

水下地形辅助导航技术的研究与应用进展*

张静远, 湛剑, 李恒, 饶喆

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘要:在简要介绍水下地形辅助导航基本概念的基础上,从地形辅助导航算法、水下数字地图技术、水下地形辅助导航试验等方面,详细介绍了水下地形辅助导航所涉及各方面的主要问题及研究进展,并对下一步研究方向及应用做出指引与展望。

关键词:自主导航;水下导航;潜艇;水中兵器;地形匹配

中图分类号:TJ630 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)03-128-08

Research and application progress on underwater terrain-aided navigation technology

ZHANG Jingyuan, SHEN Jian, LI Heng, RAO Zhe

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on brief introduction of the conception of underwater terrain-aided navigation, the key problems and research progress of underwater terrain-aided navigation were introduced from the view of terrain-aided navigation algorithm, underwater digital map technology, and experimentation. The direction of research and development of application was pointed out as well.

Key words: independent navigation; underwater navigation; submarine; underwater weapon; terrain matching

潜艇、远程巡航鱼雷、无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)等水下潜器的远程高精度自主导航定位是各国军事装备建设关注的重点和难点问题。惯性导航系统具有较好的自主性、实时性和准确性,是水下潜器自主导航系统的必要设备。但惯性导航系统的导航误差随时间累积,必须定期用外部信息对其进行校准。目前多采用无线电导航信息和卫星导航信息来校准惯导,实现辅助导航。而无线电导航和卫星导航在战时极易受电磁干扰而失去作用,存在使用上的隐患。此外,接收外部信息对于水面航行舰船来说较容易实现,但对于水下潜器,为接收外部校准信息,需浮出或接近水面,这势必影响其隐蔽性,且浪费航程,因此,在各类平台及水中兵器等潜器的应用中,实现完全自主的水下远程精确导航定位是各国努力的方向。

地球磁场、重力场和地形场是良好的辅助导航信息源。其中地形场的研究较早,特别是陆地上的地形辅助导航技术经过30多年的发展,已经趋于成熟并成功运用于飞行器的导航。水下地形辅助导航的研究相对较晚,但是近年来,国外明显

加大了地形辅助导航技术在舰船、潜艇和 underwater 航行器上应用的研究。早在1997年出炉的“2000—2035美国海军技术”发展战略研究中就提出了在2005年将水下航行器的导航精度提高到2000年的10倍的目标,而且明确指出要完成这一任务主要就是采用地形匹配技术,由此可以看出这一技术的重要性。

1 水下地形辅助导航概述

1.1 基本原理

水下地形辅助导航是一种具有自主性和隐蔽性的水下辅助导航定位方法。与陆地应用的地形辅助导航类似,其原理见图1。

该方法首先对潜器任务海域的水下地形进行勘测并依据测绘标准构建该海域的水下三维基准数字地形图数据库。在潜器执行任务时,利用传感器获得潜器所在位置的海底地形信息,并与数据库中的基准数字地形图进行比较,经过连续测量和合适的算法进行匹配运算,最终确定潜器的准确位置信息。将该匹配位置与惯导信息进行信息融合处理,可以较好地修正由于陀螺仪和加速

* 收稿日期:2014-09-30

作者简介:张静远(1964—),男,辽宁大连人,教授,博士,博士生导师, E-mail: jyz503@163.com

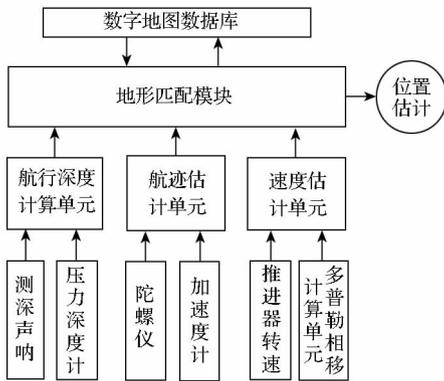


图1 水下地形辅助导航原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of the underwater terrain auxiliary navigation

度计等惯性传感器漂移及数据外推产生的定位误差,辅助惯性导航系统完成水下自主远程精确导航定位^[1-6]。因此地形辅助导航一般不作为独立的导航系统使用,而是作为惯性导航系统的辅助系统使用。

水下地形辅助导航方法可有效减小潜器的导航定位误差,提高潜器的生存能力。原则上讲,该方法与水下潜器的航行时间和航行距离没有关系,可以保证潜器在长时间水下隐蔽航行之后,能够准确地到达任务部署水域,顺利完成作战任务。因此,该方法具有十分重要的军事应用价值。

1.2 研究的主要问题及方向

水下地形辅助导航是一项复杂的系统工程,其关键技术涉及海洋测绘、导航控制、计算机视觉与图像图形处理等领域。由于水下环境较陆地环境更加复杂,水下地形相关设备的研制和进行试验也相对困难,因此其应用所涉及的主要问题与陆地地形辅助导航不完全相同。

