

文章编号:1000-4653(2023)01-0148-07

基于虚拟仿真测试平台的船舶智能航行系统设计及应用

韩成浩^{1a,1b,1c,2}, 马吉林³, 刘佳仑^{1b,1c,2,4}, 李诗杰^{1a}, 赵轩³

(1. 武汉理工大学 a. 交通与物流工程学院 b. 智能交通系统研究中心 c. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 3. 中国船级社 科创试验中心, 北京 100007; 4. 中国远洋海运集团有限公司 院士工作站, 上海 200127)

摘要:智能航行是智能船舶的核心功能,其关键技术包括对通航环境及船舶自身状态的感知、对全局航线和局部避碰路径规划的决策以及控制船舶自主航行的运动控制算法等。基于“航行脑”系统的设计思想,面向货运船舶开发了由感知、决策、控制、执行、反馈组成的模块化船舶智能航行系统。对船舶智能航行系统的功能需求进行分析,设计了智能航行系统框架;面向苏伊士运河航行场景开发了货运船舶智能航行功能;通过虚拟仿真的方式对智能航行系统功能进行验证,得到了较好的效果。最后对智能航行系统开发与测试过程中出现的问题进行总结,可为货运船舶智能航行系统的开发工作提供参考。

关键词:智能航行;智能船舶;虚拟仿真;船舶运动控制

中图分类号:U661.43

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2023.01.021

Virtual test platform in design and application of intelligent navigation system

HAN Chenghao^{1a,1b,1c,2}, MA Jilin³, LIU Jialun^{1b,1c,2,4}, LI Shijie^{1a}, ZHAO Xuan³

(1a. School of Transportation and Logistics Engineering; 1b. Intelligent Transportation System Research Center; 1c. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China; 3. Science and Technology Innovation Experimental Center, China Classification Society, Beijing 100007, China; 4. Academician Workstation, China COSCO SHIPPING Corporation Limited, Shanghai 200127, China)

Abstract: Based on function requirement analysis, an intelligent navigation system particularly for cargo ships sailing in the Suez Canal is developed. The virtual test platform that simulates a ship in operation is used to verify functions of the navigation system. An Intelligent navigation system consists of a variety of modules, such as perception, decision-making, control, actuator, feedback, etc. The virtual test platform provides necessary environment for testing all the modules and the complete system and plays an indispensable role.

Key words: intelligent navigation; intelligent ship; simulation; ship motion control

收稿日期:2022-02-16

基金项目:南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2021SP101);广东省自然资源厅广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合[2021]59号);国家自然科学基金资助项目(62003250)

作者简介:韩成浩(1996—),男,硕士生,研究方向为船舶智能航行技术。E-mail:chenghaohan@whut.edu.cn

通信作者:刘佳仑(1987—),男,博士,副研究员,研究方向为船舶远程驾控与测试验证评估。E-mail:jialunliu@whut.edu.cn

引用格式:韩成浩,马吉林,刘佳仑,等. 基于虚拟仿真测试平台的船舶智能航行系统设计及应用[J]. 中国航海,2023,46(1):148-154.

HAN Chenghao, MA Jilin, LIU Jialun, et al. Virtual test platform in design and application of intelligent navigation system[J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 148-154. (in Chinese)

