

文章编号:1000-4653(2025)03-0176-09

# 散货船智能清舱机器人系统设计与应用

孟杰<sup>1,2,3</sup>, 程皓宇<sup>1,2,3</sup>, 肖汉彪<sup>1,2</sup>, 程君<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>4</sup>, 胡钊政<sup>1,2,3</sup>

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070;
4. 武汉港迪智能技术有限公司, 湖北 武汉 430208)

**摘要:**针对传统散货船人工清舱危险性高、效率低和智能化水平不足等问题,设计了一种基于双控制模式的智能清舱机器人系统,实现了舱内无人化、机岸协同的智能化清舱作业。构建了面向船舱内清舱作业的智能机器人硬件系统,研发了沉浸式云控清舱操作平台;研究了智能化清舱机器人控制方法,包括舱内感知定位、云控与自主导航作业双控制模式以及机岸协同清舱作业等核心技术。最后,以某粮食港口的7万t巴拿马级散货船为对象展开应用验证。结果表明,所提系统提高了清舱作业安全性的同时优化了整体流程,缩短了作业流程整体耗时,可以满足安全且高效的清舱需求。

**关键词:**智能清舱机器人;散货船;舱内导航定位;双控制模式;机岸协同作业

中图分类号:TP242.6;U693

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.021

## Design and application of the Intelligent Cargo Hold Clearing Robot system for bulk carrier

MENG Jie<sup>1,2,3</sup>, CHENG Haoyu<sup>1,2,3</sup>, XIAO Hanbiao<sup>1,2</sup>, CHENG Jun<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Tao<sup>4</sup>, HU Zhaozheng<sup>1,2,3</sup>

1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Intelligent Transport System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. Wuhan Guide Intelligent Technology Co., Ltd, Wuhan 430208, China)

**Abstract:** Aiming to address the issues associated with traditional artificial cargo hold clearing operations, such as high risk, low efficiency and an insufficient level of automation, this paper introduces the Intelligent Cargo Hold Clearing Robot (ICHCR) system for bulk carriers. Based on dual-mode control, the ICHCR system achieves unmanned operation and robot-shore collaborative intelligent cargo hold clearing. The article presents an intelligent robot hardware system for cargo hold clearing and a cloud control platform for immersive operation. Intelligent control methods for the ICHCR are investigated, including perception and localization inside the cargo holds, and dual control modes of cloud control and autonomous navigation operation. Other core technologies include robot-shore cooperative cargo hold clearing. Finally, the system was applied and validated on a 70,000-tonne Panamax bulk carrier in a grain port. Experimental results demonstrate that the ICHCR system improves the safety of cargo hold clearing operations, optimizing the overall process and reduces time consumption, meeting the requirements of safety and efficiency.

**Key words:** intelligent cargo hold clearing robot; bulk carrier; Navigation and localization in cargo hold; dual-mode

收稿日期:2024-04-11

作者简介:孟杰(1993—),男,副研究员,博士,研究方向为智能机器人。E-mail:mengjie09@whut.edu.cn

通信作者:胡钊政(1980—),男,教授,研究方向为智能船舶。E-mail:zzhu@whut.edu.cn

引用格式:孟杰,程皓宇,肖汉彪,等.散货船智能清舱机器人系统设计与应用[J].中国航海,2025,48(3):176-184.

MENG J, CHENG H Y, XIAO H B, et al. Design and application of the Intelligent Cargo Hold Clearing Robot system of bulk carrier[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 176-184. (in Chinese)

control; robot-shore cooperative operation

散货运输是水上运输的主要方式,占全球总货运量的比例接近 50%<sup>[1-3]</sup>。散货船在卸货时需占据散货港口泊位和卸货机械,卸货效率直接影响了散货港口作业效率。其中,清舱作业是卸货的必要环节,在卸货后期工人需进入深舱内驾驶装载机进行堆料工作以协助卸船机或门机清空舱内余料。目前清舱作业过程主要存在以下问题:1) 危险性高,工人需进入存在大量粉尘甚至消杀药剂的深舱内工作,抓斗落料也随时威胁人员和设备安全;2) 效率不高,清舱过程中工人需进出舱,舱外通常也需配置安全员,并且门机抓斗和装载机独立作业缺乏高效协同规划等;3) 智能化不足,现有清舱机械仍以人工驾驶为主,缺乏智能感知、自主导航以及协同作业能力。因此,研发面向散货船清舱作业的智能移动机器人代替工人完成清舱作业,对提高散货港口的安全性、效率和智能化水平具有重大意义。

目前,已有不少关于散货卸船装备自动化的研究<sup>[4-6]</sup>,主要研究方向是岸端门机或卸船机的智能化,针对装载机这一舱内清舱用设备智能化的研究不足。JIANG 等<sup>[7]</sup>和 MI 等<sup>[8]</sup>都利用卸船机上安装的激光雷达来对狭小舱口识别。张文明等<sup>[9]</sup>在卸船机上安装相机并利用改进的卷积神经网络识别图像中抓斗的位置。安建平<sup>[10]</sup>利用激光对卸船机作业环境进行三维重建并规划抓斗的路径。王欣等<sup>[11]</sup>在连续卸船机上安装激光扫描仪利用改进算法对连续卸船机取料装置的换舱路径进行避障路径规划。

