

文章编号:1000-4653(2023)01-0136-07

面向水下目标搜寻与探摸的多装备协同作业系统

马杰^{1a,1b}, 余逸飞^{1a}, 朱小东², 郑依凡^{1a}, 李桂联^{1a}

(1. 武汉理工大学 a. 航运学院 b. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
2. 交通运输部上海打捞局, 上海 200090)

摘要: 水下遇险目标快速搜寻与探摸是深海应急搜救和打捞作业的关键任务。集成搜救母船与水下救助机器人多传感装备, 构建了一套面向水下目标搜寻与探摸的协同作业系统。利用船载侧扫声呐获得声学地貌图, 对图像像素点聚类 and 分割处理后提取疑似目标高亮区域, 依据疑似目标位置分布和水下救助机器人作业范围约束实现搜索区域划分; 利用船载多波束测深系统构建海底数字高程模型, 根据海底坡度差异确定不同区域路径规划方法, 根据母船-水下救助机器人协同位置关系确定安全作业范围, 实现水下救助机器人水下探摸路径规划; 通过船载超短基线系统测量水下救助机器人水下位置, 并利用水下救助机器人搭载的前视声呐获取水下目标回波距离和方位角, 进而结合水下救助机器人自身姿态数据实现目标的相对位置解算。经过多次在南海 300 m 水深海域进行试验验证, 系统满足深远海应急搜救和打捞作业需求, 现已被搭载到大型救助船形成伴随保障能力。

关键词: 水下搜寻; 水下探摸; 声呐; 水下机器人

中图分类号: TP242; U676.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2023.01.019

Multi-equipment cooperative operation system for searching and detecting underwater objects

MA Jie^{1a,b}, YU Yifei^{1a}, ZHU Xiaodong², ZHENG Yifan^{1a}, LI Guilian^{1a}

(1a. School of Navigation; 1b. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Shanghai Salvage Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200090, China)

Abstract: Multiple sensors on the master ship and underwater robots are integrated to build a cooperative operation system for underwater search and rescue operation. The acoustic geomorphologic map generated by shipborne side-scan sonar is processed. Clustering and segmentation are carried out and highlight spots are extracted as candidate targets. The underwater robots are allocated according to the distribution of the candidate targets. The multibeam bathymetric system is integrated to construct the digital seabed elevation model, based on which the search paths are planned. The safe operation areas are decided according to the relative position between each robot and the master ship. The shipborne ultra-short baseline acoustic positioning system is used to measure the position of robots under water. Meantime, the forward looking sonar that underwater robots equipped with provide the bearing and range of targets relative to the robot according to the echo, and the system calculates the position of targets, taking the position of the robot into account. The system has been tested several times at place of 300 m deep in South China Sea.

Key words: underwater search; underwater detection; sonar; underwater robot

收稿日期: 2021-11-16

基金项目: 国家重点研发计划深海应急响应示范系统构建项目(2018YFC0309600)

作者简介: 马杰(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为信息融合感知、智能航海等。E-mail: majie@whut.edu.cn

通信作者: 余逸飞(1998—), 男, 硕士, 研究方向为水下感知与定位。E-mail: yyf1900@outlook.com

引用格式: 马杰, 余逸飞, 朱小东. 面向水下目标搜寻与探摸的多装备协同作业系统[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 136-142.

MA Jie, YU Yifei, ZHU Xiaodong. Multi-equipment cooperative operation system for searching and detecting underwater objects[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 136-142. (in Chinese)

水下目标搜寻与探摸是指利用水下搜寻定位相关的测量、潜水装备在未知水域获取沉船等目标的精确位置信息。近年来我国海洋经济规模不断提升,对深远海应急搜救和打捞提出了更高的要求^[1]。据统计,自2003年以来我国共装备抢险打捞船舶106艘^[2],当前救捞任务需求仍然较大;我国水下救捞部门参与的马航MH370搜寻任务进一步体现了提升深远海搜寻能力的重要性。针对水下目标快速、高效搜寻和未知环境的探摸技术是水下工程技术的研发重点。