水路运输作为一种运量大、成本低的运输方式,在全球货物运输中扮演着重要角色。近年来,随着船舶数量的增加以及大型化的发展趋势,航运业面临着人力成本增加、环境污染加剧、航行安全性不足等一系列挑战。面对上述挑战,船舶智能化的设想开始逐渐被各国研究机构与航运公司重视起来。2015年,欧盟资助的MUNIN(Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Network)项目提出了实现无人驾驶自主船舶所需的技术概念,并从技术、经济和法规层面分析了自主船舶的可用性^[1]。同年,AAWA(Advanced Autonomous Waterborne Application)计划被提出,该项目参与机构包括大学、研究所、船级社以及部分船舶产业集群领先企业,旨在为下一代船舶提供技术规范和初步设计^[2]。2020年,韩国KASS(Korean Autonomous Surface Ship)项目开启,项目计划开发一种具有自主导航功能的智能系统,用于机舱控制、碰撞和事故预防、态势感知和决策的集成平台^[3]。2022年3月,由我国青岛造船厂建造的“智飞”号300 TEU集装箱商船已经完成其智能航行系统技术等级和水平评价,该船具备智能航行能力,能够实现航行环境智能感知认知、航线自主规划、智能避碰、自主靠离泊和远程遥控驾驶等功能^[4]。2022年初,日本MEGURI 2040项目在2个月内对无人船领域进行了6次探索性试验;试验涵盖自主避碰、自主靠离泊、自主导航、运营中心的应急监测和运营以及路径跟踪等内容,对智能航行技术进行了较为深入的测试验证^[5]。在理论研究方面,智能航行研究热点集中在感知与信息融合、运动控制、避碰决策以及测试验证等关键技术^[6-7]。张宝晨等^[8]以船岸协同的方式研究船舶智能航行关键技术;搭建了基于船岸协同的船舶智能航行与控制系统架构。张操^[9]对无人水面船运动控制系统体系结构进行了研究,设计了无人水面船运动控制系统分层递阶式体系结构和混合式体系结构。贾宇等^[10]设计了基于分层规划的航路规划方案,提出多单元模块下的无人艇航路规划策略,所设计的系统具备了自主路径规划和智能避碰功能。刘佳仑等^[11]提出了以虚拟仿真为初试、模型测试为中试和实船验证为终试的智能船舶航行功能测试验证方法体系。沈海青等^[12]和张国庆等^[13]分别基于MMG(Manoeuvring Mathematical Model Group)三自由度模型和Norrbin六自由度非线性船舶运动数学模型开发了船舶自动舵控制算法测试平台。秦有成^[14]基于ROS(Robot Operating System)系统对智能航行中的环境感知、路径规划、轨迹控制进行分层设计,

并基于Gazebo设计了船舶智能航行仿真平台,能够对船舶路径规划、环境感知以及航迹控制等进行仿真试验。由此可见,系统集成感知、规划决策以及船舶运动控制功能,自主进行航行态势感知、路径规划决策并驱动船舶按照规划航线行驶的智能航行系统的工作正在持续深入。

在此背景下,为加快实现海洋强国、科技强国等目标,中国造船工程学会与上海交通大学等单位(以下简称“主办方”)联合发起了中国智能船艇挑战赛。其中,虚拟仿真算法赛(S2组)比赛场景以2021年3月23日苏伊士运河大型商船搁浅事件为参考,要求船模以给定初始航速从给定起点出发,途经弯曲无风航段、直线无风航段以及直线有风航段,直至到达终点。比赛提供了智能航行仿真测试平台用于对智能航行系统功能的测试验证,通过网络与测试平台进行远程通信,由参赛方发送控制指令,主办方通过其测试平台内置的模型计算得出船舶当前状态并反馈给参赛方。为满足赛题要求,基于“航行脑”系统^[15]的设计思想,结合现阶段智能航行关键技术研究情况,设计了面向货运船舶的智能航行系统,从感知、决策、控制三个层面剖析大型商船航行的工作要求与特点,选择合适的方法对大型商船进行操纵运动建模,集成航线规划、避碰路径规划、船舶自主运动控制等功能,设计成体系的大型商船智能航行系统,并以虚拟仿真的方式对智能航行功能进行测试与验证。

1 货运船舶智能航行系统设计

1.1 货运船舶智能航行系统需求分析

根据《智能船舶规范》(2020),智能航行系指利用先进感知技术和传感信息融合技术获取和感知船舶航行所需的状态信息,并通过计算机技术、控制技术进行分析和处理,为船舶的航行提供航速和航路优化的决策建议。在可行时,船舶能够在开阔水域、狭窄水道、进出港口、靠离码头等不同航行场景和复杂环境下实现船舶的自主航行。由此可见,智能航行系统需要具备感知船舶自身状态与外界环境的能力,并能够利用计算机技术为船舶航行提供决策参考,通过控制技术操纵船舶航行。根据国际海事组织(IMO)海上安全委员会第99届会议(MSC 99)关于海上自主水面船舶分级的决议^[16],本文的船舶智能航行系统能够满足完全自主进行决策和航行的要求,属于第4级智能船舶类别,即完全自主船舶(Fully Autonomous Ship)。