机器人应用在各行各业都占有重要地位<sup>[12-13]</sup>,但是清舱机器人的应用探索还较少。已有不少对装载机这一工程机械的智能化改造研究<sup>[14-15]</sup>,但在清舱作业领域,仍以人工驾驶器械作业的方式为主,缺少专属的智能化作业机械。虽然有少量基于现有设备进行远控改造的测试工作,但是远控端普遍无法进行智能计算,驾驶交互体验较差,装载机端也缺乏智能感知与自主导航功能,并且远控系统尚未与其他清舱设备(如门机、卸料斗等)进行协同作业,使得系统整体智能化程度不高。

针对以上问题,本文围绕港口场景下智能清舱的需要,设计了一种智能清舱机器人系统,其主要由硬件系统和智能化控制系统构成。在硬件系统设计上,首先对原有清舱设备进行改造,搭建包含多传感器系统与机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)架构的清舱机器人;其次,构建具有智能计算与信息交互功能的云控端;最后,采用光纤与无线通

信相结合的方式实现设备间的远程通信。在智能化控制系统构成上,开发了一套融合多传感器的机器人感知与多层避碰框架,实现舱内的精准定位与地图构建;设计了一种双控制模式系统,集成了一种自主智能装铲技术以实现自主导航作业,搭建了清舱机器人管控云平台以支持云控;提出了一种舱内无人化智能化机岸协同作业方法<sup>[16]</sup>。

## 1 硬件系统设计

### 1.1 机器人端系统设计

本文提出的智能清舱机器人(Intelligent Cargo Hold Clearing Robot, ICHCR)系统如图 1 所示。智能清舱机器人系统首先搭载了面向 ROS 架构的域控制器。其次,为了满足清舱机器人智能化的需求,对原本的清舱作业车辆进行硬件改装,搭建智能化硬件系统,如图 2 所示,包括传感器系统与底盘改装。

1) 传感器系统搭建:基于多传感器融合感知技术,搭建面向散货船舱内清舱作业的传感器系统,解决了散货船舱内低光照与动态物料变化的干扰。为了满足机器人自主作业与智能感知需求,搭载了鱼眼相机、多线激光雷达、转速传感器与 IMU 传感器系统,在传感器布局上,选择在原装载机驾驶室顶布置四个鱼眼摄像头并安装主激光雷达,在清舱机械车尾安装补盲雷达。为获得较好的环视视野,通过拼接主激光雷达与补盲雷达所采集的点云信息以获得车身周边全面的激光点云视野。搭载自动化铲装传感器,为一键智能装铲技术提供铲斗角度信息。为实现机岸协同作业,搭载反光板与机岸协同标定设备进行机岸标定。标定后的岸端门机可以通过反光板确定舱内清舱机器人位姿以实现机岸坐标统一。安装拾音相机,在云控作业中为云控端的驾驶人员还原现场的音频信息。

2) CAN 底盘/ROS 接口:为满足清舱机器人实时通信需求,进行通用化 CAN 总线改造。对 CAN 总线和 ROS 接口进行适配,实现对线控底盘的控制,大大提高平台的通用性与数据传输效率。智能清舱机器人 ROS 通信架构如图 3 所示。

### 1.2 云控端系统设计

为了向司机提供丰富的舱内感知信息进而能够沉浸式操作,本文设计了基于智能舱内感知的云控清舱方法。控制台如图 4 所示,为了再现驾驶员熟悉的操作环境,提供沉浸式作业条件,云控台按真实驾驶台布置。视景显示系统在显示屏上实时显示清