当前应用于水下搜寻和探摸的装备以侧扫声呐、多波束测深系统、遥控机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)为主^[3]。侧扫声呐可在目标水域大面积扫测,提供水底声学图像以显示水下地貌特征^[4-5];多波束测深系统可获取扫测范围内较为精确的测点位置和深度信息,进而构建出目标区域数字高程模型,直观地显示海底地形^[6];ROV具有近场感知信息丰富、定位精度高等特点,在水下目标物的精细搜寻与最终确认上具有很大的优势^[7]。以上装备因其工作特点分别适用于不同的搜寻探摸阶段,只有各装备协同配合才能适应水下环境的未知性,提高作业效率,降低作业风险。如何构建多装备协同作业系统是水下目标搜寻与探摸技术的关键。

目前国内学者已开展水下目标搜寻多装备协同作业相关的研究,顾临怡等^[8]总结了基于ROV等载体的水下搜救流程,将水下搜救分为粗扫、精扫、定位和打捞四个阶段并分析了各阶段应用设备特点;陈宇赛^[9]提出的深海失事装备探捞体系,根据失事装备类型建立了不同的搜寻概率分析模型,并提出了确定水下目标位置的分步搜寻方法;陈强^[10]分析了水下无人飞行器不同任务类型和任务性质的协同

工作模式。以上研究仅对水下目标搜寻作业制定了大致流程,而在具体作业装备选用和作业内容制定方面存在不足,未能形成整套作业系统。本文针对水下目标探摸与定位作业实际应用需求,构建了母船-ROV多装备协同的作业系统,并对该系统主要设备组成和协同作业流程,以及搜索区域划分、ROV探摸路径规划、水下目标探摸与协同定位等关键功能进行了详细介绍。该系统对于深远海应急搜救和快速打捞具有重要的意义。

1 系统构成

系统以深潜水工作母船“深潜号”为依托平台,搭载差分卫星定位系统、超短基线(USBL)接收基阵、电罗经、姿态仪、6 000 m级ROV及其投放系统、深拖侧扫声呐系统以及多波束测深系统等。系统总体构成如图1所示,水面母船携深拖侧扫声呐在目标海域沿搜索路径扫测以提供水下声学地貌图;水面母船搭载多波束测深系统对目标海域精细化测深形成海底数字高程模型;ROV搭载前视声呐和水下摄像头对水下目标抵近观察,对水下目标确认并提供精确定位信息。

系统整合了侧扫声呐图像、多波束测深数据、前视声呐图像、水下光学图像等数据,形成对水下目标“搜寻标定—路径规划—探摸定位”的搜索流程,具体步骤为:1)搜索区域划分,即在目标海域进行大面积声学扫测与疑似点标识,并划定ROV搜索区域进行最优化搜索;2)ROV探摸路径规划,即精细化构建搜索区域内海底数字高程模型,并结合母船方位规划ROV运动路径;3)水下目标探摸与协同定位,即ROV在搜索区域内进行探摸作业,通过USBL定位系统获取ROV自身位置,结合前视声呐获取的