在航行过程中,为了确保航行安全,需要船舶具

备足够的感知能力。目前,船舶感知设备主要有激光雷达、海事雷达、单目相机、深度相机、红外相机、惯性测量单元、全球卫星导航系统等。不同的设备适合不同的使用场景,也会受到有效距离、干扰、波浪反射、天气等因素的影响和制约。因此,在设计船舶的感知系统时,使用多种感知设备对船舶自身和航行环境进行监测,才能保证船舶能够在任何场景和环境下都能获取到所需的航行信息。船舶进行航线和路径规划时,需要输入气象数据、物流计划、环境信息等多种数据,因此,需要在船端和岸基分别建立数据库作为数据传输、处理和存储的介质,并以此支撑船舶航行决策。控制算法是船舶智能航行功能实现的核心,为验证控制算法的效果与可靠性,需要建立船舶运动模型对船舶的运动状态进行描述。此外,船舶运动控制算法还需要借助硬件设备进行最终的命令执行,并接收船舶运动状态信息以即时对控制指令进行调整。

1.2 智能航行系统框架设计

构建功能完善的智能航行系统,需要在明确定义系统各具体组成模块的同时,确定各模块所具备的功能以及相互之间的联系。该系统将功能的实现过程分为感知、决策、控制、执行和反馈五大模块,系统框架设计如图1所示。感知与信息融合处理层负责监测在航船舶自身状态以及周围环境变化,融合岸基数据库传输的气象预报、物流计划等进行信息处理、存储,并将数据传输给决策层。决策层在收到数据后综合气象、物流规划、船舶状态等信息进行全局路径规划,并将全局路径传输给避碰路径决策模块。避碰路径决策模块在全局路径规划的基础上,结合船舶在航环境感知信息,判断是否需要避碰操作。如需采取避碰措施,则基于国际海上避碰规则进行避碰路径规划,并将规划路径传输给控制层。控制层根据航行任务场景,采用合适的控制方法对船舶进行控制,并将控制指令传递至执行层。在执行层通过 PLC 控制柜分别将控制信号发送给各驱动单元与对应的驱动装置进行控制以实现螺旋桨、舵以及艏侧推的动作。控制命令被执行后,船舶运动状态发生改变,变化情况被通过传感器等设备反馈至船舶感知模块。

感知与信息融合层的信号输入可分为船体自身监控信号、在航环境感知信号两部分,上述信号通过信号融合和预处理后存储在船端数据库。另一方面,岸基数据库发来的气象预报和物流计划信息通过卫星通信被传输至船端数据库并与船端信息进行汇总。

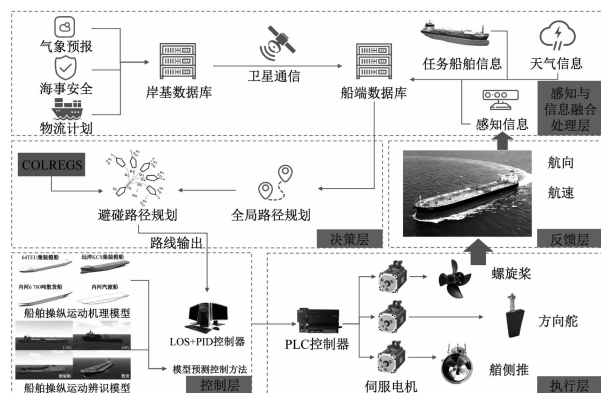


图1 货运船舶智能航行系统框架设计

Fig.1 Framework design of intelligent navigation system for cargo ships

在全局航线规划部分,基于传统的大圆航线,综合考虑海况、气象以及船舶自身操纵运动特点,建立了以最低航行总油耗为目标、总航行时间、船舶对水航速与主推进柴油机转速为限制条件的全局航线优化模型,利用粒子群优化算法对模型进行求解,从而求得全局最优航线,并得到推荐航速。在局部避碰路径规划层面,为实现动态避碰,采用动力学运动规划的方法,以生成符合船舶运动学与动力学的轨迹。在此基础上进行轨迹优化,从而生成能够满足避碰规则约束的轨迹,并进行实时在线规划,以实现动态避碰的目标。