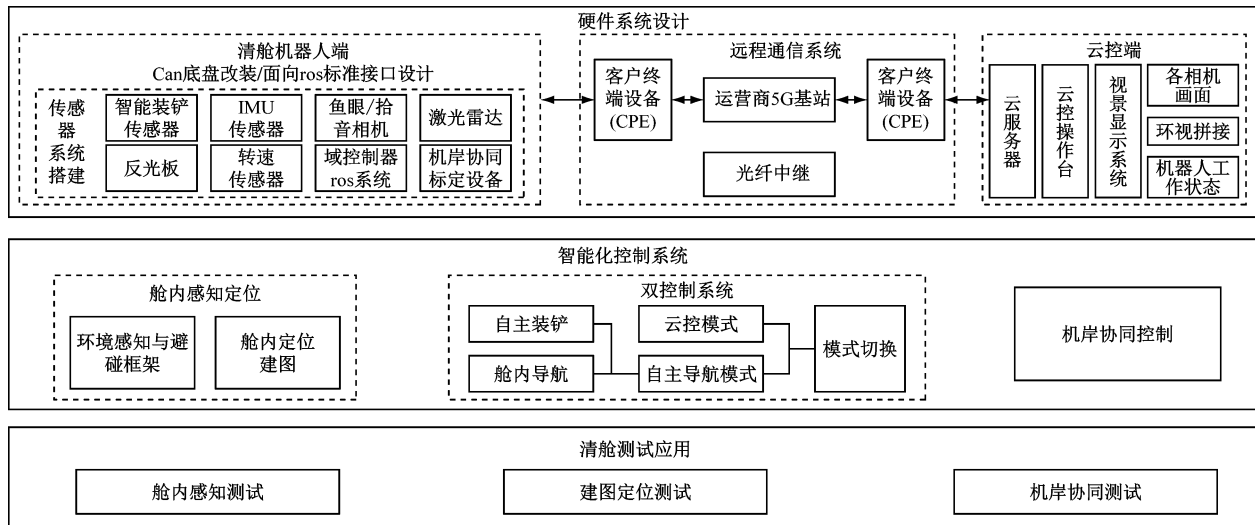


图 1 智能清舱机器人系统设计框图

Fig. 1 Design diagram of ICHCR system



图 2 清舱机器人硬件系统

Fig. 2 ICHCR hardware system

时工作状态,为操作人员提供 360 度无盲区视野以及各种状态信息用以辅助作业。同时,可以灵活切换控制多台清舱机器人,并将数据上传至云平台进行存储、分析。



图 4 沉浸式云控驾驶台

Fig. 4 Immersive Cloud-controlled driving console

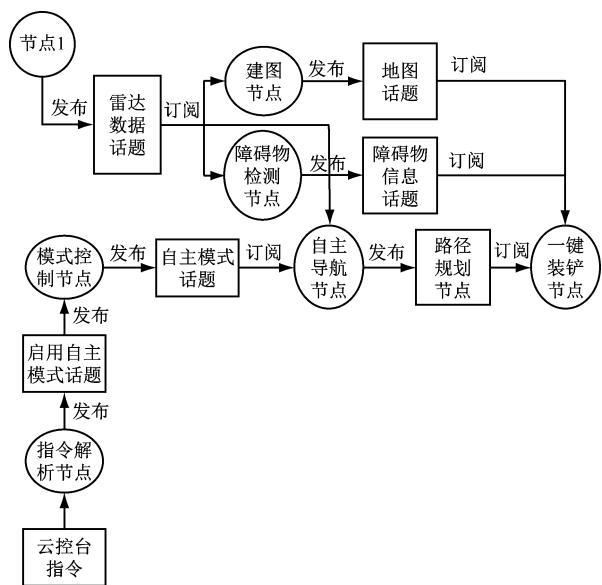


图 3 清舱机器人 ROS 通信架构

Fig. 3 Architecture of ICHCR's ROS communication

### 1.3 远程通信系统

本文的各硬件设备之间基于 5G/WIFI6 通信,船机岸通信系统如图 5 所示,通过机岸光纤/无线中继低延时网络通信实现清舱机器人与云控系统之间的通信。利用 5G 低延时与高宽带的优势,实现控制中心与舱内所有清舱机器人的全方位高可靠通信,进而提高系统整体控制性能和作业效率。

## 2 智能化控制系统搭建

### 2.1 舱内感知和定位

#### 2.1.1 舱内环境感知

本文通过结合基于激光点云的障碍物识别技术和三维空间环视成像技术,实现了激光雷达与环视相机之间感知范围的互补,构建了清舱机器人无盲区感知系统。为了保障清舱机器人在其复杂多变的工作环境下自身与场景交互动作的安全性,在感知系统的基础上设计了多层防撞框架,如图 6 所示。该框架包含面向车速变化的预警检测范围和对舱顶

舱机器人的左、右方视角摄像机画面拼接后的环视场景,并提供舱内点云实时状态与当前机器人的实

卸船机抓斗的防撞检测,可识别机器人铲臂与铲斗的反射点云,并区分船舱舱壁和障碍物。系统满足

机器人贴壁行走的需求,在确保安全的同时允许非障碍物(铲臂与铲斗)进行正常作业。



图5 船机岸通信系统

Fig. 5 Ship-loader-shore communication system

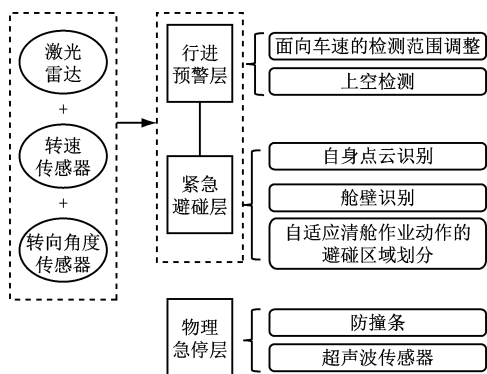


图6 机器人避碰框架

Fig. 6 Collision avoidance framework of ICHCR

### 2.1.2 舱内建图定位

本文在 ROS 下采用激光雷达与 IMU 紧耦合的舱内实时地图构建与更新 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 算法,整体框架如图 7 所示。在建图过程中,舱内的物料与抓斗的位置处于动态变化状态,而现有的 SLAM 技术对动态物体的展示性不满足舱内建图需求。为了解决舱内高动态环境对建图带来的干扰,本文利用舱内场景较小、对建图所需帧数少的特点,使用滑窗法优化建图效果,实现舱内地图的自动更新。在整套作业流程中,多传感器紧耦合地图构建算法筛选出滑窗建图所需的固定帧。随着时间窗口的滑动,舱内地图一直处在自动更新中,以更好地展示舱内物料的动态变化。在定位过程中,采用基于卡尔曼滤波的正态分布变换 (Normal Distributions Transform, NDT) 定位算法,提供对系统的最佳状态估计。算法所提取的关键帧原始激光点云数据经过卡尔曼滤波处理后,与当前地图相匹配,可以得到更精准的定位结果,实现动态场景下的抗干扰定位。

