

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.008

基于实测数据回放的 ROV 导航定位系统研究

李学成¹, 谢阳光², 张 舸³, 伊国兴³

- 中海辉固地学服务(深圳)有限公司, 广东 深圳 518067;
- 中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 西安 710065;
- 哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要:针对 ROV 对国产导航系统的需求, 研发了包含导航融合终端软件及光纤罗经在内的 ROV 导航定位系统工程样机。该系统由嵌入式运行模式、仿真运行模式和数据分析模块三部分组成, 能够完整记录 ROV 工作环境数据信息并进行时标化存储, 生成实测数据文件, 进而通过精准复现 ROV 工作环境数据, 为 ROV 导航算法的调试提供便捷、一致的试验数据和高效的数据分析手段。海试验证结果表明, 系统有效复现了水下试验数据, 通过数据回放仿真高效完成了导航算法参数调试, 对 USBL 噪声实现 80% 抑制, 并能够有效应对 USBL 输出异常情况, 可有效辅助 ROV 水下调查及安装等工程作业。

关键词:水下导航系统; 数据回放; ROV; 组合导航; 数据融合; 卡尔曼滤波

中图分类号: U666.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2023)01-0084-08

Research on ROV Navigation and Positioning System Based on Measured Data Replay

LI Xuecheng¹, XIE Yangguang², ZHANG Ge³, YI Guoxing³

- China Offshore Fugro Geosolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518067, China;
- Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710065, China;
- Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the demand of domestic navigation system for ROV, an engineering prototype of ROV navigation and positioning system including terminal software and fiber optic compass is developed. The system is mainly composed of three parts: embedded operation mode, simulation operation mode and data analysis module. It can completely record the data of ROV working environment based on time sequence, and generate the measured data file, which can be used to replay the ROV environment data precisely in the simulation operation mode to provide convenient and consistent experimental data, and then provide a efficient data analysis methods for the debugging of ROV navigation algorithm. The sea trial results show that the system effectively reproduces the underwater test data, and through data playback simulation, the navigation algorithm parameter debugging is completed efficiently. The system can suppress the USBL noise level by 80%, effectively deal with output anomaly of USBL, and effectively assist ROV with underwater investigation, installation and other engineering operations.

收稿日期: 2021-12-02; **修订日期:** 2022-01-24

基金项目: 深圳市科技计划资助(JSGG20211029095205007); 深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20180306172134024)

作者简介: 李学成(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事海洋测绘与勘探、海洋石油水下设施 ROV 检测以及海洋石油水下设施安装测量方面的研究。

Key words: Underwater navigation system; Data replay; ROV; Integrated navigation; Data fusion; Kalman filter

0 引言

水下导航定位是海洋石油工程的基础信息,如水下结构物位姿测量^[1-2]、遥控无人潜水器(Remote Operated Vehicle, ROV)巡检高精度定位定向等^[3-5]。离开水下导航定位将无法开展水下施工作业。当前我国海洋石油工程水下定位装备、技术支持、售后服务主要来源于西方海洋强国,核心关键装备没有实现国产化。随着中美贸易战的持续进行,关键水下定位装备与技术受到禁运,对我国海洋开发造成严重威胁。

当前,我国在渤海、东海和南海陆续建成 400 多条海管,累计长度已超过 7000km。已有管缆的准确在位状态检测对于后续防护工程开展具有重大意义。深海 ROV 是水下作业利器,通过携带各种传感器,可广泛应用于水下设施安装、检测维修等海洋开发作业。ROV 在浅水区检测定位传感器采用超短基线定位系统(Ultra-Short Baseline, USBL)+水下罗经;在深水区检测定位传感器采用 USBL+水下罗经+多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL),数据融合在 ROV 母船进行。该定位系统长期没有高可靠的国产化设备及软件支持,为海工装备“卡脖子”的关键技术之一。