从目前的研究情况看,水下地形辅助导航的主要研究方向包括:水下地形测量和基准水下数字地形图的制作;水下地形匹配方法、匹配准则和匹配算法的研究;水下地形特征分析和数字地图分辨率的定性定量分析;水下地形辅助导航航路规划技术;水下潜器惯导解算算法、初始对准和误差补偿方法等。其中,基准水下数字地图的制作和 underwater 地形匹配方法、匹配准则和匹配算法是该应用研究的基础,而水下地形分析、航路规划和潜器惯导解算及误差补偿是成功实现高精度水下地形辅助导航的保证^[6]。

2 地形辅助导航算法

惯性导航是实现水下自主导航的基础。而实现水下地形辅助导航的关键技术之一就是地形匹

配算法。惯性导航算法应用很广,也非常成熟,在水下与在陆地和空中的应用基本相似,这里不做介绍,感兴趣的读者可参考相关文献。对地形匹配算法的研究很广泛,发表的文章也很多。综合起来看,根据地形数据使用方式不同,地形匹配算法可分为地形高度匹配(Terrain Elevation Matching, TEM)技术和景象匹配区域相关器(Scene Matching Area Correlator, SMAC)技术两大类。SMAC技术具有较高的定位精度,但它对设备和地形数据要求高,所以主要用于高精度制导武器的制导。而TEM技术的定位精度虽然不如SMAC,但它对设备和数据要求相对较低,且不易受外界环境变化的影响,所以应用较广。由于水下地形图像信息的实时获取困难,因此水下地形辅助导航多采用TEM技术。

在TEM技术中,根据估计准则的不同,又可以将现有的地形匹配算法分为三种:地形相关匹配算法、基于扩展卡尔曼滤波的匹配算法和基于直接概率准则的匹配算法^[4,6]。

整体上看,水下地形辅助导航算法的理论研究大多是将陆地地形辅助导航算法用于水下,讨论具体应用中存在的问题及其解决办法,较少出现原理和算法上的完全创新,因此,下面简要说明其原理和研究现状。对具体算法感兴趣的读者还可参考与导弹、飞机相关的地形辅助导航算法方面的文章。

2.1 地形相关匹配算法

地形相关匹配算法是地形轮廓匹配(Terrain Contour Matching, TERCOM)系统的核心算法,其基本原理是:当潜器经过设定航线上某些特定地形区域时,通过测深声呐、压力传感器等测量设备获得沿航线的海底地形高程数据,将实测数据与存储设备中的基准数据进行相关度计算,依据最佳匹配算法确定潜器的地理位置。由于地形相关匹配算法是基于最小二乘估计理论,在估计过程中没有考虑被估参数和观测数据的统计特性,因此不是最优估计方法^[5,7-8]。

2.2 基于扩展卡尔曼滤波的匹配算法

基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的匹配算法是构建桑迪亚惯性地形辅助导航(Sandia Inertial Terrain Aided Navigation, SITAN)系统的主要理论依据。其原理是:当潜器在设定航路上航行时,首先由惯导系统提供基准位置信息,通过存储器内基准数字地图指示的地形特征,获得测量的预测值;然后将实际测量值与预测值的

差值和数字地图上对应区域的斜率值通过卡尔曼滤波器进行处理,得到惯导系统状态误差的估计值;最后使用估计值对惯导参数进行修正,得到更准确的潜器导航信息。该算法通过卡尔曼滤波原理把惯导数据与测量数据结合起来进行连续的迭代处理,达到对惯导系统实时修正的目的。但该算法存在地形线性化处理的问题,所以引入误差修正^[9-10]。

2.3 基于直接概率准则的匹配算法

基于直接概率准则的匹配算法首先是由 Johnson 和 Wang 在 1990 年提出^[11],其后 Enns, Morrell 和 Bergman 也分别对该算法进行了改进和完善^[12-18]。其中基于粒子滤波(Particle Filter, PF)的匹配算法就是一种改进算法。该算法以贝叶斯估计、马尔科夫过程和蒙特卡洛理论为基础,将系统状态滤波估计转化为计算基于可得信息的当前状态的条件概率密度分布,并将后验概率密度分布用许多包含系统状态和权值的粒子表示,用粒子群的分布变化近似概率的递推过程,从而实现了对系统状态的连续估计。基于直接概率准则的匹配算法不但可以解决非线性问题,还能解决非高斯条件下的问题,是一种全局最优滤波算法。虽然目前还没有该算法实际应用的报道,但许多仿真结果证明了这种算法优于前两种算法^[2-4,19-27]。