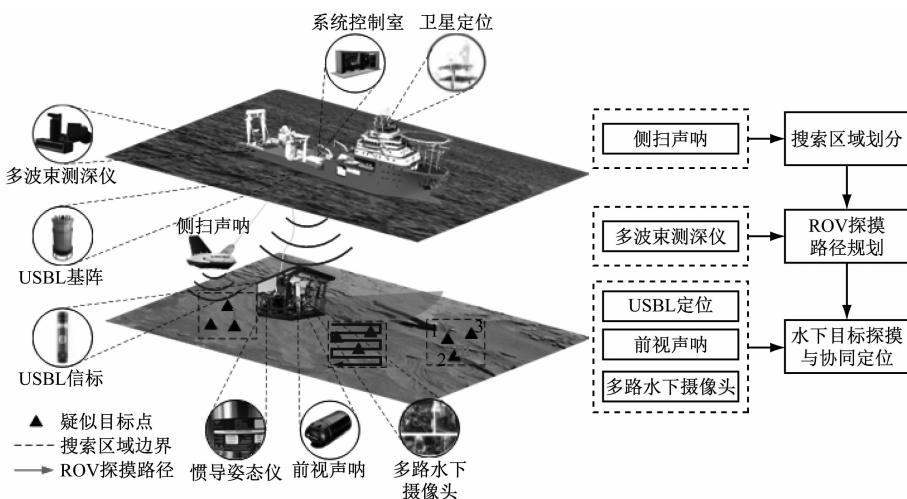


图1 系统构成

Fig. 1 Components of the system

相对位置对目标精准定位。

2 搜索区域划分

搜索区域划分即在目标海域进行大面积声学扫描与疑似点标识,并划定 ROV 搜索区域进行最优化搜索。在目标海域根据疑似目标位置分布情况合理划分搜索区域可明确 ROV 布放位置和搜索范围,为实现协同高效搜寻提供保证^[11-12]。搜索区域划分的方法以实际环境下 ROV 水下作业半径为约束条件、以 ROV 作业区域与搜寻路径有效覆盖为优化目标。具体搜索区域划分流程如图 2 所示,首先通过侧扫声呐获取目标海域水下声学地貌图,然后以图像聚类 and 分割处理结果标定出疑似目标位置,最后计算确定搜索区域划分方案,并进一步确定水面母船搜索顺序。

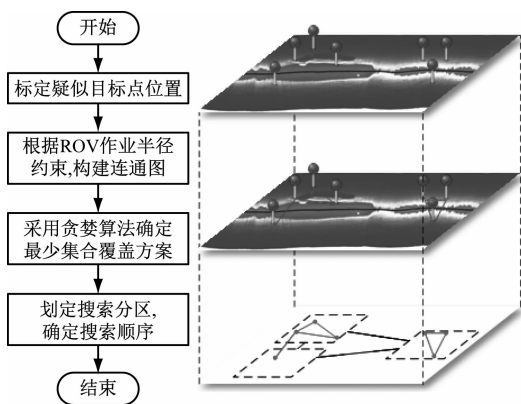


图2 搜索区域划分流程

Fig. 2 Flow of search area segmentation

侧扫声呐一般安装在船载深拖装置上,可实行多船协作同步勘测,实现快速大面积扫描。一般水下失事装备可分为航天失事装备、航空失事装备、失事水面舰船装备和失事水下运载装备^[9]。针对不同的装备类型制定相应的扫描策略:根据水下目标位置分布概率拟定侧扫声呐扫描路径;根据水下目标大小确定侧扫声呐距离海底的高度和扫海宽度。水面母船携深拖装置沿拟定搜索路径扫测获得路径范围内的水下声学地貌图,并将多条测线数据在同一地图中同步标绘,构建目标区域水下声学地貌图。

为抑制水下环境噪声、混响等因素对侧扫声呐图像的影响,采用深度散斑噪声抑制网络进行图像去噪^[13],针对散斑噪声这一声呐成像原理导致的固有干涉现象,参考加性高斯白噪声抑制模型构建方法,得到散斑噪声的对数域噪声水平图,然后将特征金字塔结构应用至抑制散斑噪声深度网络中,实现对数域噪声的抑制,以获取高质量的水下声学地貌图。为辅助标定侧扫声呐图像中的疑似目标,采

用模糊聚类的方法^[14],将侧扫声呐灰度图像中所有像素点作为模糊集,分别设置目标高亮区、目标阴影区和海底背景区三个模糊子集,在此基础上对所有像素点聚类,然后根据隶属度实现对声呐图像的分割,从而实现疑似目标区域标定。根据目标海域初步扫测结果输出一组疑似目标的平面位置,用以指导系统进一步精细化搜寻。

为实现合理的搜索区域划分,将初步扫测得到的疑似目标点在搜寻区域内的位置分布拓扑化表述。以疑似目标点为节点,以各点间距离小于 ROV 作业半径的连线为边,构建疑似目标连通图。将寻找能共存于同一搜索区域内的疑似目标点问题转化为寻找连通图中完全图的问题;将寻找最少搜索区域划分方案问题转化为所有疑似目标点组合情况的集合和对所有疑似目标点的集合的覆盖问题。最后以贪婪算法求解出划分方案,实现以最小的搜索区域覆盖所有疑似目标点,并根据各搜索区域连通图,规划水面母船最短遍历路径。