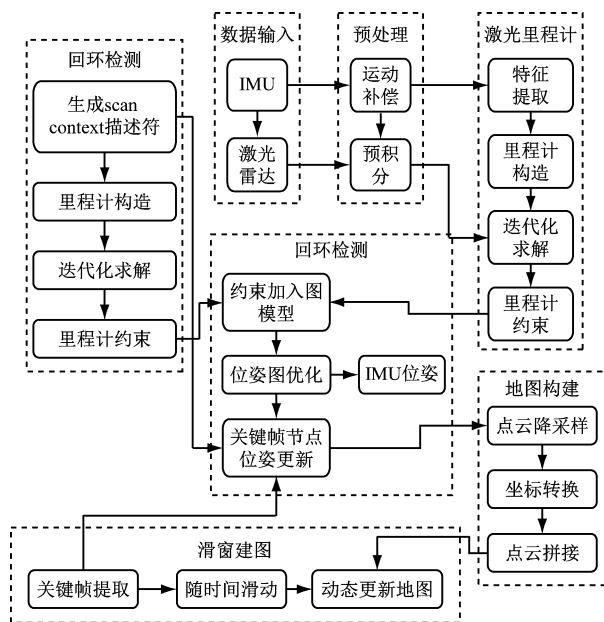


图7 舱内实时地图构建与更新算法框架

Fig. 7 Algorithmic framework for real-time mapping and updating inside the cabin

## 2.2 控制模式

### 2.2.1 云控模式

为了提高机器人管理指挥工作的效率与可靠性,搭建了云平台,实现对清舱机器人的智能化集中管理,云平台界面如图 8、图 9 所示。通过云控管理平台,用户可以对码头多台清舱机器人进行统一管理,远程实时监控各个清舱机器人的运行状态、位置和工作情况,并进行数据云端计算。用户可通过云控管理平台向清舱机器人发送作业指令。

云控流程如图 10 所示。云平台可以处理、分析与挖掘清舱机器人的历史作业数据,预测货物的到达时间、装卸需求等信息,从而优化清舱机器人的调度计划,提高港口清舱作业指挥效率,提升港口物流的响应速度和灵活性。



图8 云控管理平台

Fig. 8 Cloud-controlled management platform

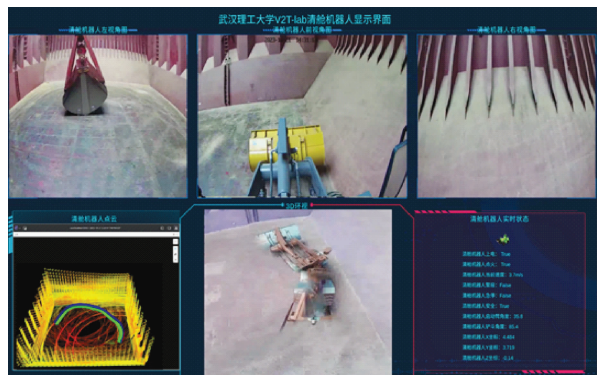


图9 云控清舱操作平台

Fig. 9 Cloud-controlled ICHCR operating platform

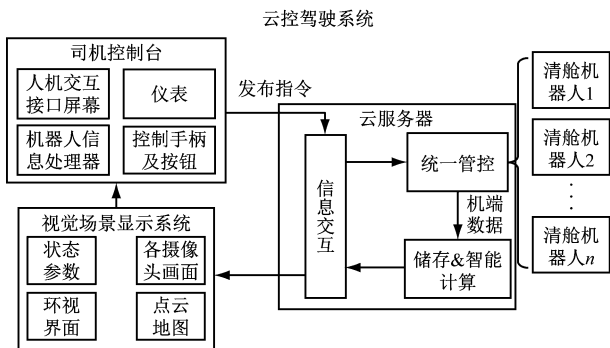


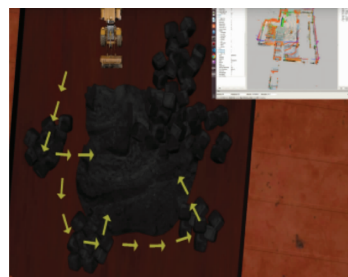
图10 云控流程框图

Fig. 10 Cloud control process diagram

### 2.2.2 自主导航模式

构建场景地图后,清舱机器人便可依据地图中的环境信息和激光雷达的传感数据进行自主定位与路径规划,从而实现舱内自主导航作业。本系统采用改进 A\* 算法<sup>[17]</sup>,实现高效规划铲料全局路径,并结合局部路径规划算法,规划机器人从当前位置行驶到铲料点进行铲料并堆放到指定堆料点这一过程的铲装轨迹与运动路径。在点云地图中,单独分割出地面落料区域,地图中突起的部分即为堆料地点或货物集中地。在地图中寻找一条最短避障路径,实现行驶代价最小的舱内局部路径规划。接收规划的清舱机器人铲装轨迹和运动路径后,根据所标定的清舱机器人大臂和铲斗角度,自主装铲系统