2.4 国内外研究现状

近年来国外对匹配算法的研究比较倾向于基于扩展卡尔曼滤波和基于直接概率准则的匹配方法,包括 Lucido 和 Opderbecke 等在 1996 年国际图像处理年会上提出的多尺度组合算法^[28]、Karlsson 和 Gustafsson 在 2003 年 IEEE 国际统计信号处理会议上提出的粒子滤波改进算法^[29]、Nygren 和 Jansson 在 2004 年海洋工程年会上提出的地形互相关算法^[30]等。瑞典皇家科学院信号处理实验室的 Xie 在其 2005 年的硕士论文中详细地讨论了几种水下地形匹配算法,并通过真实海底地图进行了仿真,得到了各种算法的特性^[31]。

国内在地形匹配算法研究方面,以哈尔滨工业大学、西北工业大学、国防科技大学和海军工程大学为主的硕士、博士研究生对常用的 TERCOM, SITAN 和基于直接概率准则的匹配方法进行了水下地形匹配模型的仿真,并分析了几种主要算法的特点,提出了具体的改进方法^[2-5,10,32-33]。边少锋、郑彤等将常用于地磁匹

配的外加电流阴极保护(Impressed Current Cathodic Protection, ICCP)匹配算法运用到海底地形匹配辅助导航中,也取得了理想的匹配效果^[34]。徐遵义用 Hausdorff 距离作为水深实时测量曲线与海底地形图水深曲线之间的度量函数,提高了匹配精度^[35]。目前国内外在算法方面的研究进行得如火如荼,新的和各类改进的算法不断出现^[33]。

3 水下数字地图技术

要进行水下地形辅助导航,水下平台需要相应的水下基准数字地图。从水下地形辅助导航应用角度看,水下数字地图关键技术主要包括地图数据格式与表征、水下地形图测绘、地形数据分析、基准地形图制作与可视化等。由于地理信息系统方面的研究比较成熟,大地测量技术也比较发达,这里仅简要说明水下数字地图所涉及的难点问题及研究情况。

3.1 水下地形图关键技术

从描述水下环境的地图数据格式上来说,数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)具有便于存储、更新、传播和计算机自动处理以及多比例尺特性,特别适合各种定量分析与三维建模^[36],因此被广泛应用于地学、测绘、遥感、工程计算、环境规划等领域,在军事上特别是空中平台的导航上也有重要的应用。从目前的研究结果看,采用数字高程模型作为表征水下地形的基本模型应用于水下地形匹配导航是十分科学的。

由于水下环境与空中环境差异巨大,水下地形测量面临着许多难题。如受测深声呐波束宽度、工作频率、信息率等海洋测量手段和海洋环境的限制,海底地形测量的精度和准确度难以达到较高水平;数字地图的分辨率是表征数字地图表达地形精细程度的重要参数,也是直接影响地形匹配精度的重要因素。经仿真研究^[37],分辨率很高时,信噪比小,计算量大,耗时长;分辨率很低时,匹配误差均值下限随之线性增加,因此地图分辨率太高或者太低都不会得到较高的匹配精度。如何确定基准地形图的分辨率本身就是值得研究的重要问题。特别是误差篮子、匹配网格数等参数都与分辨率和匹配精度相关,要明确的选定分辨率等参数,除了需综合考虑上述各方面因素之外,还要根据任务的要求,再加上试验与计算反复分析确定。即使对于同一幅数字地图,水下平台在不同的测量采样间隔和航行速度下,数据的匹配性能也会发生变化。

在地图分析技术已有效解决匹配区选择的条件下,匹配区面积大小和相邻匹配区间距的确定本身也是应用中的难点之一。图幅的大小可以从绝对大小和相对大小两种角度来理解。绝对大小是指地图实际代表的地理区域的面积大小。一幅用于水下地形辅助导航的数字地图的绝对大小,就是要保证水下潜器在惯导系统存在误差的情况下,在潜器从开始匹配到结束的全过程都能够使潜器处于地图覆盖的区域之中。而相对大小是指含有数量上足够多、范围足够广的网格,以保证完全覆盖匹配算法所需要搜索的全部网格区域。由于匹配区的地图不可能无限大,因此这里所说的保证覆盖应理解为以一个较高的概率覆盖,对这一覆盖概率还有待进一步研究。同时,相邻匹配区域的间隔大小应保证潜器在惯导系统的作用下可靠进入匹配区,而这与航路规划又是密切联系的。

此外,由于受到洋流等影响,水下平台的运动和姿态的稳定性远不如空中平台,如何消弭因为姿态的不稳定而造成的测量误差、保证测量精度和实际导航应用时的导航精度均值得深入探讨。将潮汐周期随经纬度变化等各种海洋水文信息与海洋地形信息整合到一起,形成有特色的海洋地理信息系统,为各类潜器提供军事海洋环境信息保障,本身就是一个大的研究方向和工程领域。