在水下导航方面,张涛等提出了基于声学浮标辅助惯导的水下定位方案^[6];Ma X. 等提出了基于因子图的多源信息融合算法^[7];M. Franchi 等提出了一种基于自适应无迹卡尔曼滤波器的 DVL 和前视声纳组合方案^[8];Li W. 等提出了基于神经网络的捷联惯导和 DVL 组合导航方案^[9];S. Suresh 等提出了基于多波束声纳的水下同时定位与建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)方案^[10]。在数据回放仿真方面,梁云涛等提出了基于 vieWTerra 平台构建的船舶航行数据回放方案^[11];Jin X. 等提出了基于真实回放信号的导航终端测试方案^[12];Yan F. 等提出了岸基雷达的海上回波数据仿真系统^[13];C. Cristodaro 等提出了全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的数据回放测试方案^[14]。水下导航定位算法的多样化 ROV 水下作业提供了丰富的数据来源,与此同时将实测数据的回放仿真与水下组合导航算法相结合,可以极大程度

提高算法调试效率。

本文针对 ROV 导航定位系统需求,通过对 ROV 导航定位需求进行总结,构建系统框架,研究融合算法,形成工程样机,并在实际扫管作业中进行验证,为实现全国产化 ROV 导航定位系统提供坚实基础。

1 ROV 对导航定位系统需求概述

以某型 ROV 进行南海某水深 300~1200m 石油管线巡检调查为背景,巡线调查主要载体与设备系统资源有 DP 定位工作母船、深水工作级 ROV、水面定位导航系统、水下定位导航系统、事件记录系统、视频记录系统、实时数据采集系统和数据处理系统等。巡线调查的目的为查清管线在位状态、路由位置、水深、障碍物及管线损伤情况、管线附属结构基本信息等。主要设备系统与应用方式如图 1 所示。



图 1 ROV 作业场景及配置示意图

Fig. 1 Operation scenario and configuration of ROV

该任务场景对水下导航定位需求如下:定位精度优于 1m;定向精度不低于 2°;姿态精度不低于 0.2°;定位数据平滑无噪声;数据输出频率不小于 1Hz。

基于声学定位系统良好的工作性能,USBL 与长基线(Long Baseline, LBL)定位系统在水下工程作业中得到了广泛应用,但独立的 LBL 与 USBL 均无法满足本任务场景需要。LBL 定位精度高,精度不受水深影响,但定位控制范围有限,适合工程安装作业而不适合长距离定位导航作业。USBL 应用方便,可快速部署到作业地点,但精度随水深增加

而降低。经评估,本作业场景下,USBL 独立定位精度为 1.5~6m,数据输出频率 1~2Hz,无法满足巡检导航定位需求。

为满足水下定位导航要求,本文研究了 USBL 辅助下的组合惯导定位系统,为 ROV 管线巡检提供基础位置数据信息,研究涉及 ROV 搭载的传感器主要有 USBL 信标、水下测量罗经、DVL 及深度

计。上述传感器原始测量数据通过 ROV 脐带缆传输至 DP 母船,导航数据融合终端在母船实现。

2 ROV 导航定位框架设计

如图 2 所示,导航定位系统框架主要包含嵌入式运行模式、仿真运行模式和数据分析模块三部分。

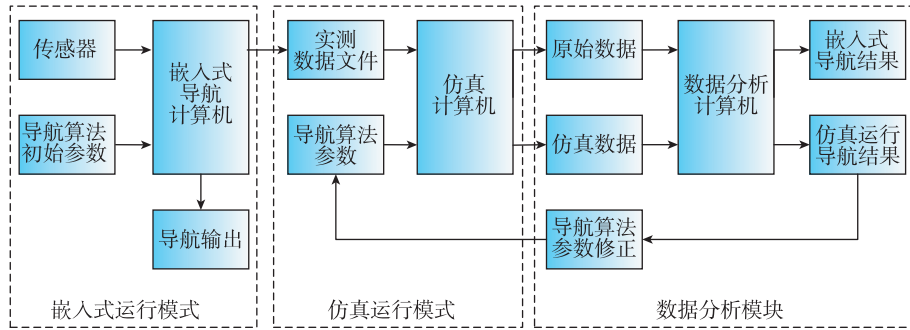


图 2 实测数据回放导航系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the measured data replay navigation system

2.1 嵌入式运行模式

嵌入式运行模式是在 ROV 的嵌入式导航计算机中的工作模式。在该模式下,导航系统工作在真实的水下环境中,主要进行导航信息解算和原始信息存储两项任务,如图 3 所示。

