

水面无人艇环境感知技术及应用发展

张安民^{1,2}, 周健¹, 张豪¹

1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

2. 天津市港口环境监测工程技术中心, 天津 300072

摘要 水面无人艇的环境感知能力是其执行任务的前提和基础。介绍了水面无人艇的发展现状, 特别是近年来中国在无人艇领域的研发成果; 总结了当前水面无人艇在自体状态感知和外界环境感知(主动式感知、被动式感知、融合式感知)领域的研究现状, 分析指出各类环境感知技术的优势和不足。根据未来发展需求, 提出基于水面无人艇的高精度水文信息反演、海-空协同观测、海洋中尺度现象观测、海洋军事信息搜集等环境感知技术和应用方向的关键技术。

关键词 水面无人艇; 环境感知; 海洋观测; 信息搜集; 海-空协同

随着无人车、无人机技术的逐渐成熟, 无人系统在海洋中的应用也越来越广泛。水面无人艇(unmanned surface vehicles, USV, 简称无人艇)是能够在海洋、河流等环境中自主完成任务的平台, 是自动驾驶技术在水面环境中应用的最主要体现^[1]。相较于载人船舶、浮动平台、UUV(unmanned underwater vehicles)等水上、水下设备, 无人艇具有操纵性强、部署方便、覆盖范围广、成本低的优点^[2]。同时由于非载人的特点, 无人艇能够适应更加危险的工作环境, 在一些人类不可达的场景中进行作业, 因而具有十分广阔的应用前景。为了充分满足航行与作业的要求, 无人艇上应存在满足各种应用需求的子系统, 图1给出了各个子系统在无人



图1 无人艇系统构成

收稿日期: 2019-10-20; 修回日期: 2019-12-30

基金项目: 国家重点研发计划基金项目(2018YFC1407400)

作者简介: 张安民, 研究员, 研究方向为 e-航海、无人艇与海洋测绘, 电子信箱: zhangamin@sina.com

引用格式: 张安民, 周健, 张豪. 水面无人艇环境感知技术及应用发展[J]. 科技导报, 2021, 39(5): 106-116; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.05.012

艇上的构成以及通常所包括的设备情况。

环境感知是指无人智能设备通过传感器捕获等手段,对本体状态以及所处环境中的环境参数、周围动态、多尺度目标的相对距离、角度和运动状态等进行获取^[3]。但是由于海洋环境信息具有来源广、层次多、形式复杂、时效性强、数据海量、时空尺度不均等特点,并具有随机动态性、状态多维性^[4],使得无人艇对环境的全面、精确感知成为实现其完全自主航行的最大挑战之一。本文对当前无人艇及其环境感知技术的发展现状进行总结并提出展望,为其环境感知技术的深入研究提供思路。

1 无人艇发展现状

无人艇最早起源于第二次世界大战时期^[5],此后以美国、以色列、日本和欧盟为首的各国展开对无人艇的深入研究,这些国家也代表了当前无人艇的先进水平。自从2012年起,美国海军研究办公室(Office of Naval Research)开始每隔2年组织举办Maritime RobotX Challenge挑战赛,该赛事是目前全球水平最高的无人艇公开赛事,且参赛的国家及队伍数量逐渐增多。由此可以看出,世界各国对无人艇技术的发展越来越重视。国际上无人艇的发展在文献[1]和[2]中有详细综述,这里只针对近年来中国高校、企业无人艇的发展进行介绍。

中国的无人艇技术与国外相比起步较晚,但是近年来也取得了十分显著的进步。哈尔滨工程大学船舶工程学院与深圳海斯比公司发布了联合研制的“天行一号”无人艇^[6](图2)。该艇最高航速超过50 kn,最大航程1000 km。此外哈尔滨工程大学船舶工程学院在无人艇的路径跟踪、自动避碰、协同控制等方面都有深入的研究^[7-9]。广东华中科技大学工业技术研究院研发了“HUSTER”系列无人艇(图3),主要用于多艇协同技术以及无人艇-无人机配合方面的研究^[10-11]。上海大学无人艇工程研究院研发出了“精海”系列1~8号无人艇^[12]。其中“精海1号”(图4)成功完成了对南海诸岛礁的水下地形测量和水文信息采集^[13];“精海2号”参与南极科考任务,完成了水下地形测绘和海岸线测

量。上海海事大学航运技术与控制工程交通行业重点实验室相继研发了“海腾”“海翔”等系列无人艇,可用于水质监测、航道测量以及水上搜救等任务^[14]。此外,上海交通大学自动化系^[15-16]、天津大学



图2 “天行一号”无人艇



图3 “HUSTER-68”无人艇



图4 “精海”1号无人艇

海洋学院^[17]、大连海事大学航海学院^[18]等单位均在无人艇的研究应用中作出了大量工作。

另一方面,随着水上无人艇应用市场的扩大,中国近年来涌现出许多致力于无人艇/船研发的企业。例如,珠海云洲、科微智能、劳雷绿湾等科技公司均针对不同用途研发出了多款可用于环境监测、海洋调查、安防救援、海洋运输中的无人艇。可以看出,中国的无人艇商业化进程发展较快,产业链正在逐渐完善。