从水下地形辅助导航应用来说,进行航路规划过程需要水下数字地图的可视化。虽然地形匹配只是一个数据处理的过程,对于计算机而言完全可以在后台进行,但是不论从实验研究还是最终应用的角度来说,将水下地形辅助导航的全过程以一种可视化的方式呈现出来,都是非常必要的。

3.2 国内外研究情况

海底地形数据库是进行海底地形辅助导航所需的基本数据源。海底地形图为海底地形导航提供了基础条件,但要使之适合海底地形辅助导航的需求,还需对基本数据进行组合优化和结构的重新设计。美军为此已经建立了包含海底地形结构的三维电子海图的标准。

美国国家图像测绘局(National Imagery and Mapping Agency, NIMA)已建立了一个名叫DBDB 0.5的海底地形数据库,其分辨率达到0.5角分。为配合海军弹道导弹(Fleet Ballistic Missile, FBM)计划,美国海军海洋局(Naval Oceanographic Office, NAVOCEANO)也开发出类似DBDB 0.5的海底地形数据库,只是其分辨率更

高,并在近期已广泛应用于弹道导弹战略核潜艇(Strategic Submarines Ballistic Nuclear, SSBN)。

国内在水下地形辅助导航应用的水下数字地图的制作方面的研究整体情况未见详细报道。但有部分单位对水下数字地图及其测量技术进行了初步研究,结合匹配算法和测量仪器特性,对地形图的分辨率要求及地形精度对导航精度的影响等具体关键问题进行了分析研究。在数字地图制作方面,分别提出了“基于Delaunay三角形的三维数字地图生成算法”^[38]、“基于电子海图的海底地形生成方法”^[39]、“基于多波束和ArcGIS的海底地形数据库建立”^[40]等方法。海军工程大学还对因特网上公开的部分海域水下地形数据进行了整理,研制了水下地形测量系统,对部分内陆湖泊湖底地形进行了较完整的测量,制作了可以进行原理演示试验和仿真应用的湖底数字地形图^[33,41]。

在水下地形可视化研究方面,目前国内外正在研究以现有的电子海图为基础,将地形匹配与之对接,使其能在电子海图上显示匹配导航的全过程。

4 水下地形辅助导航试验

4.1 试验系统构成和试验平台

参见图1,水下地形匹配辅助导航系统的基本构成包括:惯性导航系统、深度传感器与测深设备、速度传感器与速度估计、基准水下数字地形图和地形匹配模块。在水下地形辅助导航系统中,一般采用惯性导航系统以提供主要的导航信息;水下潜器距海平面的深度由自身携带的深度传感器测量,潜器到海底的深度可以采用声呐测深装置;匹配模块主要是采用计算机系统来完成,它内部存储了预定区域的基准水下数字地形图,该基准数字地形图需要事先利用水面舰船或潜器进行测绘并分析得到。

由于直接进行水下潜器的水下地形辅助导航试验非常困难,因此,研究初期,大多是利用水面舰船进行水下地形辅助导航试验。即建立一个由水面舰船搭载的试验平台,完成水下地形的探测及数字地图形成和水下地形辅助导航的原理验证两项功能。该试验平台包含的主要设备有:惯性导航系统、测深声呐、航速测量装置、导航处理计算机及相关水下地形匹配辅助导航系统软件。此外还需配备全球定位系统(Global Positioning System, GPS)或北斗等定位设备,用于指示标准

航路和准确位置信息^[33,41]。

在试验平台构建方面,所能查找到的资料中并没有翔实的系统实物实例和具体的软件程序介绍。多数资料都只是对相关的系统流程框图和试验方法进行了简要介绍和讨论。

4.2 国外海上试验与在水下潜器上的应用

由于海底地形和地形辅助导航系统与武器装备和作战使用密切相关,各国对这方面的技术细节是保密的,所以国外武器是否装有水下地形辅助导航系统还不得而知。但从各种技术文献和报道中能够得知各国都很注重这方面技术的研究和试验,有些国家已经完成了该项技术在自主式水下潜器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)上的测试试验,部分国家的 AUV 产品介绍中已经注明了水下地形辅助导航模块作为选项。下面仅简要列出国外在该领域的试验研究案例。

(1)瑞典皇家科学院电器工程分院的 Nygren 提出了一种基于最大似然估计的地形匹配算法,该算法适用于配备多波束声呐的航行器,其本质是 TERCOM 算法在多波束测量条件下的扩展。为充分了解算法的特性, Nygren 引入了克拉美罗界、地形相关性等概念,讨论了水下地形、波束数目、波束模式和匹配步长对匹配结果的影响,设计并研制了一套水下地形匹配实验系统,并进行了两次海上实验,证明了该算法的实时性和可行性^[30]。此后, Nygren 在此研究基础上,为瑞典装备防务部(Swedish Defense Materiel Administration, SDMA)的两型自航潜器 AUV62F 和 Sapphires 设计了能在平坦地形区域进行匹配的地形辅助导航系统^[42]。