3 ROV 探摸路径规划

ROV 探摸路径规划是对搜索区域海底地形地貌的精细化表达,获取水下目标态势、水下障碍物分布等信息,并结合母船方位规划 ROV 行动路径,指导其安全高效地对水下目标区域进行详细探摸^[15]。ROV 水下环境感知范围较小,精细化的水下全局环境信息减少了 ROV 入水后搜寻工作的盲目性,也提高了 ROV 航行的安全性。水面母船配备多波束测深系统在划分后的搜索区域内遍历扫描,同时保持高精度卫星定位、罗经运动传感器、潮位仪、声速剖面仪等辅助设备开启,同步记录测深数据和辅助数据^[16]。多波束测深数据经过载体位姿偏差补偿、声速剖面修正、数据滤波、潮汐修正、母船吃水修正、测深数据空间归位之后,可得到准确的测深数据,以此构建海底数字高程模型,直观地反映海底地形地貌特征,同时为 ROV 探摸路径规划提供参考。处理后的多波束数据构建的海底数字高程模型如图 3a 所示。

ROV 在水下可以使用自动定深或自动定高模式进行搜寻探摸,当在倾斜的目标表面上观察时,向下的回声反射面较小,探测目标表面分辨率较低。因此 ROV 执行探摸作业时,应根据搜索区域内数字高程模型表面梯度大小差异分别规划运动路径,确保对搜索区域进行全覆盖探测^[17]。ROV 探摸路径规划原则为:根据水下三维表面的梯度大小,在平坦区域采用横移平行轨迹的方式搜寻,在海山或目标

凸起区域采用环绕路径搜寻,将横移平行轨迹间距设置为 ROV 前视声呐水平视域范围,将环绕路径的垂直间距设置为根据 ROV 与水下结构表面安全偏移距离和前视声呐垂直视域角度计算出的垂直视域范围,在此基础上,将横移平行轨迹间距和环绕路径的垂直间距减小 6 ~ 8 m 进行冗余设计,确保 ROV 横向运动和垂直运动导致局部偏移规划路径时仍能对搜寻区域完全覆盖。探摸路径规划的结果如图 3b 所示。

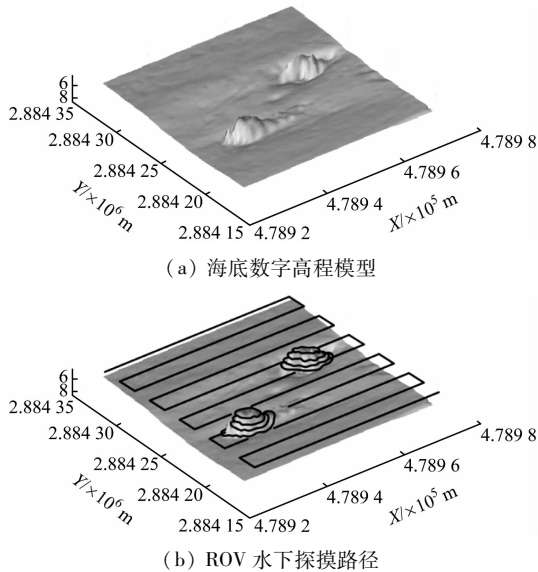


图 3 ROV 探摸路径规划

Fig. 3 ROV exploration path planning

理想情况下 ROV 可以从区域任意一个角点沿路径进行搜寻探摸,而实际作业时既要考虑水面母船船向,也要考虑 ROV 脐带缆约束。ROV 收放过程是 ROV 作业中风险较高的环节,判断 ROV 是否满足下水条件主要取决于海面浪高,较大的海浪会增大 ROV 收放过程中与船体碰撞的风险。因此在 ROV 下放前母船需调整船向至与海流近 45° 夹角,同时保持母船 DP 状态防止漂移,通过船体挡流为 ROV 下放一侧提供相对平稳的海面条件;ROV 下水后由于脐带缆约束,应尽量避免越船底作业,降低脐带缆与船体及推进器碰撞的风险。当母船调整好船向后,ROV 探摸路径需与 ROV 下放位置处于母船同侧。因此 ROV 搜寻路径规划完成后由水面母船协同进行位置和船向调整,确保 ROV 路径在低风险区域内。ROV 探摸路径规划风险分区如图 4 所示。