2 无人艇环境感知技术

无人艇的环境感知从广义上可分为本体状态感知和外界环境感知2类。本体状态感知是保证无人艇稳定航行的关键,主要包括无人艇的运动状态信息(航向角、船速、位置等)和姿态信息(横、纵倾角,横、纵摇,升沉幅度)等^[19]。外界环境感知则是无人艇根据自身用途对特定信息的获取,主要包括障碍物信息、气象条件、水文条件等方面的综合信息^[20]。

2.1 无人艇本体状态感知

无人艇的工作环境具有高动态、变化性等特点,而自身状态也会随着环境的不同发生变化,因此精确的本体状态感知是无人艇能够安全执行任务的前提与基础。随着各种导航系统以及计程传感器技术的发展,无人艇的航向、速度、位置等信息已经能够较为精确地获取。因此在无人艇领域,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)与惯性导航系统(inertial navigation system, INS)高精度组合定位、测姿模式及高精度组合导航滤波算法成为当前主要的研究内容之一。Onunka等^[21]提出了一种四元数与DCM(direction cosine matrix)结合的方法,采用GPS和INS传感器组合的形式,进行了准确地无人船位置和姿态测量。王国庆^[22]针对MEMS-IMU(micro-electro mechanical systems, inertial measurement unit)的INS/GNSS紧耦合组合导航系统的强非线性问题,提出一种基于贝叶斯估计理论的改进混合粒子滤波算法框架。

Xia等^[23]将GNSS/INS组合导航测姿系统应用于无人船中,结合PF(particle filtering)和UKF(unscented Kalman filtering)滤波,提出了一种非线性无迹粒子滤波(unscented particle filtering)算法。

此外,无人艇及其设备的无故障运行是其能够生存进而稳定工作的关键之一,因此无人艇自身的可靠性感知也可纳为本体状态感知的一部分。针对海洋无人系统稳定性评估的研究最早开始于AUV(autonomous underwater vehicles),Griffiths等^[24-25]利用Weibull参数模型评估了AUV在不同运行条件下的可靠性,发现出现严重故障的大多是其搭载的机电设备,很少会涉及AUV的自主性。尹莉莉^[26]利用贝叶斯网络算法分别提出了无人艇的感知能力、生存能力、航行能力和通信能力可靠性评估的模型,并提出了海上无人系统本体认知语义框架^[27-28]。Zhang等^[29]研发出了可调自主系统的态势感知模块,包括事件监测、威胁评估和态势原因,并可应用于陆、海、空各类无人系统中。

2.2 无人艇外界环境场感知

根据获取信息的途径,可将无人艇的外界环境感知分为主动感知、被动感知和融合式感知3种。主动感知是指不依靠其他机器个体或人为干涉,单纯通过自身设备对环境信息获取的感知手段;被动感知是利用通信手段获取其他设备采集的信息或由人工进行环境数据输入并处理的一种共享型感知方式^[20]。融合式感知方法则是上述两种感知方法的综合应用。早期的无人艇是利用单一传感器捕获原始信息,经过处理、计算后得到需要的数据。目前大部分无人艇采用多传感器融合的方式实现对周围环境的感知和目标的获取,表1列出了世界各国具有代表性的无人艇所采用的环境感知技术及用途。

2.2.1 主动式环境感知方法

主动感知包含信息获取和处理2个过程,信息获取主要是通过自身搭载的各种传感仪器设备,对获取到的信息进行处理,从而转化为机器可以识别的电信号,进而传递给处理模块,处理模块再对这些信号进行换算和整合,从而得到完整的环境信息。

表1 无人艇环境感知技术

无人艇名称	研发国家/机构	环境感知技术	用途
Spartan Scout ^[30]	美国	GPS系统、情报、监视和侦察(ISR)系统、视觉和红外传感器	军事侦察、武装打击
Protector ^[31]	以色列	光电监控、瞄准系统、GPS系统和雷达	反潜作战、军事侦察、武装打击
UMV Series ^[32]	日本	水下摄像机、声呐等常用设备	海洋、大气的生物地球化学和物理参数采集
Morvarid ^[33]	伊朗	GPS系统、惯性测量装置(IMU)、激光测距雷达、超声波传感器、立体视觉系统和单波束回声测深仪	环境监测、水文信息测量
Springer ^[34]	英国	GPS系统、多种不同种类的罗经、测速仪及深度传感器	环境监测、污染物追踪
Delfim ^[35]	葡萄牙	差分全球定位系统(DGPS)、水下定位装置、声呐	与AUV联合进行海洋数据采集、海底测量
MUNIN ^[36]	挪威海事技术研究所等机构联合研发	GPS系统、物标自动检测、岸基信号传输	远洋货物运输
海翼1号 ^[37]	中国	北斗系统、航行姿态传感器、雷达、光电系统	军事侦察、打击
天行1号 ^[38]	中国	雷达、可见光、红外摄像头、声呐	多功能应用

限于无人艇的尺度一般较小,当前应用于无人艇上的主动式感知设备主要包括雷达和声呐2大类。

雷达作为最主要的主动式环境感知方法之一,在各领域得到了非常广泛的应用。雷达传感器的优点在于:具有广阔的探测距离;能够提供全天候的广域图像;深度分辨率及精度较高^[39]。经过多年的发展,当前用于无人艇环境感知和目标探测中的雷达主要包括连续波雷达和激光雷达等。