(2)瑞典林克平大学电子工程系的 Karlsson 在其 2005 年的硕士论文中详细地讨论了用于水下地形辅助导航的匹配算法和试验平台的搭建方法,通过湖上试验,得到了湖底的区域水下地形图,并利用模型仿真验证了基于粒子滤波的水下地形匹配算法在辅助导航上应用的可行性^[43]。

(3)瑞典萨博水下航行器系统公司生产的 AUV62 系列鱼雷型水下潜器也具有水下地形匹配辅助导航功能^[44]。2003 年,瑞典海军通过潜艇发射该型潜器,并对 AUV62 的系统进行了测试。为了长时间航行,采用了锂电池代替铅酸电池,泵喷推进系统,航速在 3 节到 11 节之间。为了达到导航试验的目的,该潜器配备了齐全的导航设备,其惯性导航测量装置包括激光陀螺 Kearfott T16 - B、加速度计、多普勒测速仪,还装备了 GPS 接收机和水下相机,并将多波束测深声呐 EM7200 安装于潜器前段。该声呐主要用于进

行探矿和地形辅助导航,各传感器间通过局域网总线结构实现信息的互通。测深仪和惯导系统的数据通过总线传送到 PC - 104 计算机中进行相关运算。其地形匹配算法采用一种非线性地形相关度匹配算法,它的性能优于通常使用的线性匹配算法。尽管该算法不能显式地给出估计误差与克拉美罗界的差距,但通过实验证明,这种方法在大多数情况下都能相当逼近克拉美罗界。

(4)美国斯坦福大学宇航实验室也针对水下地形辅助导航进行了较多研究,其中既包括粒子滤波、质点滤波水下地形匹配算法,也包括水下数字地图精度、测深传感器性能和惯导系统精度等对匹配精度的影响。通常,水下地形匹配模块都是直接使用惯导输出的导航信息进行匹配运算,被称作松散结构。而 K. Deborah Meduna 针对工程应用背景,提出将惯性元件输出参数直接传给匹配模块进行滤波运算的紧固结构,并选取两部性能差异较大的 AUV 进行了相关海试。其中,地图构建自主水下航行器(Mapping Autonomous Underwater Vehicle, MAUV)配备了高性能惯导设备和多波束声呐,导航精度较高,而深海成像自主水下航行器(Benthic Imaging Autonomous Underwater Vehicle, BIAUV)则仅配备了低性能惯导设备和多普勒声呐,加之设备老化,其导航精度很低。海试结果证明,紧固结构水下地形辅助导航系统能够很好地克服测量设备精度对匹配结果的影响,在 1m 分辨率的数字地图上,其导航精度能达到 5 ~ 10m^[45]。

(5)英国南安普顿大学的 Morice 和 Veres 等利用 Autosub 6000 AUV 进行了水下地形辅助导航实验。该潜器采用惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)和多普勒测速声呐(Doppler Velocity Log, DVL)作为主导航方式,利用 EM2000 多波束声呐作为测深设备,并以粒子滤波方式进行匹配运算。为提高粒子滤波各时刻重采样的充分性,采用了 KLD(Kulback - Leibler Divergence)重采样准则。在摩洛哥阿加迪尔海峡的实验中,AUV 保持在水下 120m 处航行,在有横滚估计的情况下,其东向、北向和深度的估计误差分别在 20m, 40m 和 1.5m 以内^[46]。

(6)2002 年 5 月到 6 月,北约组织六家单位进行多次海试,其中挪威康士伯公司研制的 HUGIN 潜器就装备有挪威防御研究中心研制的地形辅助导航设备,该机构网站还给出了该潜器性能及导航系统结构框图的介绍^[2]。挪威研制的 HUGIN1000 型 UUV,主要用于执行水下测绘

和 underwater 环境快速鉴定,同时承担了深水猎雷和隐蔽侦察水雷任务。该航行器配备有多波束回声测仪和双频侧扫声呐、HG9848A 惯性测量装置、多普勒计程仪、磁罗经和压力传感器等导航传感器,导航定位精度较高。而 HUGIN3000 型 UUV 装备的是基于卡尔曼滤波的惯性导航系统,该系统能够精确地计算载体的位置、速度和航向信息,其基本数据采集来源于惯性测量装置的加速度计和陀螺仪。

(7)挪威防御研究中心采购了 HUGIN 1000 HUS 等多部自航潜器,并利用它们进行了多年的水下地形匹配算法研究。其中,既有传统的 TERCOM 算法,也有基于贝叶斯准则的质点滤波匹配算法和粒子滤波匹配算法。为进一步研究水下地形辅助导航技术,挪威防御研究中心研制了 TerrP 系统,并分别于 2009 年和 2010 年进行了两次海上实验。其中,第一次实验地点选在挪威海岸的熊岛附近,那里水下地形相对平坦,但多留有冰川移动的痕迹。实验中采用 EM 2000 多波束声呐,经过 7h 近 50km 的潜航,潜器定位精度达到 4m。第二次实验地点选在挪威奥斯陆,实验中采用 HG9900 惯性测量元件、RDI WHN 300 多普勒声呐和分辨率为 10m 的水下数字地图。经过 5h20min 的水下航行,潜器定位精度达到 10m^[47]。