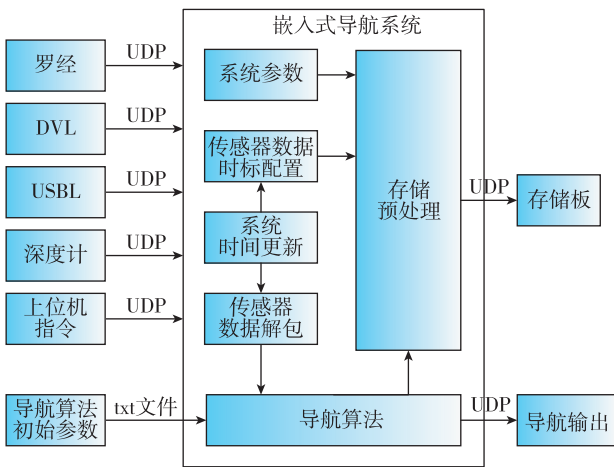


图 3 嵌入式运行模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of embedded operation mode

该模式下,系统输入主要为传感器数据、上位机指令和导航算法参数三大类。罗经、DVL、USBL 和深度计是 ROV 接入的传感器,分别为 ROV 提供量测的姿态角信息、对地速度信息、位置信息和深

度信息;上位机指令是水下试验过程中,上位机发出的包括算法复位、模式切换、参数赋值等在内的指令,是 ROV 工作环境的一部分;导航算法参数是包括量测噪声、过程噪声、状态变量和协方差阵初始值等在内,会一定程度上影响算法稳定性、快速性和精度的参数。

传感器数据和上位机指令以用户数据包协议 (User Datagram Protocol, UDP) 接入系统,以系统内部时钟为基准对以上信息进行时标配置,同时根据各传感器协议进行解包。导航算法以初始参数和传感器数据为输入,实时解算 ROV 的定位信息并输出。传感器原始数据和解算的导航数据均被导航系统合并保存,以 UDP 输出至存储板形成实测数据文件。

2.2 仿真运行模式

仿真运行模式是在仿真计算机中的工作模式。在该模式下,导航系统工作在以回放数据为基础的模拟环境中,主要进行水下试验的数据复现和导航算法的调试更新仿真两项任务,如图 4 所示。

该模式下,系统输入为导航算法参数和嵌入式运行模式中输出的实测数据文件。实测数据文件中主要包括原始传感器数据、上位机指令以及嵌入式运行模式下的系统状态及导航输出等内容。

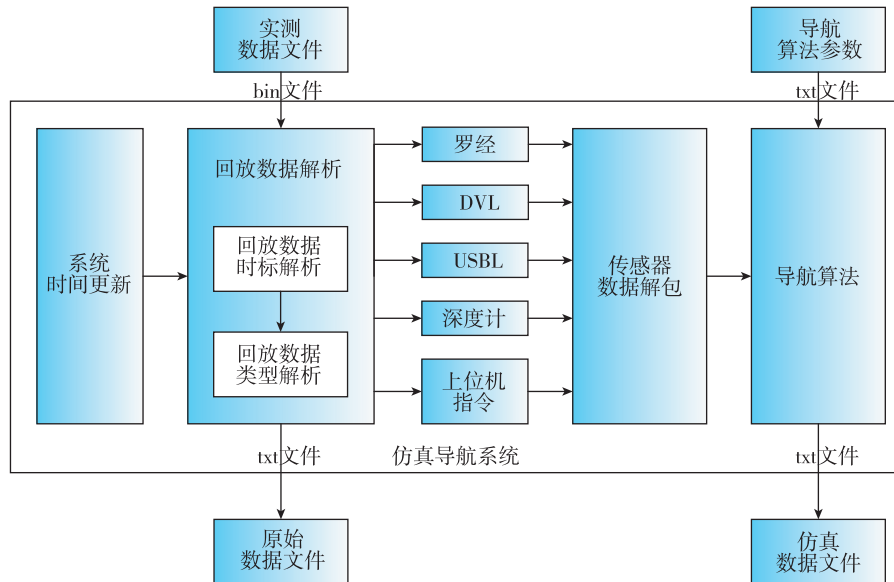


图 4 仿真运行模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simulation operation mode