目前对以无人艇为载体、各类型雷达为感知手段的研究较多。例如,Onunka等^[40]基于连续波雷达建立了无人船机动性能和环境感知分析模型,用于实现无人船的自主避障。余必秀^[41]针对目前内河无人测量船航行环境信息感知存在的问题,提出了一种基于4G固态雷达和激光雷达的内河无人测量船航行环境感知系统。Ruiz等^[42]介绍了一种基于激光雷达的船舶新型海上导航系统,主要用于船舶避碰和精确操作。在数据处理过程中,使用RKF(robust Kalman filtering)对激光雷达图像进行处理,提取障碍物特征并跟踪目标,在公海和内陆水道对提出的系统进行了验证。Tang等^[43]基于激光雷达提出了一种“LROABRA”(local reactive obsta-

cle avoidance based on region analysis)模型,该模型的输出为航向与速度,可实时快速地用于高速无人艇的局部避障。李小毛等^[44]利用3D激光雷达结合聚类算法、KF(Kalman filtering)算法实现了无人艇障碍检测。王贵槐等^[45]提出了一种基于SVM(support vector machine)算法的内河典型障碍物识别方法,以激光雷达为环境感知手段进行了水池环境下的障碍物识别实验。结果表明该算法的准确识别率达到85%以上,满足无人船自主航行要求。但是雷达在应用过程中容易受到雨雪、波浪和水反射率的影响而产生杂波,而且对近距离小尺度目标的检测能力有限。

声呐是另外一种重要的主动式环境感知手段,现阶段主要应用于对水下物标的检测,对暗礁、鱼雷及鱼群等的探测效果较好^[46]。Dzikowicz等^[47]采用螺旋波前信标,使用配备有水听器的远程操作无人船和数据采集系统进行导航试验,同时搭载差分定位系统,测试水声定位的多路径和混响信号的稳健性。Chen等^[48]基于微米DST(digital sonar technology)声呐提出了一种基于模糊控制技术和势场法的创新型避障方法,适用于小型化、低成本无人

船/艇的避障行动。Fawzia等^[49]将声呐系统安装在无人船/艇上,开发了一种名为“SI-PENYU”的海洋管理系统,用于鱼群探测以及溢油检测。无人船/艇在复杂海况下工作时,所获得的声呐图像分辨率低且重叠区域狭窄,导致声呐图像无法拼接或者拼接后严重失真。针对这些问题,Li等^[50]提出了一种基于改进的SIFT(sonar image mosaicing algorithm)用于无人艇的声呐图像拼接算法。Nikolakopoulos^[51]利用无人艇搭载紧凑型侧扫声呐和测深声呐,并结合无人机图像实现了对锡罗斯岛岸线数字表面模型的绘制。声呐系统在广泛应用的同时也不可避免地存在弊端,诸如价格较为昂贵;进行扫测时作业的范围有限,同时信号容易受到附近噪声的影响而产生杂波。

2.2.2 被动式环境感知方法

基于机器视觉的无人艇环境感知是被动式环境感知的主要形式之一,主要包括单目视觉、多目视觉及红外视觉等^[2],其最大的优点是直观高效。无人艇在无外界引导的条件下实现水上运动目标的识别、跟踪和检测也是近年来机器人学、机器视觉领域内新的研究热点。由于无人艇是运动载体且海面的气象条件多变,因此视觉感知技术需要解决的问题较多,例如摄像头与探测目标的相对稳定、图像去雾、目标识别等。基于这些问题,国内外学者展开了多层次的研究。Gal^[52]针对无人艇运动不规律的问题,采用低成本相机结合图像稳定和平滑技术识别无人艇周围的障碍物。Ma等^[53]开发了一种基于视觉的图像去雾方法,在很大程度上提高了障碍物检测和目标跟踪的精度。Wolf等^[54]提出了一种用于环境感知的全方位云台摄像机,当目标在某个时间段离开镜头范围时,能够计算其存在概率。刘康克等^[55]根据波浪不同的纹理特征,利用图像矩阵的傅里叶变换,提出了一种根据不同等级波浪的频域特性判断波浪等级的方法。丁畅^[56]提出了边缘信息融合的直方图均衡化算法,该算法将经典直方图均衡化算法与拉普拉斯滤波算法的结果进行像素级融合,有效增强了海面图像的可视化效果。长波红外摄像机是克服恶劣光照条件对视觉

识别准确度影响的最佳选择,王斌^[57]分别针对常见海上环境、强雾环境以及逆光环境提出了不同的红外目标检测算法,实验表明这些算法满足复杂海况下对不同海面目标的准确检测能力。