(8)澳大利亚的悉尼大学机器人研究中心自行研制的“Oberon”水下机器人装载了多种传感器,包括彩色照相机、深度传感器、两个低频的地形扫描声呐和陀螺等。声呐作为主要的环境探测传感器,获取环境信息进行 UUV 自身定位和全局地图创建。该 UUV 的试验表明,他们对同步定位与地图创建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)技术的研究取得了很好的效果,成为 SLAM 研究领域参考的优秀代表。

(9)美国《美日防务》2006 年 1 月 6 日报道,洛克希德·马丁公司与美国军方签订了 1060 万美元的修订合同,把传感器阵列集成到海军的“先期发展无人潜器”中,使其具有三维障碍探测与识别、甚高频(Very High Frequency, VHF)通信和三维海底探测能力。此外,美国的 LOST2 也具备一定的地形辅助导航能力。

4.3 国内试验研究进展

国内极少见到开展水下地形辅助导航试验的报道。海军工程大学近年来较系统地研究了水下地形匹配导航的实现方法和关键技术,进行了基于惯性导航平台的地形辅助导航定位算法设计,研究了平台运动补偿等提高导航定位精度的具体

方法和技术。在此基础上,研制了船载水下地形匹配辅助导航原理试验系统,在木兰湖进行了湖底地形测量,进行了数字地图的制作,并随后在湖上进行了初步的水下地形匹配导航定位原理验证试验,通过由 GPS 信息给出的实际轨迹、由惯导信息推算的航路轨迹以及经地形匹配修正后的惯导信息推算轨迹这三条轨迹的比较,证明了水下地形辅助导航的可行性和其较好的精度,取得了阶段性的成果^[33,41]。

5 应用展望与下一步研究方向

5.1 应用展望

在空间领域,美军的无人作战飞机已经具备了全球范围的作战能力,对定点打击恐怖势力发挥了重要作用,对一些“敌对”力量形成了极大的战略威慑和军事压力。而利用空间飞行器,实施 1 小时全球范围内打击的空天无人作战武器也经历了多次试验。可见,无人作战平台乃至作战机器人将在未来战场上发挥越来越重要的作用。

在水下,除了平台应用外,各种的 AUV、UUV 发展迅速,武器级 UUV 必将成为未来水下无人作战单元的首选。而要实现完全自主的水下作战,长时间水下自主精确导航定位是必须解决的难点问题。特别是对于区域封锁作战,几艘自主攻击型 UUV 将有效阻止大型水面舰艇编队。而地形辅助导航技术,因其特别适合长时间水下自主精确导航,必将在有此类需求的各种水下潜器中得到越来越广泛的应用。

5.2 需要开展的基础研究工作

从地形辅助导航的理论研究和工程应用两不同角度,可以将所需要的基础研究工作归纳为如下几个主要方面:

(1)深海地形测量中的声学问题。水下地形辅助导航过程中需要实时用声呐测量海底地形数据,潜器到海底这段距离的声速是多少、声线是如何弯曲、不同地域不同时间的海洋声传播的规律和模型直接影响到测量精度。在浅海域进行地形测量,由于距离海底近,声程短,误差较小可以忽略。但在深海域就不能忽略这种测量误差了,因此研究清楚深海高精度声学测深问题,对于海底地形测绘和导航应用均十分必要。

(2)地形辅助导航算法。地形辅助导航算法是实现水下地形辅助导航的核心之一。匹配算法说到底还是估计理论的问题。在匹配算法的演化进程中伴随着估计理论的发展,现在已发展到基于

概率准则的非线性估计。如果在非线性估计理论方面有了发展,相信也会推动匹配算法的发展。

(3)海洋环境信息的融合与海洋环境数据库的建立。从军事角度看,海洋环境就是战场环境。战场环境的建立离不开各种信息的融合。海洋的各种地质地貌、地磁、重力场、洋流、潮汐、温度、盐度、声速梯度等地质水文信息条件都会对处在海洋环境中的航行器产生影响。例如由于受到洋流等影响造成水下平台存在运动和姿态的稳定性问题,因此,对于水下平台的精确控制、运动补偿和由于姿态的不稳定而造成的测量误差,都有赖于海洋环境信息的保障。而通过长期的实地测量和数据整理,融合各种信息,形成关注海域乃至全球海域标准的融合地形、地磁、重力场等信息的海洋地理信息系统,提供准确实时的地理数据保障,意义重大,需要在国家安全层面加以规划和组织。