4 水下目标探摸与协同定位

水下目标探摸与协同定位是对水下疑似目标的确认和精确定位。ROV 探摸作业依靠自身位置信息,前视声呐图像和水下光学图像信息,对搜索区域

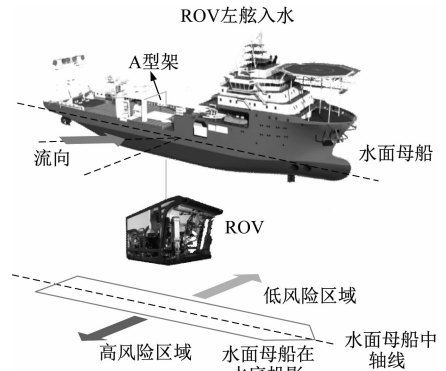


图 4 ROV 探摸路径规划风险分区

Fig. 4 The risk zone segmentation of ROV exploration path planning process

进行覆盖式逐步搜索^[18]。水面母船搭载的 USBL 换能器基阵接收水下 ROV 搭载的声信标返回的声信号,计算 ROV 相对位置并反馈至控制室^[19]。ROV 操作员实时调整其运动状态,使其循着预先规划的路径进行探摸。ROV 操作员可通过预先规划的探摸路径实现全局范围内避障,而在 ROV 航行过程中通过前视声呐扫描探测到的障碍物位置信息实时修改探摸路径,实现局部范围内避障。水下目标的协同定位原理如图 5 所示,通过船载卫星定位设备、USBL 定位系统与 ROV 前视声呐进行组合定位解算,可以获取 ROV 探测视域内目标的位置信息。协同定位过程主要涉及两个坐标系:随船坐标系 $O-XYZ$ 和 ROV 载体坐标系 $T-UVW$ 。随船坐标系原点 O 位于 USBL 接收基阵中心,其大地坐标系位置可通过船载卫星定位信息经偏差修正后获得;ROV 载体坐标系原点 T 位于 ROV 搭载的声信标上,通过声学定位可获取其在随船坐标系中的相对位置^[20]。前视声呐根据视域内回波延时和返回方向获取目标点的距离和水平方位角信息,获取的信息被投影至扇形区域内显示。结合水下目标点在前视声呐内的方位信息,ROV 姿态信息以及前视声呐头与声信标安装偏差,可计算得到目标在 ROV 载体坐标系中的

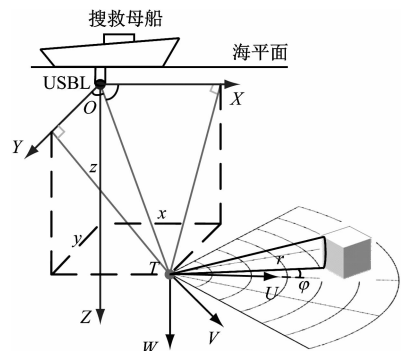


图 5 水下目标协同定位原理

Fig. 5 Underwater target cooperative positioning mechanism

坐标,进而通过坐标转换获取水下目标在大地坐标系中的位置,形成对目标的精确定位。这种协同定位方法无需 ROV 抵近目标,可实现探摸过程中对目标快速标定,也可实现较大目标区域内多目标的同步标绘记录。

5 系统海试

搭载于上海打捞局“深潜号”工作母船的系统多次在南海 300 m 水深海域进行搜寻探摸及定位试验。图 6 展示了海上试验过程。系统配备的自研软件,可接入船载卫星定位系统、超短基线系统以及

ROV 携带的多普勒声速仪、惯导、前视声呐等多种导航定位设备数据,具备 ROV 搜寻路径、母船位移自动规划及动态更新功能,融入实际作业经验和作业规则生成母船-ROV 协同作业辅助操控信息,减少 ROV 收放、搜寻等作业过程风险;具备多源传感器组合定位功能,可实现水下 ROV 及目标高精度定位,并进行水下目标轮廓重建;具备水下作业多视角全景监测功能,可对 ROV 路径移动、疑似目标发现与定位全过程跟踪记录。系统试验环境位于南海,试验海区海况为 3 级,浪高为 1 m,试验海底深度为 309.4 m 左右。

