与系统性能不足问题

当前水下无人航行器上装备着多种导航仪器,如捷联惯性导航装置(SINS)、多普勒速度测量装置(DVL)、测深仪、磁力探测器、声呐定位器等。导航及定位技术对自主式水下机器人(AUV)完成预定使命和顺利返航至关重要,受限于水下复杂的环境,目前普遍使用的是多套系统集成导航的方法来达到AUV准确的定位,但是多传感器的数据综合利用并不是简单地加在一起就行,也有一定的难点,比如各个传感器之间有空间坐标系不一样的问题,还有杆臂效应导致各个传感器的量测重心之间有偏差却没有得到很好的校正,会产生新的定位偏差。各个传感器所选取的采样速率以及工作时间尺度也不相同,这对时间一致性提出了非常高的需求。另外,不同的传感器也有各自的故障条件:多普勒计数量仪失去底部跟踪后无法得到速度值,深度传感器受波浪干扰后精度降低,声呐设备受到障碍物遮挡后中断等等,而融合算法也要能实时监测到这些问题,并做出相应的改变。表1给出了一些惯性、声呐、多普勒以及地磁等方法对水下无人航行器的信息贡献特性。

表1 不同导航方式的信息贡献比较

导航方式	提供信息	优势	主要局限
SINS	位置、速度、姿态	完全自主、高频输出	误差随时间累积发散
DVL	对地速度	误差不随距离累积	底跟踪失效时无法使用
深度计	深度/高度	精度较高	仅提供一维约束
USBL	相对位置	提供绝对位置参考	作用距离有限、受声线弯曲影响
LBL	绝对位置	精度最高可达 2m	需提前布置海底应答器
地形匹配	位置修正	绝对定位、无需外部信号	依赖先验地图数据

3 水下无人飞行器导航定位优化措施

3.1 提高导航精度的技术措施

鉴于导航精度偏低的现象,高性能惯导器的发展可以在根本上减少漂移速度,然而单靠提高惯导器性能也会带来较高的费用。一种更经济可行的办法就是利用集成导航结构,把惯性导航同辅助观测信息相结合。目前大多数 AUV 采取的方式是以捷联式惯导系统(SINS)为主,辅之以水声测速定位技术和地磁导航技术等。而 SINS/DVL 组合导航是当前水下自主飞行器主流的导航方式,在 SINS 中加装了多普勒测速仪作为其速度观测量,从而对惯性导航产生限制作用,另外还通过深度计对垂直方向上的信息进行限制。从算法方面来说使用高阶非线性滤波器的方法(例如改进卡尔曼滤波 EKF、无迹卡尔曼滤波 UKF 等)可以更好地解决因系统的非线性导致的滤波飘逸的问题;在有先验地形图的地方,地形匹配导航可给惯导系统提供连续不断的位置修正量,在具有地形特征的地方,地形匹配导航算法能给惯性系统提供位置修正量,在有先验地形图的地方,地形匹配导航可以给惯导系统提供位置修正量。最近几年,基于鲁棒粒子滤波的地形匹配方法通过加入稳健估计因子来确定反差因子,根据观测值是否有异常动态更改粗差观测值对最终估计状态的影响,从而大幅度提高匹配定位的精度和稳定性。

3.2 抑制误差累积的改进方法

误差累积的控制可以从算法层面以及任务层面考虑,算法层面上,零速补偿和动态平滑法是比较常用的方法,在飞行器静止或者低速行驶时,飞行器的实际速度很小可以近似认为是 0,这时候就可以用作一个限制条件对惯导系统的累计误差加以修正;而动态平滑法是在得到下一个时间点的测量值之后,对之前的观测状态加以修正和完善,以减少目前时刻的偏误,这种方法适用于多飞行器协作工作的环境当中,在这种情况下,AUV 群同步定位采用的是集群布设阵型以及水声通讯等方法实现定位效果的精确以及稳定性,主从式 AUV 协同导航方案就是依赖主船体的高精度测距参考来实现对接收机的有效标定。当飞行器定期露出水面后接收 GPS 信号更新位置信息时,在露出水面时的导航计算里添加绝对位置限制,便可以很好地消除累积误差。

3.3 抗干扰能力提升措施

增强抗干扰能力要求在传感器信号处理及导航算法方面双管齐下。传感器方面使用光纤陀螺等对环境震动无影响的惯性装置进行自动校正船体运动以及外部扰动引起的测量误差,可以大幅降低噪声带来的影响;而在信号

方面,对于声纳检测所遇到的环境背景噪声问题,则可以通过联合自适应滤波的方法来积极探测并剔除瞬态变化的海洋背景噪音;而在算法方面,基于 Huber 估计算法以及自适应滤波器正在逐步被应用到复杂环境下进行导航状态估算的任务之中,利用 M 估计的自适应平方根扩展容积卡尔曼滤波器可使定位性能得到极大改善,定位误差均方根下降了超过 20%。针对深水环境温度、盐度波动大的条件,通过构建声速剖面在线更新模型来消除声线曲率造成的影响,可以减小声学测距中的偏差。