6 结论

众所周知,地形辅助导航技术在导弹、飞机等空中飞行武器装备上已广泛应用。本文从地形辅助导航算法、水下数字地图技术、水下地形辅助导航系统构成及试验等不同方面,介绍了水下地形辅助导航所涉及的主要问题及研究进展,结果表明,目前国外在水下地形匹配技术上投入了大量人力物力进行研究,西方一些国家已经研制出具备水下地形匹配功能的试验系统并进行了多次水下试验,安装有该系统的小型水下潜器也获得了技术上的突破,已经有水下地形辅助导航模块在商用 AUV 上作为选项采购。因此,利用地形匹配技术作为辅助导航手段来提高水下运动体的导航精度是完全可行的,它有望成为根本上解决水下远程高精度自主导航定位的有效手段。另外,在进一步深入水下地形辅助导航理论与应用研究的基础上,大力开展配套的海洋环境数据库等基础条件建设工作,对把我国建设成为海洋强国具有十分重要的意义。

参考文献 (References)

[1] 李临. 海底地形匹配辅助导航技术现状及发展[J]. 舰船电子工程,2008,28(2):17-19.
LI Lin. Present and development of ocean floor terrain matching technology for supplementary navigation [J]. Ship Electronic Engineering,2008, 28(2): 17-19. (in Chinese)

[2] 刘承香. 水下潜器的地形匹配辅助定位技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
LIU Chengxiang. A study on terrain matching assistant positioning technology for underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese)

[3] 辛廷慧. 水下地形辅助导航方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
XIN Tinghui. Underwater terrain assistant navigation method research [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)

[4] 冯庆堂. 地形匹配新方法及其环境适应性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2004.
FENG Qingtang. Research on new methods and environmental adaptability of terrain matching [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)

[5] 李小鹏. 潜艇海底地形辅助导航技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2001.
LI Xiaopeng. A study on ocean floor terrain matching assistant navigation technology for submarine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001. (in Chinese)

[6] 张静远,顾宏灿,张洪刚,等. 武器探测与精确制导原理[Z]. 武汉:海军工程大学,2013.
ZHANG Jingyuan, GU Hongcan, ZHANG Honggang, et al. Principles of weapon detection and precision guidance [Z]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2013. (in Chinese)

[7] Baird C A, Abramson M R. A comparison of several digital map-aided navigation techniques [C]//Position Location and Navigation Symposium, 1984:286-293.

[8] Priestley N. Terrain referenced navigation [C]//Position Location and Navigation Symposium, 1990:482-489.

[9] Andreas R D, Hosteller L D, Beckmann R C. Continuous Kalman updating of an inertial navigation system using terrain measurement [C]//NAECON78, 1978:1263-1270.

[10] 王涛. 桑迪亚惯性地形辅助导航算法及应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
WANG Tao. Study on arithmetic and application of Sandia inertia terrain-aided navigation [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)

[11] Johnson N, Wang T, Howell G. Terrain aided navigation using maximum a posteriori estimation [C]//Position Location and Navigation Symposium, 1990:464-469.

[12] Enns R, Morrell D. Terrain-aided navigation using the Viterbi algorithm [J]. Journal of December, Control and Dynamics, 1995,18(6): 1444-1449.

[13] Bergman N. Bayesian inference in terrain navigation [M]. Sweden: Linköping Studies in Science and Technology,1997.

[14] Bergman N. Recursive Bayesian estimation navigation and tracking applications [M]. Sweden: Department of Electrical Engineering Linköping University, 1999: 26-128.

[15] Bergman N, Ljung L. Point-mass filter and Cramer-Rao bound for terrain-aided navigation [C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, 1997.

[16] Bergman N. Deterministic and stochastic Bayesian methods in terrain navigation [C]// Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998.

[17] Bergman N, Ljung L, Gustafsson F. Terrain navigation using Bayesian statistics [J]. IEEE Control Systems, 1999,19(3): 33-40.

[18] Bergman N. Terrain navigation using sequential Monte Carlo methods [D]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

[19] Ridgeway G, Madigan D. A sequential Monte Carlo method for Bayesian analysis of massive data sets [J]. Journal of Knowledge Discovery and Data Mining, 2002(7):301-319.