便可控制机器人实现全自动铲料、堆料。同时该系统可支持云控驾驶台的一键操作按钮进行大臂一键抬升、抓斗一键贴地找平(如图11所示)。



(a) 轨迹规划



步骤1:靠近



步骤2:下铲



步骤3:铲料



步骤4:转斗



步骤5:卸料



步骤6:撤离

(b) 自主铲料

图11 自主导航模式下轨迹规划与自主铲料

Fig. 11 Trajectory planning and automatic-shoveling in the autonomous navigation mode

### 2.2.3 双控制模式切换

清舱机器人两种控制模式(云控模式、自主模式)的适用情况不同:在一些极为复杂的作业情景下,由熟练工人云控驾驶机器人作业,比自主作业更加可靠;而在高强度但场景与任务较为简单的情况下,自主模式风险更小。面向清舱机器人最优作业效率的双控制模式设计思路是根据实际需求为每种工作模式定义对当前任务和场景的适应性权重。系统根据执行任务类型、机器人定位状态以及预先定义的权重计算每种工作模式的权重得分,选择得分较高的工作模式作为当前的工作模式,即若云控模式得分较高,则向云控端发出操作请求。在执行过程中,如果任务要求或场景条件发生变化,机器人将重新计算工作模式权重并依据结果选择是否切换。

### 2.3 机岸协同清舱控制

在智能化作业中,为预防卸船机与清舱设备的碰撞隐患,设计了一种针对散货船清舱作业场景的机岸协同定位方法<sup>[18]</sup>,协同作业的原理及其仿真系统如图12所示。岸端设备(卸船机或门机)和舱内

设备(装载机,即清舱机器人)上均设置有对应的传感器。协同定位流程为:首先获取并处理定位所需的各类数据,然后统一卸船机和清舱机器人的坐标系,计算两者之间的相对位置并获取协同定位信息,最后以散货物料及抓斗的时空位置为核心,精准规划作业动作。

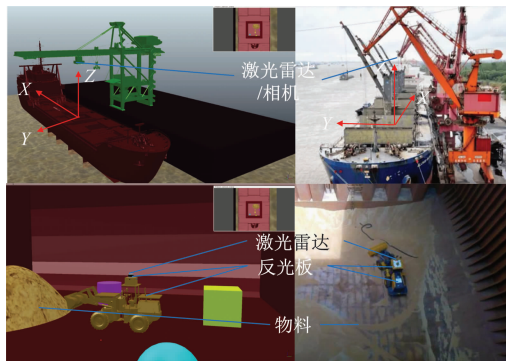
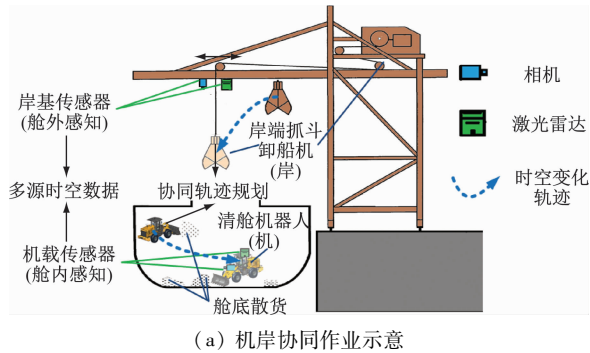


图 12 机岸协同清舱仿真系统

Fig. 12 Simulation system of robot-shore cooperative cargo hold clearing

## 3 应用测试与结果分析

### 3.1 舱内感知算法测试与分析

环视测试选用了四个鱼眼摄像头(狼蛛 D3032),分别在岸端与舱内进行了标定与拼接效果测试。岸端标定误差分析如图 13 所示,拼接缝处的标定布基本重合,没有明显偏移。通过重投影误差来评价误差大小,测试结果表明,最大像素误差为 6 个像素,平均像素误差为 4 个像素。舱内环视及前视效果如图 14 所示,环视及前视成像完整,没有明显偏移,且畸变矫正效果较为理想,拼接痕迹不明显,基本实现舱内的全景环视及前视。

### 3.2 舱内建图定位测试与分析

#### 3.2.1 真实船舱环境下建图效果测试

如图 15 所示,针对真实船舱场景进行建图测试,选用 RSridar16 线激光雷达作为主激光雷达、RSridar32 线激光雷达作为补盲雷达。清舱机器人在有余料的船舱内处理物料并同步进行建图工作,以