仿真导航系统具备与嵌入式导航系统相同的时钟基准,并以该基准对实测数据文件进行回放数据解析,将同步于当前时钟的实测数据释放,还原相应的传感器原始数据以及嵌入式运行模式下的导航输出数据。仿真导航系统与嵌入式导航系统的核心部分完全一致,共用相同的传感器数据解包模块和导航算法模块,保证了仿真复现精度。

与嵌入式运行模式不同的是,仿真运行模式没有进行基于时标的数据存储,而是输出一系列基于原始数据和仿真数据的文件,这些文件包含以系统时钟为基准的各个时刻的传感器数据、航位推算数据、组合导航数据和导航算法状态变量等信息,为数据分析模块提供丰富的数据来源。

2.3 数据分析模块

数据分析模块是运行在数据分析计算机上的软件,为仿真运行模式下输出的一系列数据文件提供可视化分析结果。

图 5 所示为数据分析模块的界面截图。根据功能的不同,主要分为数据模式选择、传感器数据显示和导航算法分析三部分。数据模式分为原始数据和仿真数据,分别对应仿真运行模式下输出的原始数据文件和仿真数据文件,反映了嵌入式导航系统和仿真导航系统下的导航结果。传感器数据显示区的不同按钮可以绘制罗经、DVL、USBL 和深度计的数据曲线,同时 USBL 按钮还能够绘制

ROV 平面运行轨迹。导航算法分析区可以绘制航位推算和基于卡尔曼滤波的组合导航的位置图像和平面运行轨迹,并以 USBL 为基准进行算法的误差解算,同时能够显示状态变量和协方差阵主对角线元素在滤波过程中的迭代情况,为算法调整和参数优化提供参考信息。

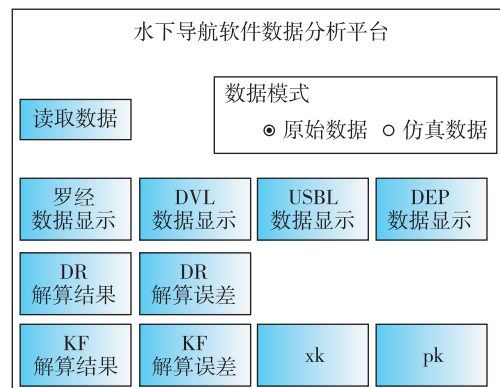


图 5 数据分析模块界面截图

Fig. 5 Interface of data analysis module

3 ROV 组合导航算法研究

3.1 航位推算

通过罗经获得 ROV 航向角 φ 、俯仰角 θ 和滚转角 γ ,则当前时刻从机体坐标系到导航坐标系的姿态转移矩阵 C_b^n 为

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos\gamma \cos\varphi + \sin\gamma \sin\theta \sin\varphi & \cos\theta \sin\varphi & \sin\gamma \cos\varphi - \cos\gamma \sin\theta \sin\varphi \\ -\cos\gamma \sin\varphi + \sin\gamma \sin\theta \cos\varphi & \cos\theta \cos\varphi & -\sin\gamma \sin\varphi - \cos\gamma \sin\theta \cos\varphi \\ -\sin\gamma \cos\theta & \sin\theta & \cos\gamma \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过 DVL 获得 ROV 在机体坐标系下的三轴线速度 \mathbf{V}_b , 考虑速度量测噪声 \mathbf{W}_{DVL} 是均值为 0 的高斯白噪声, 可以计算得到 ROV 在导航坐标系下的速度 \mathbf{V}_n , 如式(2)所示

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{C}_b^n \cdot (\mathbf{V}_b + \mathbf{W}_{\text{DVL}}) \quad (2)$$

根据导航坐标系下的速度可以计算得到经纬度变化率, 如式(3)所示

$$\begin{cases} \dot{L} = \frac{v_N}{R_m + h} \\ \dot{\lambda} = \frac{\sec L \cdot v_E}{R_n + h} \\ \dot{h} = v_U \end{cases} \quad (3)$$

其中, L, λ, h 分别表示纬度、经度和高度; $\dot{L}, \dot{\lambda}, \dot{h}$ 分别表示纬度、经度和高度变化率; v_N, v_E, v_U 分别代表 ROV 在导航坐标系下北向、东向和天向速度; R_m, R_n 分别代表子午圈地球曲率半径和卯酉圈地球曲率半径。