[20] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian

- tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2):174-188.
- [21] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to non-linear and non-Gaussian Bayesian state estimation[C]//Proceedings of IEE Radar and Signal Processing, 1993, 140(2):107-113.
- [22] Karlsson R, Bergman N. Auxiliary particle filters for tracking a maneuvering target[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, 2000, 4:2891-3895.
- [23] Karlsson T. Terrain aided underwater navigation using bayesian statistics[D]. Sweden: Linköpings University, 2002.
- [24] Cheng C, Ansari R. Kernel particle filter for visual tracking[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(3):242-245.
- [25] Beadle E R, Djuric P M. A fast-weighted Bayesian bootstrap filter for nonlinear model state estimation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1):338-343.
- [26] Bolic M, Djuric P M, Hong S J. New resampling algorithms for particle filters[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2003(2):589-592.
- [27] Yang N, Tian W F, Jin Z H. Particle filter for sensor fusion in a land vehicle navigation system[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(3):677-681.
- [28] Lucido L, Opperbecke J, Rigaud V, et al. Terrain referenced underwater positioning using sonar bathymetric profiles and multiscale analysis[C]//Proceedings of OCEANS, MTS/IEEE, 1996(1):417-421.
- [29] Karlsson R, Gustafsson F. Particle filter for underwater terrain navigation[C]. 2003 IEEE Statistical Signal Processing, 2003:526-529.
- [30] Nygren I, Jansson M. Terrain navigation for underwater vehicles using the correlator method[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3):906-915.
- [31] Xie Y R. Terrain aided navigation[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2005.
- [32] 湛剑. 基于粒子滤波的水下地形匹配算法研究[D]. 武汉:海军工程大学, 2008.
SHEN Jian. The research on the underwater terrain matching method based on particle filter[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2008. (in Chinese)
- [33] 湛剑. 基于非线性滤波的水下地形匹配算法研究[D]. 武汉:海军工程大学, 2012.
SHEN Jian. The research on the underwater terrain matching method based on nonlinear filter[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012. (in Chinese)
- [34] 郑彤, 边少锋, 王志刚. 基于 ICCP 匹配算法的海底地形匹配辅助导航[J]. 海洋测绘, 2008, 28(2):21-23.
ZHENG Tong, BIAN Shaofeng, WANG Zhigang. The terrain matching assistant navigation based on ICCP algorithm[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(2):21-23. (in Chinese)
- [35] 徐遵义, 晏磊, 宁书年, 等. 基于 Hausdorff 距离的海底地形匹配算法仿真研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(9):7-9.
XU Zunyi, YAN Lei, NING Shunian, et al. Research on seabed terrain match algorithm simulation based on Hausdorff distance[J]. Computer Engineering, 2007, 33(9):7-9. (in Chinese)
- [36] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 2000:2-155.
LI Zhilin, ZHU Qing. Digital elevation model[M]. Wuhan: Wuhan Technologic University of Surveying and Mapping Press, 2000:2-155. (in Chinese)
- [37] 罗轩. 水下地形匹配辅助导航数字地图技术研究[D]. 武汉:海军工程大学, 2009.
LUO Xuan. Study on digital map technology of underwater terrain matching aided navigation[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2009. (in Chinese)
- [38] 刘承香, 赵玉新, 刘黎明. 基于 Delaunay 三角形的三维数字地图生成算法[J]. 计算机仿真, 2003, 20(5):22-24.
LIU Chengxiang, ZHAO Yuxin, LIU Fanning. Generating algorithm of three-dimension digital map based on Delaunay triangle[J]. Computer Simulation, 2003, 20(5):22-24. (in Chinese)
- [39] 湛剑, 严平, 张静远. 基于数字图像处理的海底三维地形重建方法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(10):90-93.
SHEN Jian, YAN Ping, ZHANG Jingyuan. A method for reconstructing 3D seabed digital map based upon image processing[J]. Computer Simulation, 2009, 26(10):90-93. (in Chinese)
- [40] 马建林, 来向华, 郭德方. 基于多波束和 ArcGIS 的海底地形数据库建立[J]. 海洋学研究, 2005, 23(3):8-13.
MA Jianlin, LAI Xianghua, GUO Defang. The construction of seafloor terrain database based on multi-beam and ArcGIS[J]. Journal of Marine Sciences, 2005, 23(3):8-13. (in Chinese)
- [41] 李恒. 基于水下地形匹配的捷联系统误差估计方法研究[D]. 武汉:海军工程大学, 2011.
LI Heng. The research on error estimation methods of strapdown inertial navigation system based on underwater terrain matching[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2011. (in Chinese)
- [42] Nygren I. Terrain navigation for underwater vehicles[D]. Sweden: Royal Institute of Technology (KTH), 2005.
- [43] Karlsson T. Terrain aided underwater navigation using Bayesian statistics[D]. Sweden: Linköping University, 2002.
- [44] HUGIN AUV Programs. FFI's HUGIN AUV webpages[EB/OL]. 2011-02-01. <http://www.ffi.no/hugin/>.
- [45] Meduna D K. Terrain relative navigation for sensor-limited systems with application to underwater vehicles[D]. America Stanford: Stanford University, 2011.
- [46] McPhail S. Autosub6000: a deep diving long range AUV[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(1):55-62.
- [47] Anonsen K B, Hagen O K. An analysis of real-time terrain aided navigation results from a HUGIN AUV[C]. MTS/IEEE OCEANS 10 Conference, 2010.