在舱内完整的堆料运动为一次测试过程完成建图。

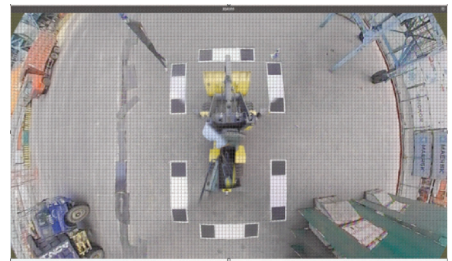


图 13 标定误差分析

Fig. 13 Calibration error analysis

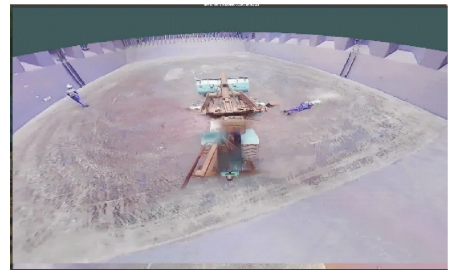


图 14 舱内环视及前视效果展示

Fig. 14 Panoramic and forward view in cargo hold

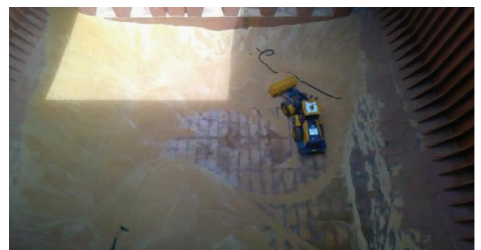


图 15 散货船清舱场景

Fig. 15 Cargo hold clearing scene on bulk carrier

建图过程如图 16 所示,使用 Rviz 软件展示了部分建图过程。可以看出,建图过程中里程计较为稳定,与真实环境对照可知舱内环境细节还原度好,系统对堆积物料动态变化及粉尘干扰具有良好鲁棒性。

#### 3.2.2 舱内定点定位精度测试

本文选择清舱机器人在真实船舱从堆料到抓斗取料过程的运动数据进行测试分析。该测试场景下,清舱机器人运动始末存在多段长时间的静止状态,分析清舱机器人在该场景下定点定位的数据波动以得到定位精度。

舱内定位结果如图 17 所示,从起始点到 100 s 左右,机器人处于静止状态, $X$ 、 $Y$  轴定位均为 0 m,由于车身抖动, $Z$  轴定位存在上下波动,变化范围是  $-0.01 \sim 0.05$  m;在 105 ~ 160 s,机器人前进后停止, $X$ 、 $Y$  轴定位较为平顺, $X$  轴定位稳定在 5.8 m, $Y$  轴稳定在 0.5 m 左右, $Z$  轴定位在  $-0.09$  m 左右并存在细微波动;在 210 ~ 235 s,机器人经过前进后退后继续保持静止, $X$  轴定位稳定在  $-0.2$  m, $Y$  轴定

位稳定在 0.19 m, Z 轴在 0.025 ~ 0.05 m 并存在细微波动。图 18 反映了本次试验中清舱机器人欧拉角的变化情况。在上述三段静止时间段内,清舱机器人偏航角 (yaw) 均稳定在一个常数值,且运动过程中的角度变化较为平滑。

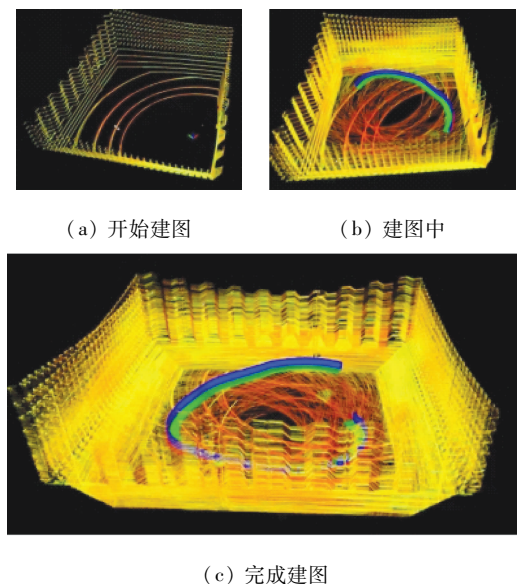


图 16 舱内建图过程

Fig. 16 Cargo hold mapping process

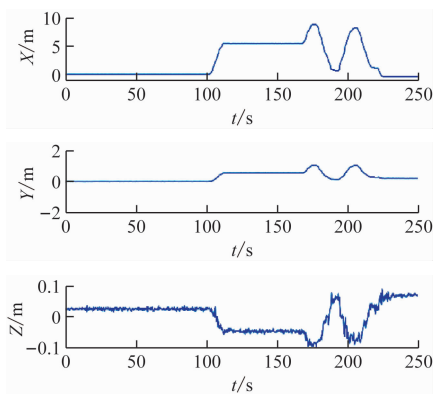


图 17 清舱机器人位置变化结果

Fig. 17 Position change of ICHCR

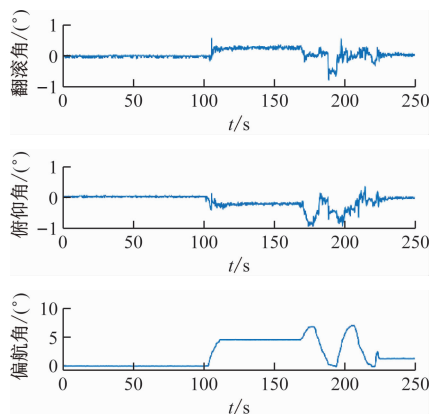


图 18 清舱机器人姿态变化结果

Fig. 18 Euler angle change of ICHCR

综合上述定点定位的数据分析可知:本建图定位算法在舱内作业中定位精度较高,位置误差远小于 20 cm,建图定位算法的角度定位误差小于  $3^\circ$ ,定位精度满足后续自主与协同作业需求。