3.4 声学定位系统优化策略

为了解决声学导航性能不足问题,长基线(LBL)、短基线(SBL)及超短基线(USBL)系统分别有不同优化思路,在 LBL 系统中由布置在海底的声源和接收装置之间的距离确定目标的位置,其精度可以达到 2m,优化方法主要是对基线布局结构的优化设计以及应答器安装位置的准确标注,从而保证定位区域扩大化和定位准确性;而 USBL 系统优化主要围绕多天线间的相位差微分测量、姿态算法调整以及惯性系统紧密集成等方面展开,研究发现利用 MEMS 惯性传感器与 USBL 系统的有效结合可以在限定的成本和能量消耗范围内达到低成本、低能耗的方式。在协同环境下,装备有超短基线声纳定位系统的自主水面艇队为本艇提供周期式的定位辅助从而减少水下自主飞行器的累积误差,在此同时单信标定位技术由于其方便快捷的成本低等优点也逐渐被人们重视起来,它采用把飞行器运动参数以及声学测距量综合考虑的办法来进行定位,目前已经能使精度提高约为 36%。

3.5 多源信息融合优化方法

多源信息融合的关键是如何有效地、稳健地把不同的传感器测得的信息融合成一致的导航解,在水下组合导航中最常用的就是传统的卡尔曼滤波法,但是因为它严重依赖系统的模型以及噪声的分布特点,在复杂的环境中就会出现。为了克服杆臂效应等问题,学者提出含有杆臂误差补偿以及高度异常修正的自适应滤波方式,实验证明这样可以提高大约 10%的水平方向上的导航精度;深度学习算法的应用给信息融合算法提供了新视角。深度学习支持的综合导航系统把以解码器为中心的协方差估算者嵌入到误差状态扩展卡尔曼滤波器当中,动态对时效性和测量噪声进行建模,在实际海洋试验数据中相对于传统方法误差减少了 34.6%~94.6%;另外,水下同步定位与制图(SLAM)对于未知环境的导航定位也提供了一种新的手段,BSLAM 使得 AUV 可以制作精确的海底地貌图并有效地消除了惯性导航系统中的累计误差,这对长时间的

航行来说十分重要。

3.6 提升系统实时性与稳定性的措施

及时性和可靠性是水下无人飞行器导航系统实用化的两个重要指标,在嵌入式设备计算能力不足的情况下,过高的算法复杂度会使得状态更新率降低,从而致使导航的实时输出以及控制系统的响应速度受到影响,提升实时性的方法有精简滤波器中状态的空间维数以减小矩阵计算量,使用误差状态的卡尔曼滤波代替直接状态的滤波可以减轻对数值的依赖程度。多源多传感器技术使用声纳为信息传输的工具,向海里发出一组组声波,然后由接收端来进行数据分析从而得到有关海水的信息。在鲁棒性上构建多级的故障诊断及隔离体系是必要的,在某一个传感器发生故障或者失灵的情况下,可以通过导航系统自行降级或者是选择备用模式来保证重要的导航信息始终处于可用状态。目前基于强化学习的自适应导航方案正在由理论层面上的设计向实践层面的应用转变当中,它可以根据当前所接收到的海况信息及时地对融合系数进行调节从而使得导航装置可以处于相对稳定的运行环境中。

4 结语

水下无人飞行器自主导航定位技术的发展也由单一传感器发展到多源信息融合、传统滤波到智能化辅助智能

导航的重大跨越,在精准把握好惯导漂移积累误差、复杂环境下干扰噪声以及声纳定位局限等问题的基础上才能更好地发挥出水下无人飞行器的功能与潜力。目前,精确的惯导设备、声纳定位、地磁导航、人工智能算法的相互结合产生出新型的自主导航能力,SINS/DVL/USBL联合导航和水下SLAM等相关技术方案也越来越成熟可靠。未来,当水下通信网络及海洋环境信息数据库进一步发展时,水下无人飞行器导航定位系统也将不断向着高精度发展并具有较强的自主性和更好的环境适应性的趋势前进。

[参考文献]

- [1]黎蓉.水下无人飞行器导航定位数据融合技术研究[J].信息记录材料,2023,24(12):129-130.
- [2]张溟酥,王涛,苗建明,等.水下无人飞行器的研究现状与展望[J].计算机测量与控制,2023,31(2):1-7.
- [3]王雷.水下无人飞行器任务分配及路径规划研究[D].武汉:武汉理工大学,2023.
- [4]李厚全,刘宏杰,毛科建,等.水下无人飞行器隐蔽导航方法研究[J].舰船科学技术,2022,44(12):83-87.

作者简介:黎明学(1988—),毕业于西北工业大学热能与动力工程专业,工程师,现就职于昆明船舶设备集团有限公司。