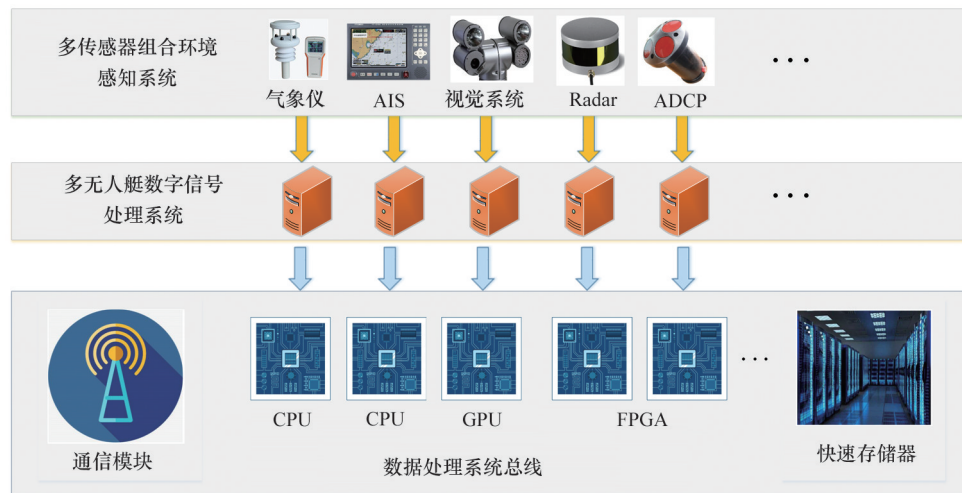
此外,船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)也是一种被动环境感知方法,可用于识别搭载相应设备的船舶、浮标以及海上建筑物并获取其动态、静态和安全信息。在无人艇上搭载AIS设备并用于海上安全执法、环境监测及海上搜救已经受到了各国海事部门的重视^[58]。

2.2.3 融合式环境感知方法

可以看出,任何一种单传感器都难以实现对环境的完全、透彻感知,因此实现不同传感器间的优势互补就显得尤为重要。基于融合多传感器数据融合的环境感知方法可以分为2种情况:一种是单无人艇搭载多种传感器进行海上作业,对获取的多源数据进行比对后得到海上环境和态势信息,例如表1中介绍的各系列无人艇大多符合这类情况。这种方法容易实现但受限于单一无人艇平台的载荷能力、生存能力与活动范围,采样覆盖区域较小,样本准确率通常较低。另一种是以无人艇集群化作业为基础的环境感知,即多艘无人艇按照一定的队形或编排方式同时出动,每艘无人艇根据其尺寸特点携带不同的传感器、采集相应的信息进而实现不同平台间的数据融合。El-Fallah等^[59]提出了一种基于分布式多源多目标滤波和鲁棒通信的融合跟踪方法,并在仿真实例中实现了无人艇与UUV等不同平台间的多传感器数据融合。Liu等^[60]将多传感器数据融合用于无人艇的导航中,在UKF的基础上引入了模糊自适应方法,实现了复杂环境下的导航任务。

上述2种情况都需要对来自不同传感器的多源异构数据进行处理,对数据处理系统的计算、存储能力有很高的要求。当前解决多源异构大数据处理和分析问题的关键技术是利用分布式并行编程和计算框架,结合机器学习和深度数据挖掘算法,实现对海量数据的处理和分析^[61](图5)。

每艘无人艇通过搭载数字信号处理器构成多



注: ADCP—声学多普勒流速剖面仪; FPGA—现场可编程门阵列

图5 分布式多源数据处理方法

无人艇数字信号处理系统,将采集到的诸如温度、湿度、风速等信号传输至数据总线中的CPU(central processing unit)处理,视觉图像传输给GPU(graphics processing unit)并可进行并行运算的数据传输至现场可编程门阵列(FPGA)进行并行处理,最后能将处理后的数据存储并实现无人艇—无人艇、无人艇—岸基间的通信。这种方式可以使数

据的处理速度和效率大幅度提高,但是也会因软硬件设备的需求而带来较大成本。

通过对上述各种环境感知技术及研究现状的分析,总结出各自的优势与不足之处(表2)。在今后的研发中应着重改善各种传感器的不足并建成专门适合无人艇平台搭载、应用的感知设备。

表2 现有环境感知技术的优势与局限性

环境感知方法	优势	局限性
IMU	硬件尺寸小、能耗低、测量误差小	受自身误差和外界环境影响较大
GNSS	导航、定位精度高;技术成熟	封闭空间和磁环境下应用效果较差
连续波雷达	探测距离长;支持全天候作业;精度较高	小尺度物标探测能力有限;受海浪、雨雪等影响较大
激光雷达	近距离目标探测能力强;深度分辨率和精度较高	图像受无人艇运动影响较大;存在传感器噪声和校准误差;价格昂贵
声呐	深度分辨率和精度较高;不受海面气象条件的影响	存在扫测范围限制;易受噪声及船体震动的影响
可见光视觉	直观高效;图像分辨率较高	受光线及气象条件限制;对图像样本的要求高
红外视觉	不受光线条件限制	对外界干扰敏感;探测距离有限;价格昂贵
多传感器融合	不同设备的优势互补;精度高	存在高度数据冗余;成本较高

3 未来技术发展及应用方向

3.1 高精度水文信息反演技术

潮流、潮汐和浪、涌等水文信息的实时数据和预报数据是船舶进出港口、波浪能发电、测量测绘

等海上作业的必需信息。针对当前的水文气象系统成本较高、维护周期较短的问题,今后应研究高精度、低成本的水文信息观测技术。由于无人艇尺度相对较小、随波性好,因此可利用无人艇搭载高精度微机电系统(MEMS)力学传感器,通过直接固