### 3.3 机岸协同作业测试与分析

本文在真实场景下开展了机岸协同作业测试,机岸协同作业的数字孪生系统画面如图 19 所示,展示了清舱机器人在舱内堆积物料,卸船机抓斗抓取物料的过程。图右上角显示了清舱机器人与抓斗的避碰范围,下方深色区域代表舱内物料,浅色线条代表抓斗轨迹。在协同作业过程中,规划二者运动轨迹,避免碰撞范围重叠,以实现抓斗与清舱机器人的避碰。测试结果表明,协同作业效果良好,轨迹规划准确,在作业过程中抓斗与机器人未产生碰撞风险。

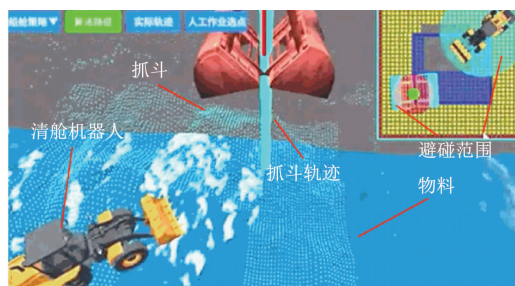


图 19 机岸协同作业的数字孪生

Fig. 19 Digital twin for robot-shore collaborative operations

该测试以 7 万 t 巴拿马型粮食散货船为对象与人工操纵清舱机械与卸船机协作清舱进行对比。整个清舱作业流程耗时对比见表 1。在传统人工作业流程中,作业时需要另外安排指挥人员,舱内人员等待指挥人员发出指令,响应指令完成作业。与传统人工相比,机岸协同作业实现了舱内无人化作业,下舱清舱效率约为人工效率的 78.9%,但节约指挥手调度时间约 1.5 h,整体清舱所需工时约为人工的 84.4%。要注意的是,所提系统采用的舱内无人化操作可有效提升作业安全性,同时粮食船消毒后的进舱时间也可被大大缩短,此外结合自动吊装技术可进一步缩短清舱整体耗时,因此所提系统在整体效率和安全性上具有明显优势。

表 1 机岸协同清舱作业耗时对比分析

Tab. 1 Comparison of time expenditure for robot-shore collaborative cargo hold clearing operations

| 环节    | 单舱机岸协同<br>作业时间/h | 单舱人工作业<br>花费时间/h |
|-------|------------------|------------------|
| 指挥手调度 | 0                | 1.5              |
| 机器人清舱 | 3.8              | 3                |
| 总计    | 3.8              | 4.5              |