在控制层面,结合船舶智能航行过程中航向、航迹、自主控制、自动避碰等多种控制策略的需要,设计系统的运动控制器。根据不同的海上航行环境,人为选择切换不同的控制策略,对于简单的航行场景,采用视线(Line Of Sight, LOS)导航获得期望航向角,根据航向角误差选择PID控制器操控船舶航行。当航行环境复杂、外界干扰较多时,采用基于预测模型的控制策略能够更加准确地跟踪期望的航迹。同时根据采用PID、MPC控制器运行的数据集建立安全集,通过迭代学习获得更优的控制输入,改善控制器性能,提高船舶航行的安全性。此外,根据模型预测控制及算法调试需求,首先通过经验公式获取水动力导数,建立MMG模型并进行Z型仿真试验,采用支持向量机方法通过仿真数据进行模型辨识,建立适用的船舶运动模型。

2 面向苏伊士运河航行场景的智能航行功能实现

主办方将苏伊士运河部分航段设置为虚拟航行比赛的场景,要求船模以给定初始航速从给定起点出发,途经弯曲无风航段、直线无风航段以及直线有

风航段,直至到达终点,比赛场景如图 2 所示。由于测试场景为虚拟场景,因此无法将感知技术和设备融入智能航行功能中,即不考虑障碍物检测功能;此外,根据苏伊士运河管理局制定的航行规则^[17],该场景下的船舶航行无需考虑避碰问题。因此,智能航行功能在该场景下的实现被简化。为实现该虚拟航行功能,基于提出的智能航行系统设计思路,需要为船舶进行路径规划、设计合适的控制算法并建立船舶运动模型进行数值仿真试验,最后与主办方虚拟测试平台进行连接并输出控制指令。

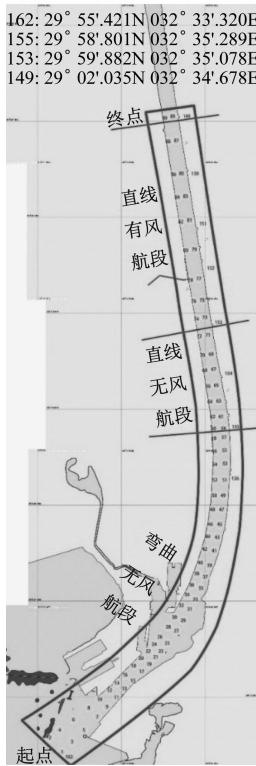


图 2 比赛场景
Fig. 2 The competition scene

2.1 航线规划

苏伊士运河总长为 192.5 km,运河深度为 21 m,最大允许船舶吃水 18.9 m,船舶过运河时采用单向成批编队发船和定点会船的办法。船舶通过运河必须严格遵照苏伊士运河管理局制定的航行规则。在设置的比赛场景中,对航道边界经纬度的描述已被给出,船舶的起点位置位于 1 号点和 2 号点的几何中心位置,终点位于 89 号点和 90 号点的几何中心位置,航程共计 7.1 n mile。根据赛题描述,船舶在该航行场景中的航行任务可以被视为不存在动态障碍物的路径跟踪(路径为航道几何中心线)问题。

在赛题中,船舶被设定为自南向北通过目标航道。对于内河弯曲河段而言,由于惯性离心力的影响,船舶过弯操纵存在困难,容易使船舶向凹岸横

移,导致落湾事故发生。因此,在原定的航道几何中心线基础上,航线被进一步优化以改善船身过弯姿态,提高航行安全性。综上,面向苏伊士运河航行场景下的规划航线为,对给定航道坐标中心点进行曲线拟合,再根据内河航行“挂高取矮”的航行经验对航道的曲线部分进行调整后得到的经验航线。

2.2 船舶运动模型与控制算法

作品基于赛方提供的目标船舶操纵性手册,提取特征参数后基于文献[18]中提出的针对内河船舶操纵运动建模框架建立了分离型的 MMG 模型,使用该模型作为控制器设计和控制效果验证的依据。以 20 600 TEU 集装箱船为对象,开展仿真试验,部分回转试验仿真结果如图 3 所示。