定在艇上的惯性传感器加速度计,获得沿浮标体纵轴、横轴及垂直轴的加速度信息。通过无人艇/船上的微处理器简单数据处理,传送至陆地上的计算机终端,进行数据的综合分析处理,从而反演推算出波浪、潮流的运动轨迹。结合时空上下文数据融合,利用神经网络算法对已有的波浪数据进行规律学习,从而建立无人艇运动姿态与浪、流等参数之间的适用模型,实现海浪信息的预测。

3.2 海-空协同的环境感知技术

与无人艇相比,无人机或飞行器具有拍摄视野

开阔、受地形等因素限制小的优点,能够从多方位、多角度对环境或观测对象进行感知,因此在进行海洋观测时可将无人机作为手段之一。但是在执行远海观测任务时往往会缺少适合飞行器无人机着陆的场地而使得无人机的覆盖范围减小,对母船载体的依赖增大。此外通过表3所示水面艇与飞行器的有效载荷比较可以看出:在几何尺度相近的情况下,水面艇的有效载荷能力远大于飞行器。意味着无人艇能够在有限空间内搭载的设备更多、续航里程更长。

表3 水面艇-飞行器有效载荷比较

平台名称	类型	几何尺度(长/宽)/m	有效载荷能力/kg	有效载荷比/(kg·m ⁻²)
7-meter RHIB 无人艇	水面艇	7/3	700	33.3
11-meter RHIB 无人艇	水面艇	11/3	1500	45.5
Landing Craft	水面艇	41/9	11.3万	306.2
Predator UAV	飞行器	8/11	500	5.7
X-47B	飞行器	12/19	1.4万	61.4
C-17	飞行器	53/52	13.7万	49.7

因此可以考虑搭建海-空协同的环境感知系统,通过无人机与无人艇协同的方式执行相应任务。同时可将无人艇作为无人机的临时载体,在协同作业时作为无人机的着陆平台并提供无人机的紧急能源供应。通过这种方式同样可以在较大程度上提高海事监管、海上搜救、污染物监测等活动的有效覆盖范围。为了实现无人艇-无人机的协同作业,应首先解决以下2个问题。

1) 以无人艇为载体时,要解决无人机在起飞、降落过程中对无人艇平台的准确识别与精准控制问题。

2) 采用无人艇-无人机协同作业时,由于其各自覆盖的区域和观测对象不同,需要通过合理的任务分配与排序方法达到最佳的观测效果和效益的最大化。

3.3 基于无人艇的海洋中尺度现象观测

海洋中尺度现象是引起海洋环境空间分布变化的主要因素,对全球气候的变化起着十分重要的作用^[62],其影响范围通常可达上百公里并持续较长时间,主要类型包括海洋涡旋、气旋、内波、锋面等。

海洋中尺度现象的产生与海洋运动、大气环流等有密切关系,在时空分布上具有一定的随机性而且生成后通常在不停地移动,因此对海洋中尺度现象的捕捉存在较大困难。目前对中尺度海洋现象的观测手段主要包括布放 Argo(array for real time of geostrophic oceanography)浮标、科考船协同 Glider(水下滑翔机)、AUV等方式。但是通过已有的试验可以看出,现有的海洋中尺度现象观测存在以下问题。

1) 由于涡旋、台风等海洋现象发生的随机性,利用定点浮标、潜标对其观测无异于守株待兔,想要得到可靠数据的概率低且耗费时间较长。

2) 利用科考船观测的成本太高,且不能实现对海洋现象的长期跟踪。

3) Glider、AUV的续航能力和自主作业能力普遍不足,对母船的依赖性强,难以实现对涡旋等的独立观测。

鉴于当前对海洋中尺度现象观测能力的不足,因此需要一种机动性强、覆盖范围大、独立程度高的观测工具,以无人艇为载体的观测平台是实现这

些要求的理想途径。由于无人艇的机动能力更强,能在较大海域(10^2 km级)内巡航观测;同时无人艇的研发、布放成本要远低于水下滑翔机或水下机器人,而且能够成功回收的概率较高。在作业时,无人艇可搭载气象仪、ADCP、温盐深测量仪(CTD)等设备获取水文数据并以卫星为中继,实现与陆地间

的实时通信、控制。地面数据中心获取相应数据后利用海洋模型模式进行推演来确定观测水域是否存在海洋中尺度现象。同时,无人艇还能与现有的浮标协同观测,并实现对固定浮标位置、状态的监测,可有效弥补固定平台海洋观测网的缺口。工作场景如图6所示。