## 4 结束语

本文设计了一套基于云控与自主双控制模式的智能清舱机器人系统,研究了清舱智能化控制方法,实现了双控制模式下舱内无人与机岸协同的清舱作业。该机器人系统构建了多传感器融合感知系统与机器人多层防撞框架,面向舱内高动态环境改进了建图定位算法;搭建了清舱机器人集中管控云平台;提出了一种无人化机岸清舱协同作业方法。以某真实粮食舱口的7万t巴拿马型散货船为对象开展了应用验证,结果表明:本文设计的机器人系统能够基本实现舱内全景环视;舱内建图与定位稳定,位置误差约10cm;在粮食散货船舱清舱作业中清舱效率优于人工作业方式,整体清舱所需工时约为人工的84.4%。在未来的工作中,将在现有系统框架下,结合清舱场景需求进一步优化硬件系统及控制方法,重点研究自主清舱作业方法,为实现全过程自主清舱作业奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] 严新平,王树武,马枫. 智能货运船舶研究现状与发展思考[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 1-6.  
YAN X P, WANG S W, MA F. Review and prospect for intelligent cargo ships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 邵斐,真虹. 准班轮模式下干散货船枢纽港转运及联营优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 21-27.  
SHAO F, ZHEN H. An optimization method of bulk carriers in transshipping network and pooling operation based on quasi-liner mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 21-27. (in Chinese)
- [3] 王运龙,纪卓尚,林焰. 散货船现状及其发展趋势[J]. 船舶工程, 2006, 28(1): 58-61.  
WANG Y L, JI Z S, LIN Y. Existing condition and development trend of bulk carriers [J]. Ship Engineering, 2006, 28(1): 58-61. (in Chinese)
- [4] 袁建明,闫家豪,涂铮,等. 散货自动化装船策略设计及算法优化[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(4): 368-374.  
YUAN J M, YAN J H, TU Z, et al. Strategy design and algorithm optimization of bulk cargo automatic loading [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2021, 61(4): 368-374. (in Chinese)
- [5] 王细远. 干散货码头自动化技术[J]. 水运工程, 2018(6): 195-198.  
WANG X Y. Automation technology of dry bulk cargo wharf [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(6): 195-198. (in Chinese)
- [6] 郭远星,施一明,叶莹. 船舶综合控制系统研究与设计[J]. 中国造船, 2010, 51(3): 191-198.  
GUO Y X, SHI Y M, YE Y. Investigation and design of the integrated ship control system [J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(3): 191-198. (in Chinese)
- [7] JIANG Z Y, LIU X Q, MA M, et al. LiDAR-Based hatch localization [J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5069.
- [8] MI C, SHEN Y, MI W J, et al. Ship identification algorithm based on 3D point cloud for automated ship loaders [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73(Sp. 1): 28-34.
- [9] 张文明,刘向阳,李海滨,等. 基于深度学习的门机抓斗检测方法[J]. 光电工程, 2021, 48(1): 200062. doi:10.12086/oe.2021.200062.  
ZHANG W M, LIU X Y, LI H B, et al. The detection method for grab of portal crane based on deep learning [J]. Opto-Electronic Engineering, 2021, 48(1): 200062. doi:10.12086/oe.2021.200062. (in Chinese)
- [10] 安建平. 基于激光三维视觉的大型散货船自动化作业动态场景构建及路径规划[D]. 上海:上海交通大学, 2021.  
AN J P. Dynamic scene construction based on laser three-dimensional vision and route planning for large bulk carrier [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021. (in Chinese)
- [11] 王欣,刘雪莲,姜鑫,等. 连续卸船机取料装置换舱路径规划研究[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(1): 41-51.  
WANG X, LIU X L, JIANG X, et al. Study on cabin change path planning of reclaimer of continuous ship unloader [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(1): 41-51. (in Chinese)
- [12] MENG J, WANG S T, LI G, et al. Iterative-learning error compensation for autonomous parking of mobile manipulator in harsh industrial environment [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 68: 102077.
- [13] TAO Q W, HU Z Z, ZHOU Z, et al. Seqpolar: sequence matching of polarized LiDAR map with hmm for intelligent vehicle localization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7071-7083.
- [14] CAO B W, LIU X H, CHEN W, et al. Intelligent operation of wheel loader based on electrohydraulic proportional control [J]. Mathematical Problems in

- Engineering, 2020;1730946.
- [15] MAJEWSKI M, KACALAK W. Innovative intelligent interaction systems of loader cranes and their human operators [C] // Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems: Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Springer International Publishing, 2017: 474-485.
- [16] XIAO H, JIE M, HU Z, et al. high-precision ship-loader-shore collaborative localization in bulk carrier cargo hold clearing scene[R]. 2024.
- [17] DUCHON F, BABINEC A, KAJAN M, et al. Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot[J]. Procedia Engineering, 2014, 96:59-69.
- [18] XIAO H, MENG J, HU Z, et al. Robot-grabber cooperative localization under highly dynamic clearing operation of bulk carriers [C] //2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (VI). Piscataway: IEEE, 2024: 900-905.

(上接第 156 页)

- LUO J N, GENG X F, WEN J, LI C X. Current status, issues, and prospects of intelligent waterways in China's inland waters [J]. Port and Waterway Engineering, 2023, (2): 123-128. (in Chinese)
- [24] 郭玮,谷宇航,江南.面向多粒度时空对象数据模型的网络电子地图生成方法[J].地球信息科学学报, 2022,24(7):1264-1274.
- GUO W, GU Y Y, JIANG N. A method for generating online electronic maps oriented to multi-granularity spatiotemporal object data models [J]. Journal of Geoinformation Science, 2022, 24(7): 1264-1274. (in Chinese)
- [25] 朱军,付林,李维炼,等.知识引导的滑坡灾害场景动态表达方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020, 45(8):1255-1262.
- ZHU J, FU L, LI W L, et al. Knowledge-guided dynamic expression methods for landslide disaster scenarios [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45 (8): 1255-1262. (in Chinese)
- [26] 张利国,丁雨淋,朱庆,等.铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(6):1018-1027.
- ZHANG L G, DING Y L, ZHU Q, et al. Integrated expression model of “Ontology Domain-Change Domain-State Domain” associations for railway geographic geological data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49 (6): 1018-1027. (in Chinese)
- [27] 景乾峰,神和龙,尹勇.一种基于虚拟现实系统的船舶数字孪生框架[J].北京交通大学学报,2020,44(5):117-124.
- JING Q F, SHEN H L, YIN Y. A virtual reality system-based digital twin framework for ships [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44 (5): 117-124. (in Chinese)

(上接第 175 页)

- [31] FOSSEN S, FOSSEN T I. Five-state extended Kalman filter for estimation of speed over ground (SOG), course over ground (COG) and course rate of unmanned surface vehicles (USVs): experimental results [J]. Sensors, 2021, 21(23):7910.
- [32] SINGER R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, AES-6(4):473-483.
- [33] BROWN R G, HWANG P Y C. Introduction to random signals and applied Kalman filtering [M]. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012.