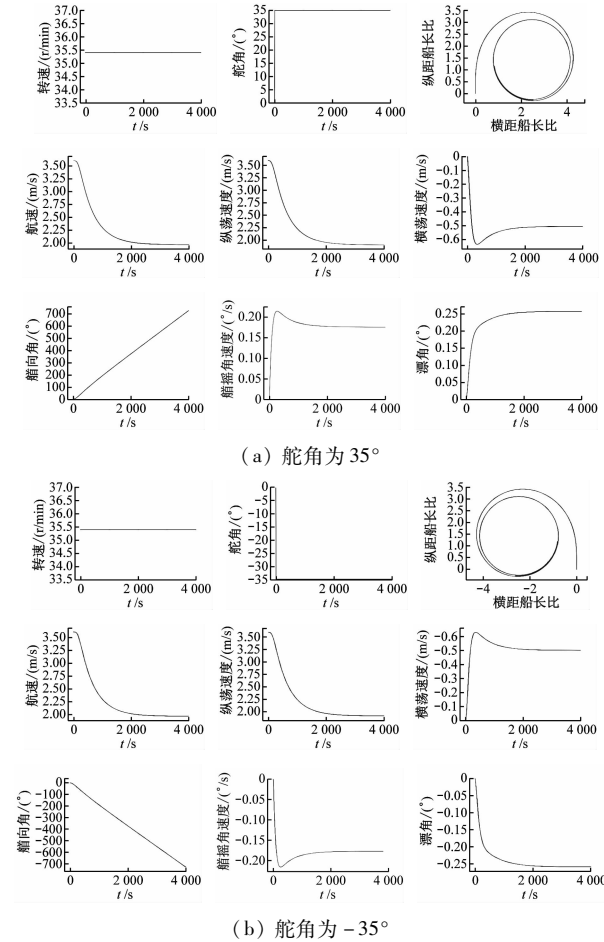


图 3 20 600 TEU 集装箱船回转试验仿真结果
Fig. 3 Simulation results of turning test of 20 600 TEU container ship

基于该模型以及参考路径,确定了系统控制的形式为 LOS 引导律和 PID 控制器相结合的方式。该形式可分为制导层和控制层两部分,依据 LOS 引导律将船舶的位置跟踪问题转化为航向控制问题,通过 PID 控制器,使得船舶的航向角收敛于期望航向角,从而使其不断驶向期望航向点,控制大型商船

完成从起点航行 3.8 n mile 的弯曲无风航段、1.0 n mile 的直线无风航段以及 2.3 n mile 的直线有风航段以到达终点。

通过离线仿真对相关参数进行调节,控制算法达到了预期的控制效果。针对比赛主办方提供的虚拟测试平台,使用 Python 语言开发了通信接口以实现控制指令的下达和反馈信息的获取;基于 PyQt 设计了交互界面,实时显示船舶运动状态与控制指令;并将轨迹与控制指令数据保存在本地 MySQL 数据库中。远程通信及交互界面如图 4 所示。

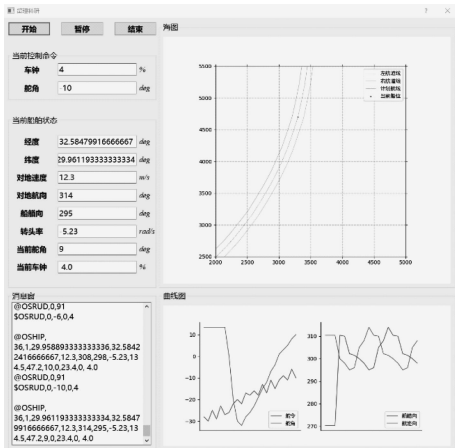


图 4 基于 Python 的远程通信与交互界面
Fig. 4 Remote communication and interaction interface base on Python

2.3 苏伊士运河船舶智能航行仿真系统

综合以上分析与方法设计,面向主办方设计的虚拟航行测试场景设计了苏伊士运河船舶智能航行仿真系统。系统整体架构如图 5 所示。首先,主办方提供的苏伊士运河虚拟航行场景获取被控船舶信息与航道信息,由航道信息生成初始航线后在考虑实际船舶操纵特点的基础上对船舶航线进行优化,所得到的优化航线为大地坐标系下的一组坐标点 $[(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)]$,将路径点坐标、接纳圆半径与船舶位置信息录入 LOS 算法器中求得 LOS 点和船舶目标路径方向角,再结合艏向计算出船舶相对艏向角,通过 PID 控制器求解出舵角后输入船舶运动模型获取反馈数据,并对 PID 控制器参数进行调节。在比赛时,由 PID 控制器计算出的舵角将被发送至虚拟测试平台服务器,并以服务器发回的船舶信息作为反馈输入至 LOS 算法器中进行控制。