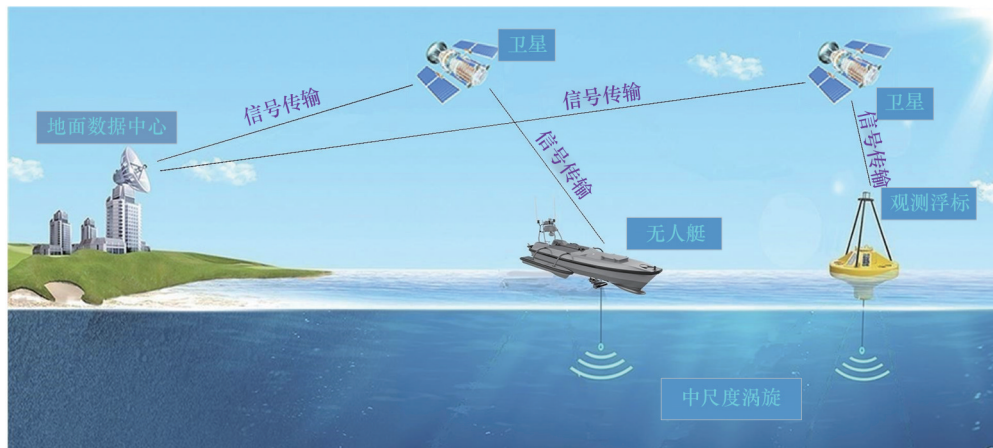


图6 无人艇-浮标协同的海洋中尺度现象观测

为了实现无人艇在较大范围内的巡航,首先应解决其能源问题,即动力系统应满足其长时间工作的要求。无人艇的动力设计可考虑采用高性能太阳能电池板与蓄电池组合的形式,白天时以太阳能电池转化为电能供无人艇使用,多余的能量储存在蓄电池中供夜间使用。

3.4 基于无人艇的海洋军事信息搜集

无人艇起源于战争中的需求,几十年来在各国的推动下有了长足的发展并在国防军事、民用领域中都有着非常广泛的应用。美国兰德公司对搜集到的全球63艘无人艇执行的148个独立任务进行了统计^[63],如图7所示。

可以看出,无人艇的军事用途占据了较大比重且应用的领域比较广泛,而民用任务主要集中在信息搜集、环境数据采集与海上通信保障。同时无人艇在水面打击、反潜作战、反水雷战、后勤保障等军事用途方面有着非常广阔的应用市场,而这些都离不开无人艇对海洋中军事目标或信息的获取与搜集,包括:(1) 战场形势监控。当前,由于卫星或航空拍摄存在盲区、重访时间长、不连续等缺陷,还不

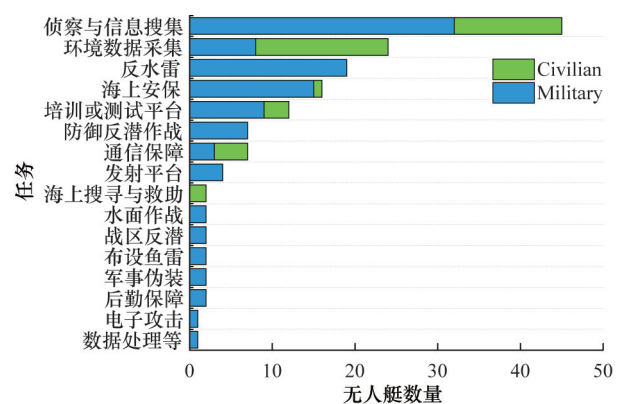


图7 无人艇应用类型分布

能达成对海洋战场长时间、全天候的监控;传统的水面载人侦查艇体积较大、执行任务时容易暴露而遭受打击^[64]。而无人艇具有机动性强、隐蔽性好、易于躲避打击等特点,可以有效弥补上述手段的不足。通过布放无人艇可实现对敌军舰船的抵近侦察,实时掌握其动向并随时引导岸基武器实施精确打击;此外无人艇搭载声呐等设备还可执行潜艇识别、水雷排除等任务,为大型舰艇的出动做好安全保障。(2) 未知水域信息获取。在海洋战争中,舰

船往往会航行到未掌握详细资料的海域且独立获取情报的能力十分受限,因此可以利用无人艇作为“眼睛”获取未知水域内的海况信息、航道安全信息以及敌方军事设施配备等。同时,无人艇可作为通信中继站实现舰船—岸基、舰船—潜艇间的通信,达到数据资料互传的目的。

4 结论

随着未来海洋探测、国防军事等领域的需求,无人艇势必会成为海上无人系统的重要组成部分,如何使无人艇具备完善的环境感知能力也将成为研究热点。本文总结了国内外无人艇环境感知技术的发展现状,分析了不同方法各自的优势和不足。为解决现存环境感知技术不能完全满足无人艇对自身状态和多种海洋环境要素、现象与过程全面感知的问题,未来需要研发新型传感技术并进行多艇协同和多源数据融合与反演的智能感知技术,为中国海洋科学与技术的开发应用奠定基础。

参考文献(References)