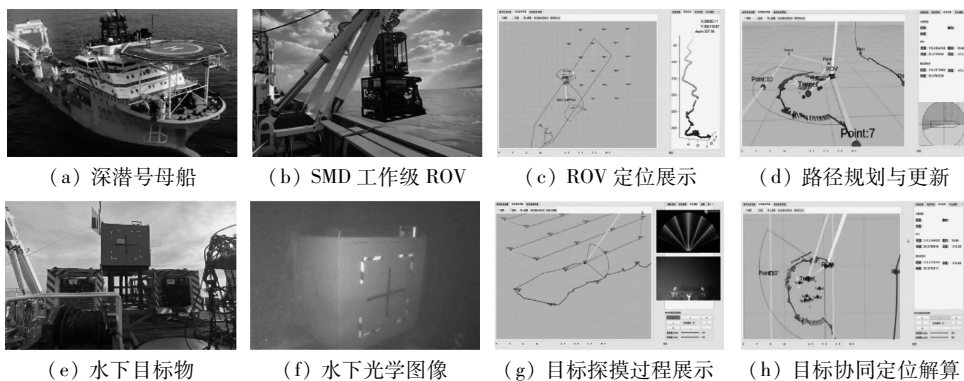


图 6 系统海上试验及其搜寻探摸定位过程

Fig. 6 Test of the system at sea and the search and exploration process

海试以人工投放的水下模拟试验舱为搜寻与定位目标,ROV 在长宽均为 100 m 的区域内对水下目标进行盲搜。目标点位置(115°27'.029 5E,20°41'.480 3N)的通用横轴墨卡托投影(Universal Transverse Mercator, UTM)坐标为(338 617.8, 2 288 755.3)。模拟试验舱上配备了声信标,通过第三方超短基线定位系统对目标定位,并与本系统目标定位结果进行比测。试验过程中 ROV 靠近目标,利用前视声呐探测结合自身姿态对目标点多次进行协同解算,得到的目标点定位较差平均值为 4.3 m,标准差为 0.42 m,如表 1 所示。系统目标定位误差范围较小,定位误差值

满足了考核指标要求。系统指导水面母船和 ROV 协同作业,完成了搜寻路径规划和动态更新,以及疑似目标发现确认与定位的全过程,为 ROV 探摸作业提供全方位数据支持。试验海域的海底相对平坦,系统规划的 ROV 路径和实际 ROV 路径在 UTM 平面的标绘图如图 7 所示。ROV 作业过程中受水流影响,实际路径与规划路径存在一定偏差,系统软件实时监控 ROV 位置与规划探摸路径相对距离,当距离超过 4 m 时自动提醒,指导 ROV 操作员停止前进搜寻,并调整 ROV 位置回到规划路径,当前视声呐检测到目标后路径将更新至目标点位置。试验总搜

表 1 系统目标定位记录

Tab. 1 Target positioning coordinates record of the system

测量序号	经纬度坐标		UTM 投影坐标		测量较差/m
	经度	纬度	X/m	Y/m	
1	115°27'.029 0E	20°41'.480 9N	338 616.9	2 288 760.2	4.98
2	115°27'.029 3E	20°41'.480 5N	338 617.5	2 288 759.3	4.01
3	115°27'.029 2E	20°41'.480 6N	338 617.2	2 288 759.5	4.24
4	115°27'.029 0E	20°41'.480 3N	338 616.8	2 288 759.1	3.93
5	115°27'.029 1E	20°41'.480 6N	338 617.1	2 288 759.6	4.36