3 比赛结果分析

在正式比赛前对控制算法进行了调试,将系统

与主办方的虚拟测试平台连接并进行了测试,如图 6 所示。在正式比赛过程中,所设计的控制算法表现出了良好的控制效果,在确保航行安全的前提下,顺利完成了既定的航行任务。

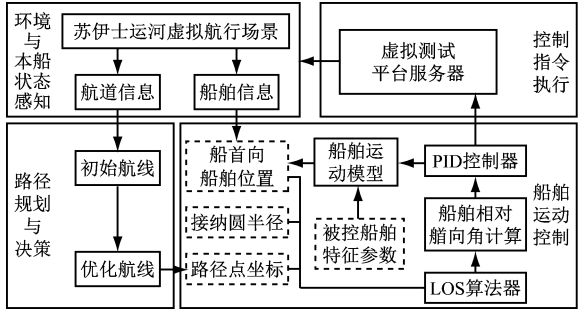


图 5 苏伊士运河船舶智能航行仿真系统
Fig. 5 Suez canal ship intelligent navigation simulation system

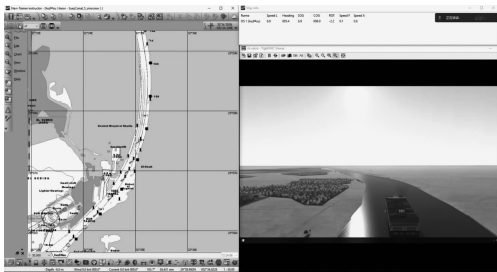


图 6 智能航行系统测试
Fig. 6 Test of intelligent navigation system

3.1 路径跟踪效果分析

根据主办方返回的赛后数据,在测试过程中,船舶的航行轨迹与航道中心线保持高度重合,表现出了良好的轨迹跟踪性能。如图 7 所示,船舶平均路径跟踪误差 6.234 8 m,东、西岸最小船岸距分别为 133.552 0 m、77.934 1 m。船舶在狭窄弯道航行的过程中姿态稳定,未大幅度偏离航道,通航过程顺利。

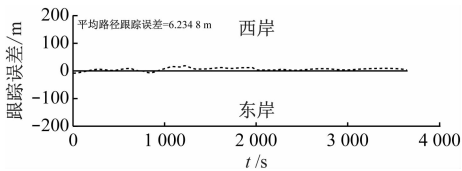


图 7 路径跟踪误差
Fig. 7 Path tracking error

3.2 舵角与航向、艏向控制

舵角控制和船舶航向、艏向控制结果分别如图 8 和图 9 所示。在船舶通航过程中,舵角范围被限定在 $\pm 35^\circ$ 之间,该舵角限制符合常规桨舵船舶的实际操舵限制。实际操作时最大右舵 6° ,最大左舵 11° ,舵角穿零次数两次,航向与艏向控制较为稳定,无摇摆震荡。