- [1] 柳晨光, 初秀民, 吴青, 等. USV 发展现状及展望[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 194-205.
- [2] Liu Z X, Zhang Y M, Xu X, et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71-93.
- [3] 马佃波. 无人驾驶汽车环境感知技术综述[J]. 汽车与驾驶维修, 2017(5): 122-123.
- [4] 于宇, 黄孝鹏, 崔威威, 等. 国外海洋环境观测系统和技术发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(12): 179-183.
- [5] Corfield S J, Young J M. Unmanned surface vehicles—game changing technology for naval operations[M]//Advances in Unmanned Marine Vehicles. Chicago: the University of Chicago Press, 2006.
- [6] 廖静. 水上机器人惊艳面世——全球最快无人艇“天行一号”[J]. 海洋与渔业, 2018(8): 46-47.
- [7] 于立新. 基于 LOS 法的 USV 滑模控制与路径跟踪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [8] Zhao Y X, Li W, Shi P. A real-time collision avoidance learning system for unmanned surface vessels[J]. Neurocomputing, 2016(182): 255-266.
- [9] 秦梓荷. 水面无人艇运动控制及集群协调规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [10] 王瑟. 水面无人艇控制系统设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [11] 刘继鹏. 欠驱动水面无人艇的协同控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [12] 彭艳, 陈加宏, 李小毛, 等. 时空上下文融合的无人艇海面目标跟踪[J]. 中国科学(技术科学), 2018, 48(12): 1357-1372.
- [13] Peng Y, Yang Y, Cui J X, et al. Development of the USV 'JingHai-I' and sea trials in the Southern Yellow Sea[J]. Ocean Engineering, 2017(131): 186-196.
- [14] 熊亚洲, 张晓杰, 冯海涛, 等. 一种面向多任务应用的无人水面艇[J]. 船舶工程, 2012, 34(1): 16-19.
- [15] Sun Z J, Zhang G Q, Qiao L, et al. Robust adaptive trajectory tracking control of underactuated surface vessel in fields of marine practice[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2018, 23(10): 1-8.
- [16] Lu Y, Zhang G Q, Sun Z J, et al. Robust adaptive formation control of underactuated autonomous surface vessels based on MLP and DOB[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(6): 1-17.
- [17] Liu S, Wang C X, Zhang A M. A method of path planning on safe depth for unmanned surface vehicles based on hydrodynamic analysis[J]. Applied Sciences, 2019, 9(16): 3228.
- [18] Fan Y S, Mu D D, Zhang X K. Course keeping control based on integrated nonlinear feedback for a USV with Pod-like propulsion[J]. Journal of Navigation, 2018, 71(4): 1-21.
- [19] 陈真义. 小型水面无人船航行状态感知系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [20] 张胜男. 基于多传感器的无人船环境感知研究[D]. 海南: 海南大学, 2018.
- [21] Onunka C, Bright G, Stopforth R. USV attitude estimation: An approach using quaternion in direction cosine matrix[J]. Robotica, 2016, 34(5): 995-1009.
- [22] 王国庆. 基于 MEMS-IMU 的 USV 导航系统非线性滤波方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [23] Xia G, Wang G, Chen X, et al. Low-cost MEMS-INS/GNSS integration using quaternion-based nonlinear filtering methods for USV[C]//Oceans 2016. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1-7.
- [24] Griffiths G, Millard N W, Mcphail S D, et al. On the reliability of the autotub AUV[J]. Underwater Technology

- the International Journal of the Society for Underwater, 2000, 25(4): 175–184.
- [25] Griffiths G, Millard N W, Mcphail S D, et al. On the reliability of the autosub autonomous underwater vehicle [J]. *Underwater Technology*, 2003, 25(4): 175–184.
- [26] 尹莉莉. 水面无人艇态势评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [27] Yin L L, Zhang R B. Situation reasoning in an integrating adjustable autonomy framework[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 467/468/469:1691–1696.
- [28] 尹莉莉. 海上无人系统不确定环境认知方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [29] Zhang R B, Yin L. Situation cognitive in adjustable autonomy system theory and application[C]//*Advances in Swarm Intelligence*. Cham, Switzerland: Springer, 2012: 308–315.
- [30] Miller J, Carter D, Kolitz S. Large-scale dynamic observation planning for unmanned surface vessels[C]//*AIAA Infotech@ Aerospace Conference and AIAA Unmanned Unlimited Conference*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007, <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-1951>.
- [31] Breivik M, Hovstein V E, Fossen T I. Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles[J]. *Modeling, Identification and Control*, 2008, 29(4), 131–149.
- [32] Bertram V. Unmanned surface vehicles—a survey[J]. *Skibsteknisk Selskab*, Copenhagen, Denmark, 2008, 1: 1–14.
- [33] Mousazadeh H, Jafarbiglu H, Abdolmaleki H, et al. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle(USV) by algorithms fusion[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 159: 56–65.
- [34] Naeem W, Xu T, Sutton R, et al. The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2008, 222(2): 67–79.
- [35] Alves J, Oliveira P, Oliveira R, et al. Vehicle and mission control of the DELFIM autonomous surface craft[C]. *Conference on Control & Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006.
- [36] Fraunhofer C M L. Maritime unmanned navigation through intelligence in networks[R]. Hamburg: Fraunhofer CML, 2016.
- [37] “海翼 1 号”完成阶段试验 [EB/OL]. (2015-06-26) [2019-12-26]. <http://www.cnshipnet.com/news/12/55441.html>.
- [38] 霍萍. “天行一号”惊艳问世的背后 [EB/OL]. (2017-12-15) [2019-12-26]. <http://wemedia.ifeng.com/41130264/wemedia.shtml>.
- [39] Larson J, Bruch M, Ebken J. Autonomous navigation and obstacle avoidance for unmanned surface vehicles[C]//*Unmanned Systems Technology VIII*. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2006, 6230: 623007.
- [40] Onunka C, Nnadozie R C. Modelling the performance of USV manoeuvring and target tracking: An approach using frequency modulated continuous wave radar rotary system[J]. *Springer Plus*, 2013, 2(1): 184.
- [41] 余必秀. 基于多传感器的内河无人测量船航行环境感知系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [42] Ruiz A R J, Granja F S. A short-range ship navigation system based on lidar imaging and target tracking for improved safety and efficiency[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(1): 186–197.
- [43] Tang P P, Zhang R B, Liu D L, et al. Local reactive obstacle avoidance approach for high-speed unmanned surface vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 128–140.
- [44] 李小毛, 张鑫, 王文涛, 等. 基于 3D 激光雷达的无人水面艇海上目标检测[J]. *上海大学学报*, 2017, 23(1): 27–36.
- [45] 王贵槐, 谢朔, 柳晨光, 等. 基于激光雷达的内河无人船障碍物识别方法[J]. *光学技术*, 2018, 44(5): 602–608.
- [46] 刘清宇, 蔡志明. 发展新型声呐系统的几个科学问题[J]. *声学学报*, 2019, 44(2): 209–213.
- [47] Dzikowicz B R, Hefner B T, Leasko R A. Navigation and sonar applications of an acoustical spiral wave front beacon[J]. *Acoustical Society of America Journal*, 2011, 130(4): 2527.
- [48] Chen J, Guo Y, Huang C, et al. An obstacle avoidance algorithm designed for USV based on single beam sonar and fuzzy control[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 2446–2451.
- [49] Fawzia M, Azhar F, Ningsih A K, et al. SI-PENYU: Sistem pengelolaan kelautan berupa USV semi-automatic pendeteksi minyak dan ikan[C/OL]. *Program Kreativitas Mahasiswa—Karsa Cipta*, 2013. <https://www.neliti.com/publications/170301/si-penyu-sistem-pengelolaan-kelautan-berupa-usv-semi-automatic-pendeteksi-min>