因此, 经纬度迭代过程如式(4)所示

$$\begin{cases} L_k = \dot{L}_k T_0 + L_{k-1} \\ \lambda_k = \dot{\lambda}_k T_0 + \lambda_{k-1} \\ h_k = \dot{h}_k T_0 + h_{k-1} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $L_{k-1}, \lambda_{k-1}, h_{k-1}$ 和 L_k, λ_k, h_k 分别表示上一时刻和当前时刻 ROV 的纬度、经度和高度; $\dot{L}_k, \dot{\lambda}_k, \dot{h}_k$ 表示当前时刻 ROV 的纬度、经度和高度变化率; T_0 表示系统周期。

3.2 组合导航

图 6 所示为基于卡尔曼滤波的组合导航原理

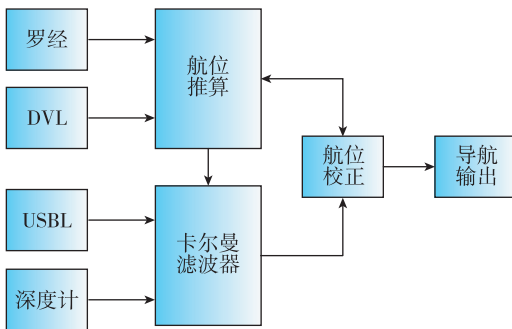


图 6 组合导航原理图

Fig. 6 Block diagram of integrated navigation system

图, 罗经和 DVL 进行航位推算迭代, 航位推算的位置与 USBL 和深度计的位置作为卡尔曼滤波器的输入进行组合导航, 解算其位置误差并以该误差对航位推算结果进行校正, 进而作为组合导航位置进行输出。

以纬度、经度和高度误差作为状态变量, 则组合导航的系统方程为

$$\begin{bmatrix} \delta L_k \\ \delta \lambda_k \\ \delta h_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{v_E(k-1) \cdot \tan L_{k-1} \cdot \sec L_{k-1} \cdot T_0}{R_n(k-1)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta L_{k-1} \\ \delta \lambda_{k-1} \\ \delta h_{k-1} \end{bmatrix} + \mathbf{G}_{k-1} \cdot \mathbf{W}_{\text{DVL}} \quad (5)$$

$$\mathbf{G}_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{T_0}{R_m(k-1)} & 0 \\ \frac{\sec L_{k-1} \cdot T_0}{R_n(k-1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{C}_b^n(k) \quad (6)$$

其中, $\delta L_{k-1}, \delta \lambda_{k-1}, \delta h_{k-1}$ 和 $\delta L_k, \delta \lambda_k, \delta h_k$ 分别为上一时刻和当前时刻的纬度、经度和高度误差; $v_E(k-1)$ 为上一时刻的东向速度; $R_m(k-1), R_n(k-1)$ 为上一时刻子午圈和卯酉圈地球曲率半径; $\mathbf{C}_b^n(k)$ 为当前时刻机体坐标系到导航坐标系的转换矩阵。

以 USBL 与航位推算的经纬度之差和深度计与航位推算的高度之差作为观测量, 则量测方程可以表示为

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} L_k^{\text{USBL}} - L_k^{\text{DR}} \\ \lambda_k^{\text{USBL}} - \lambda_k^{\text{DR}} \\ h_k^{\text{DEP}} - h_k^{\text{DR}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta L_k \\ \delta \lambda_k \\ \delta h_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{USBL}L} \\ \mathbf{W}_{\text{USBL}\lambda} \\ \mathbf{W}_{\text{DEP}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $L_k^{\text{USBL}}, \lambda_k^{\text{USBL}}$ 分别为当前时刻 USBL 量测的纬度和经度, h_k^{DEP} 为当前时刻深度计量测的高度; $L_k^{\text{DR}}, \lambda_k^{\text{DR}}, h_k^{\text{DR}}$ 分别为当前时刻航位推算的纬度、经度和高度; $\mathbf{W}_{\text{USBL}L}, \mathbf{W}_{\text{USBL}\lambda}$ 分别为 USBL 的纬度和经度量测误差, \mathbf{W}_{DEP} 为深度计的深度量测误差。