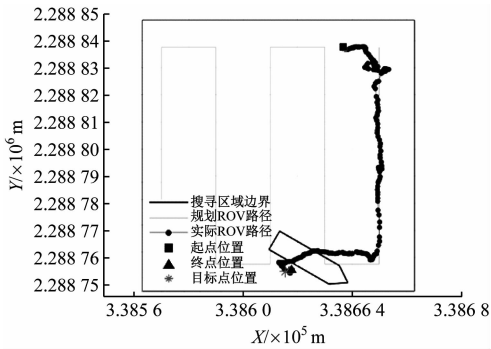


图7 ROV 水下作业路径

Fig. 7 The ROV underwater movement path

寻路径长度为 164.9 m, 搜寻总时长为 15.8 min. ROV 上搭载的多路水下摄像头探测画面被传输至母船现场指挥中心, 实现了对水下作业过程多视角监测, 可通过船上不同位置的终端设备进行监视, 如图 8 所示, 同时海试时水下探测信息被远程传输至岸基指挥中心。当水下摄像头确认目标后, 系统将前视声呐探测目标点云数据融合 ROV 位置、姿态, 对目标轮廓特征及位置进行标绘记录, 实时解算目标经纬度信息, 完成对目标的协同定位, 为后续打捞工作提供数据支持。

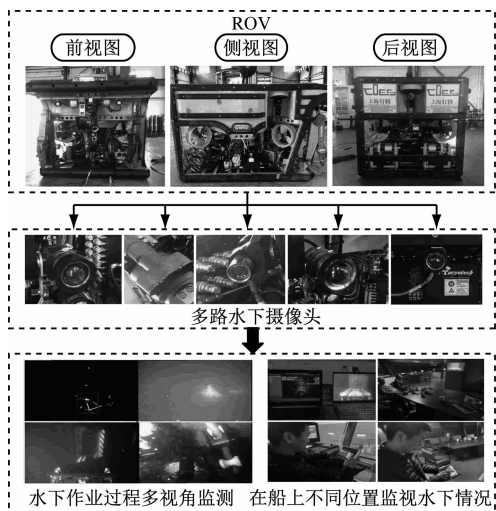


图8 水下作业过程多视角、多终端监测

Fig. 8 Multi-view and multi-terminal monitoring during underwater operations

6 结束语

本文以提升深远海应急搜救和打捞能力为需求, 构建了面向水下目标搜寻与探摸的多装备协同作业系统, 形成了一套较为完整的从目标海域搜寻应急响应到最终目标确认定位的流程, 集成侧扫声呐、多波束测深系统、超短基线定位系统、前视声呐和水下摄像头等设备和系统在目标海域进行搜索区域划分、ROV 探摸路径规划和水下目标探摸与协同

定位。系统根据疑似目标位置分布情况和 ROV 作业约束划定搜索区域, 优化水面母船搜寻路线, 同时利用多波束测深数据构建海底数字高程模型并规划水下探摸路径将其应用于水下遇险目标的快速搜寻与探摸, 可节省搜寻成本, 提高作业效率, 降低探摸风险。系统集成了声呐侧扫、多波束测深、水下定位等诸多技术, 也将随着相关装备的不断升级逐步发展完善。

参 考 文 献

- [1] 杨雪, 康红霞, 张延铭. 基于 PSR 与 AT 的海上突发事件应急信息需求分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 140-145.
YANG X, KANG H X, ZHANG Y M. Information needs of maritime emergency based on PSR and AT[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 140-145. (in Chinese)
- [2] 宋家慧. 中国海上搜救的沿革与发展[J]. 中国水运, 2016(3): 17-20.
SONG J H. Evolution and development of maritime search and rescue in China[J]. China Water Transport, 2016(3): 17-20. (in Chinese)
- [3] PURCELL M, GALLO D, SHERRELL A, et al. Use of REMUS 6000 AUVs in the search for the Air France Flight 447 [C]//Marine Technology Society and the Institute of Electrical and Electronics Engineers. OCEANS' 11 MTS/IEEE KONA, 19-22 September 2011, Waikoloa, Hawaii, USA. New York: IEEE, 2011: 1-7.
- [4] 边刚, 孙雪洁, 崔杨, 等. 海洋测量技术在深远海搜救中的应用[J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 37-40.
BIAN G, SUN X J, CUI Y, et al. Application of marine surveying techniques in deep sea search and rescue[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(3): 37-40. (in Chinese)
- [5] FROST J R, STONE L D. Review of search theory: advances and applications to search and rescue decision support [R]. U. S. Coast Guard Research and Development (R&D) Center, 2001: 158-163.
- [6] 陈正荣, 王正虎. 多波束和侧扫声呐系统在海底目标探测中的应用[J]. 海洋测绘, 2013, 33(4): 51-54.
CHENG Z R, WANG Z H. Research on underwater target detection using side-scan sonar and multibeam sounding system [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(4): 51-54. (in Chinese)
- [7] 颜明重, 邓志刚, 申雄, 等. 小型水下机器人在复杂水下地形中的目标搜寻应用[J]. 船海工程, 2012, 41(2): 174-177.