- yak.
- [50] Li H, Dong Y, He X, et al. A sonar image mosaicing algorithm based on improved SIFT for USV[C]//2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.
- [51] Nikolakopoulos K G, Lampropoulou P, Fakiris E, et al. Synergistic use of UAV and USV data and petrographic analyses for the investigation of beachrock formations: A case study from Syros Island, Aegean Sea, Greece[J]. Minerals, 2018, 8(11): 534.
- [52] Gal O. Automatic obstacle detection for USV's navigation using vision sensors[C]//Proceedings of the 4th International Robotic Sailing Conference. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 127-140.
- [53] Ma Z, Wen J, Liang X. Video image clarity algorithm research of USV visual system under the sea fog[M]//Advances in Swarm Intelligence. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [54] Wolf M, Assad C, Kuwata Y, et al. 360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(6): 819-833.
- [55] 刘康克, 熊亚洲, 李刚, 等. 基于视觉图像的水面机器人波浪检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(16): 211-215.
- [56] 丁畅. 复杂海况环境下海面图像增强方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [57] 王斌. 海面目标红外检测方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [58] 李峰, 易宏. 无人水面艇在水上交通安全监管中的应用[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 27-33.
- [59] El-Fallah A, Zatezalo A, Mahler R, et al. Multi-vehicle decentralized fusion and tracking[C]//Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XXI. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2012, 8392: 83920I.
- [60] Liu W, Liu Y, Bucknall R. A robust localization method for unmanned surface vehicle (USV) navigation using Fuzzy Adaptive Kalman Filtering[J]. IEEE Access, 2019 (7): 46071-46083.
- [61] 陈鹏, 王少朋, 李玉婷, 等. 浅谈大数据背景下海洋地理信息系统的发展[J]. 海洋信息, 2019, 34(2): 14-18.
- [62] 刘清宇. 海洋中尺度现象下的声传播研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [63] Savitz S, Blickstein I, Buryk P, et al. US Navy employment options for unmanned surface vehicles(USVs)[R]. Santa Monica, CA: National Defense Research Institute, 2013.
- [64] 张凯, 朱利锋. 陆军无人船艇功能运用探要[J]. 军事交通学院学报, 2018, 20(9): 40-44.

Environmental perception technology and application development of unmanned surface vehicles

ZHANG Anmin^{1,2}, ZHOU Jian¹, ZHANG Hao¹

1. School of Marine Science and Technology, TianJin University, Tianjin 300072, China

2. Tianjin Port Environmental Monitoring Engineering Center, Tianjin 300072, China

Abstract The environmental perception ability is the premise and foundation for unmanned surface vehicles to implement missions. The development status of unmanned surface vehicles, especially the Chinese latest achievements in the field of USV research and development are introduced. The current research status of unmanned surface vehicles ontology state perception and external environment perception (active perception, passive perception, integrated perception) are summarized, and the advantages and limitations are discussed. According to the future development needs, key technologies of environmental perception technology and application orientation such as high precision hydrological information inversion, sea-air collaborative observation, ocean mesoscale phenomenon observation and marine military information gathering based on USV are proposed.

Keywords unmanned surface vehicles; environmental perception; ocean observation; information gathering; sea-air coordination ●



(责任编辑 王志敏)