根据卡尔曼滤波的计算公式进行迭代并实时

进行航位校准,则可以计算得到组合导航位置。

4 测试验证

基于上述系统框架及算法研究,研制了 ROV 导航定位系统工程样机,如图 7 和图 8 所示,包含导航融合终端软件及全国产化的光纤罗经。



图 7 ROV 导航传感器配置

Fig. 7 Configuration of ROV navigation sensors

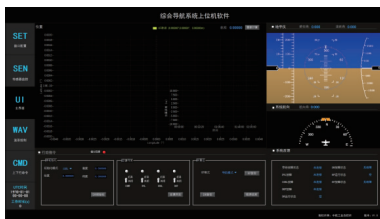


图 8 导航数据融合终端

Fig. 8 Terminal of navigation data fusion

4.1 海试验证

2021 年 11 月,在南海某海域利用某型 ROV 进行导航定位系统测试验证试验,现场配置状态如图 7 所示。现场用于试验的配套系统与传感器主要有 USBL (Sonardyne Range2 HPT5000)、DVL (RDI 1200kHz navigator) 及深度计 (Trettech Seaking Bathy)。

以其中一例扫管试验为分析对象,实测数据输出如图 9~图 12 所示

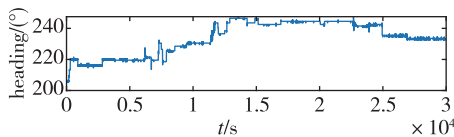


图 9 罗经航向角数据

Fig. 9 Heading data from Compass

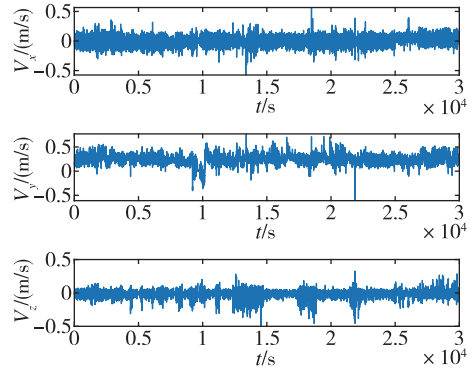


图 10 DVL 三轴速度数据

Fig. 10 Velocity data from DVL

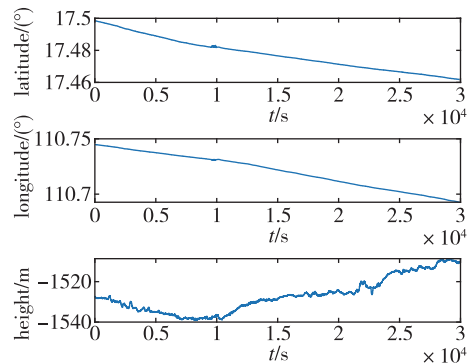


图 11 USBL 定位数据

Fig. 11 Positioning data from USBL

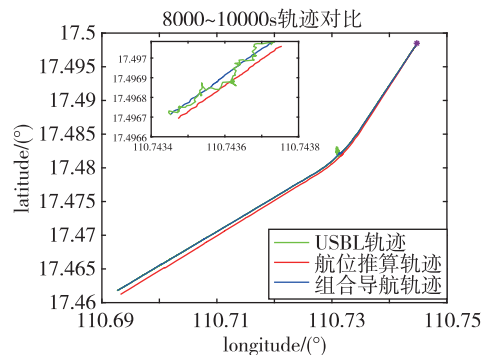


图 12 组合导航输出结果

Fig. 12 Output of integrated navigation system

通过图 12 组合输出结果可以看出,相比 USBL 输出,组合导航输出结果更加平滑。通过曲线拟合方式,去除趋势项后,USBL 剩余噪声方差为 5m,组合导航剩余噪声方差为 0.8m,通过组合压制了 80%定位噪声。

试验测试过程中 1000s 时间段内,ROV 坐底观察,USBL 输出大量野值,组合系统输出稳定,表明系统能够有效应对 USBL 输出异常。

4.2 成图验证

为检验本导航系统的有效性,通过商用综合导航系统 Starfix. NG 分别记录 ROV 载体 USBL 数据和本组合导航系统输出的位置数据,并在多波束数据处理时分别应用两组数据作为对比。