- YAN M C, DENG Z G, SHEN X, et al. Application of Mini ROV in search for underwater targets in an unknown local underwater environment [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2012, 41 (2): 174-177. (in Chinese)
- [8] 顾临怡, 宋琦, 殷宏伟, 等. 基于 ROV 等载体的水下搜救流程综述[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(9): 1137-1151.
- GU L Y, SONG Q, YING H W, et al. An overview of the underwater search and salvage process based on ROV [J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 2018, 48(9): 1137-1151. (in Chinese)
- [9] 陈云赛. 深海失事装备探捞体系及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- CHEN Y S. Research on deep-sea wreck equipment search and salvage system and its key technologies[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [10] 陈强. 水下无人搜探系统装备使用模式分析[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(1): 137-139.
- CHEN Q. Analysis of equipment application mode for search and detection system of UUV[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(1): 137-139. (in Chinese)
- [11] 李岩, 邢胜伟, 张英俊. 多智能体海上搜寻任务分配方法[J]. *中国航海*, 2018, 41(3): 91-94.
- LI Y, XING S W, ZHANG Y J. Maritime search task allocation with multi-agent concept [J]. *Navigation of China*, 2018, 41(3): 91-94. (in Chinese)
- [12] 颜明重, 黄冰逸, 朱大奇. 基于灰度波动的水下图像分割[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(9): 1268-1273.
- YAN M C, HUANG B Y, ZHU D Q. Underwater image segmentation based on grayscale wave [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(9): 1268-1273. (in Chinese)
- [13] LU Y, YANG M, LIU R W. DSPNet: Deep learning-enabled blind reduction of speckle noise [C]//IEEE. 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). New York: IEEE, 2021: 3475-3482.
- [14] FATAN M, DALIRI M R, SHAHRI A M. Underwater cable detection in the images using edge classification based on texture information [J]. *Measurement*, 2016, 91: 309-317.
- [15] 孙玉山, 冉祥瑞, 张国成, 等. 智能水下机器人路径规划研究现状与展望[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(8): 1111-1116.
- SUN Y S, RAN X R, ZHANG G C, et al. Research status and prospect of path planning for autonomous underwater vehicles [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(8): 1111-1116. (in Chinese)
- [16] 樊妙, 卢惠泉, 邢喆, 等. 多波束海底地形数据空值区域的插值填补方法分析[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(1): 11-13.
- FAN M, LU H Q, XING Z, et al. Analysis of void filling interpolation methods for multibeam DEM data [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(1): 11-13. (in Chinese)
- [17] 赵玉新, 金娜, 刘厂. 基于电子海图的 AUV 多约束航路规划方法[J]. *中国航海*, 2016, 39(2): 11-14.
- ZHAO Y X, JING N, LIU C. Multi-constraint path planning for AUV with electronic chart [J]. *Navigation of China*, 2016, 39(2): 11-14. (in Chinese)
- [18] CEBRIAN-ROBLES D, ORTEGA-CASANOVA J. Low cost 3D underwater surface reconstruction technique by image processing [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 113: 24-33.
- [19] 南德, 李朝晖. 移动平台超短基线阵实现水下目标高精度定位[J]. *声学学报*, 2019, 44(4): 534-544.
- NAN D, LI C H. High-precision acoustic localization of underwater target for mobile platform using ultra-short baseline array [J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(4): 534-544. (in Chinese)
- [20] LIN W P, CHIN C S, MESBAHI E. Remote robust control and simulation of robot for search and rescue mission in water [C]//IEEE. OCEANS 2014-TAIPEI, 07-10 April 2014, Taipei, Taiwan, China. New York: IEEE, 2014: 1-9.