实测数据表明,本组合导航系统可以在保证数据平滑的基础上,获得较高的定位精度,组合系统能够有效平滑 USBL 量测噪声,并能够有效去除 USBL 受到遮挡及干扰时输出的野值点,数据输出频率达 10Hz,如图 13 所示。同时,将本组合导航系统输出的位置数据应用于多波束数据处理也获得了更细腻的细节表达,如图 14 所示,调查所得数字地形模型能够更真实地反映管线在位状态及海底地形,对水下高精度调查具有巨大提升作用。

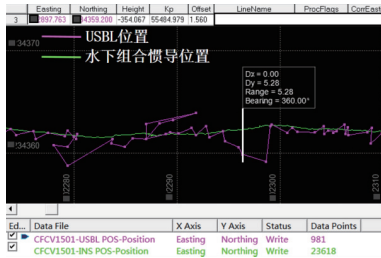


图 13 实测水下组合惯导与 USBL 位置对比

Fig. 13 Position comparison of underwater combined inertial navigation and USBL

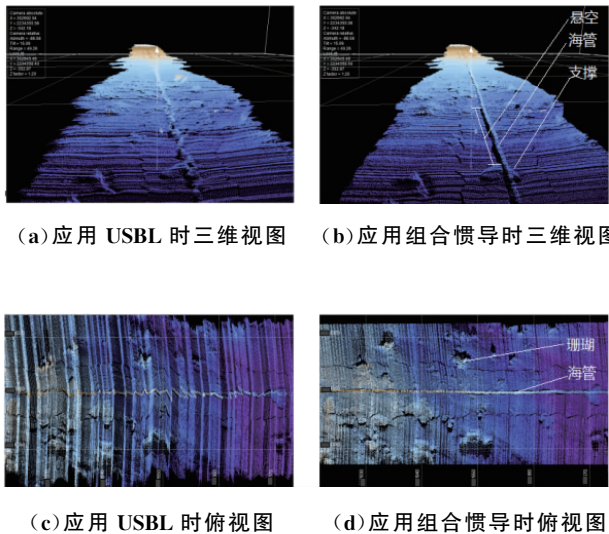


图 14 同一区域水下组合惯导与 USBL 导航下多波束处理成果对比

Fig. 14 Comparison of multi-beam processing results of under underwater combined inertial navigation and USBL navigation in the same area

5 结论

针对 ROV 水下生产作业对导航定位系统的需求,研制了包含导航融合终端软件及国产化光纤罗经在内的 ROV 导航定位系统工程样机,并进行了海上工程应用验证,结果表明:

1)构建的包含嵌入式运行模式、仿真运行模式和分析数据模块三部分的水下导航数据融合开发系统框架可靠有效,解决了水下导航算法研究过程中算法优化对试验数据的一致性要求和水下试验成本高、难度大、机会少的问题,极大地提高了水下导航算法研究的工作效率。

2)系统工程样机设计合理,系统能够根据时标准确记录并回放 ROV 的工作环境、系统状态和导航输出,为 ROV 的故障分析提供数据支持;能够根据实测数据的回放进行调试仿真,在保证外部环境一致的前提下,调试导航算法参数,为水下导航算法优化提供便捷的途径;此外,能够根据实测数据的复现和调试仿真的输出进行可视化结果分析,直观地显示试验过程数据以及导航算法的调试效果,为水下导航系统提供高效的交互方式。

3)基于 USBL、水下罗经、深度计和 DVL 的组合导航是提高 ROV 水下作业定位精度的有效手段,能有效克服状态发散,实现长时间高精度的水下导航定位。工程样机实测中,对 USBL 噪声实现 80%抑制,并辅助多波束实现高清图,表明该工程样机初步满足设计要求,具备海上商业化运营条件。该系统的应用可显著提高水下定位精度,拓宽 ROV 调查作业水深范围,同时大大改善 ROV 水下安全作业条件,辅助 ROV 应对复杂的水下作业环境。

本研究投入小、成本可控、效益高,具有广阔的应用前景,可广泛应用于海上铺管预调查、铺管后调查、管线挖沟后调查、管线掩埋调查及海上设施安装等 ROV 水下生产作业。但同时也应看到,水下环境复杂以及施工方式多变,系统存在待优化空间,主要为:

1)声学导航设备极易受到干扰,提升声学导航数据预处理能力,抑制噪声,剔除野值是提升系统性能的最有效手段;

2)DVL 对地速度数据是组合导航的重要组成部分,DVL 的安装角度误差与比例因子的获取是提高导航精度的关键;

3)当前 ROV 作业导航定位系统信息直接提供

给成像设备进行辅助成图,信息单向流动,如导航定位系统与成像传感器构成 SLAM 系统,将能够极大提升 ROV 作业性能。

基于上述认识,未来在系统性能提升方面可从以上三方面实施。

参考文献

- [1] 朱兵,李星,刘强,等.鲁棒 Kalman 滤波及其在水下组合导航中的应用[J].导航定位与授时,2021,8(1):96-103.
Zhu Bing, Li Xing, Liu Qiang, et al. Robust Kalman filter and its application in underwater intergrated navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(1):96-103(in Chinese).
- [2] 郭银景,孔芳,张曼琳,等.自主水下航行器的组合导航系统综述[J].导航定位与授时,2020,7(5):107-119.
Guo Yinjing, Kong Fang, Zhang Manlin, et al. Review of integrated navigation system for AUV[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5):107-119(in Chinese).
- [3] 金博楠,徐晓苏,张涛,等.超短基线定位技术及在海洋工程中的应用[J].导航定位与授时,2018,5(4):8-20.
Jin Bonan, Xu Xiaosu, Zhang Tao, et al. USBL technology and its applications in ocean engineering[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4):8-20(in Chinese).
- [4] 马腾,李晔,赵玉新,等.AUV 的图优化海底地形同步定位与建图方法[J].导航定位与授时,2020,7(2):42-49.
Ma Teng, Li Ye, Zhao Yuxin, et al. AUV bathymetric simultaneous localization and mapping based on graph optimization method[J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(2):42-49(in Chinese).
- [5] Li P, Sheng G, Zhang X, et al. Underwater terrain-aided navigation system based on combination matching algorithm[J]. ISA Transactions, 2018, 78: 80-87.
- [6] 张涛,胡贺庆,王自强,等.基于惯导及声学浮标辅助的水下航行器导航定位系统[J].中国惯性技术学报,2016,24(6):741-745.
Zhang Tao, Hu Heqing, Wang Ziqiang, et al. Underwater positioning system based on INS and acoustic buoy system for underwater vehicle[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(6):741-745(in Chinese).
- [7] Ma X, Liu X, Li C L, et al. Multi-source information fusion based on factor graph in autonomous underwater vehicles navigation systems[J]. Assembly Automation, 2021.
- [8] Franchi M, Ridolfi A, Allotta B. Underwater navigation with 2D forward looking SONAR: an adaptive unscented Kalman filter-based strategy for AUVs[J]. Journal of Field Robotics, 2021, 38(3): 355-385.
- [9] Li W, Chen M, Zhang C, et al. A novel neural network-based SINS/DVL integrated navigation approach to deal with DVL malfunction for underwater vehicles [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020.
- [10] Suresh S, Sodhi P, Mangelson J G, et al. Active SLAM using 3D submap saliency for underwater volumetric exploration[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 3132-3138.
- [11] 梁云涛,莫剑飞,戴鹏睿.水下航行体航行数据可视化回放技术研究[J].舰船电子工程,2021,41(1):98-102.
Liang Yuntao, Mo Jianfei, Dai Pengrui. Research on visualizaton and playback technology of underwater vehicle navigation data[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(1):98-102(in Chinese).
- [12] Jin X, Wang Y, Ying R. Research of navigation terminal test method based on real playback signal[C]//Proceedings of China Satellite Navigation Conference. Springer, Singapore, 2017: 739-749.
- [13] Yan F, Sun X. Simulation and analysis system of sea echo based on MATLAB[J]. The Journal of Engineering, 2019(2A): 6931-6934.
- [14] Cristodaro C, Ruotsalainen L, Dovic F. Benefits and limitations of the record and replay approach for GNSS receiver performance assessment in harsh scenarios [J]. Sensors, 2018, 18(7): 2189.

(编辑:孟彬)