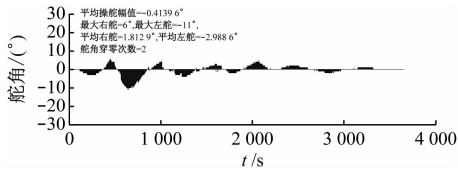


图8 舵角输入

Fig. 8 Rudder angle input

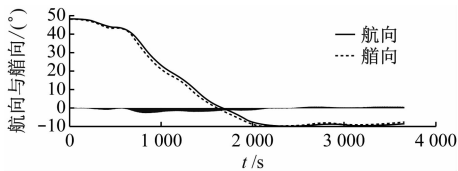


图9 船舶航向与艏向控制效果

Fig. 9 Control effect of course angle and heading angle

4 结束语

智能航行技术是未来船舶发展的重要方向,主办方以苏伊士运河大型商船搁浅事件为参考设置比赛场景,从现实中提出问题,积极引导智能航行技术的探索与应用,有效推动了智能化航行技术的研究与发展。在参赛过程中,如何构建功能完善且可靠的船舶智能航行系统是比赛的核心问题。在主办方记录的数据中,控制算法输出的小、微舵令与频繁操舵,是本次比赛各参赛队伍遇到的共同问题。在实际的航行过程中,由舵机控制的舵角既没有办法执行精确的小舵角,也无法频繁的执行操舵指令。因此,在智能航行系统中应设置更为合适的限制条件对控制指令进行判断和过滤。总结设计智能航行系统的过程,可得出以下结论:

- 1) 在设计一套具有完整功能的智能航行系统时,需要明确内部各模块的分工;分析内部各模块之间的交互关系,以及各模块与外界环境的联系。
- 2) 由于感知、决策以及控制算法分析都是建立在抽象和理想化的数学模型的基础上,输出结果不能直接应用于船舶,需要充分考虑环境因素和设备操作工况的限制。
- 3) 面向实船设计的智能航行系统,应在各功能模块中给予人足够的信息透明度和操控权,以保障航行安全。

此外,受限于测试场景,本文缺少对障碍物检测、航行避让决策等功能的应用与验证,这些功能对于实际的船舶智能航行系统而言也十分重要。未来研究工作将致力于在虚拟仿真场景中实现感知信息的交互,以使所设计的智能航行系统具有更强的泛化应用能力。

参 考 文 献

[1] MUNIN Project. Research in maritime autonomous systems project results and technology potentials [EB/OL]. [2022-6-5]. <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>.

[2] ROLLS-ROYCE. Advanced autonomous waterborne applications initiative [EB/OL]. [2022-6-5]. <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/12%20-%20AAWA%20Coordinator.pdf>.

[3] Korea Autonomous Surface Ship Project Office. Development of autonomous ship technology [EB/OL]. [2022-6-5]. <http://kassproject.org/en/info/projectoutline.php>.

[4] 潇湘晨报. 中国首艘!“智飞”号自主航行集装箱商船在青岛交付. [EB/OL]. [2022-6-5]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1731173224911081817&wfr=baike>. Xiaoxiang Morning Herald. China's first self-sailing ship! The "Zhifei" container merchant ship was delivered in Qingdao. [EB/OL]. (2022-4-26) [2022-6-5]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1731173224911081817&wfr=baike>. (in Chinese)

[5] Nippon Foundation. The Nippon Foundation MEGURI2040 fully autonomous ship program. [EB/OL]. [2022-6-5] <https://www.nippon-foundation.or.jp/en/what/projects/meguri2040>

[6] 严新平,刘佳仑,范爱龙,等. 智能船舶技术与趋势综述 [J]. 船舶工程,2020,42(3):15-20. YAN X P, LIU J L, FAN A L, et al. Development and trend of intelligent ship technology [J]. Ship Engineering, 2020,42(3):15-20. (in Chinese)

[7] 马吉林,谢朔. 船舶智能航行及关键技术最新发展 [J]. 中国船检,2020(11):52-58. MA J L, XIE S. The latest development of ship intelligent navigation and key technologies [J]. China Ship Survey,2020(11):52-58. (in Chinese)

[8] 张宝晨,张英俊,王绪明,等. 基于船岸协同的船舶智能航行与控制关键技术研究 [J]. 中国基础科学,2021,23(2):44-51. ZHANG B C, ZHANG Y J, WANG X M, et al. Key technologies of ship intelligent navigation and control based on ship-shore cooperation [J]. China Basic Science, 2021,23(2):44-51. (in Chinese)

[9] 张操. 无人水面船运动控制体系结构及航迹跟踪控制方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014. ZHANG C. Research on motion control system architecture and tracking control of unmanned surface vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. (in Chinese)

[10] 贾宇,艾维. 无人艇智能航路规划系统研究 [J]. 舰船科学技术,2021,43(5):115-119. JIA Y, AI W. Research on intelligent route planning system based on unmanned surface vehicle [J]. Ship

- Science and Technology, 2021, 43 (5): 115-119. (in Chinese)
- [11] 刘佳仑, 杨帆, 马枫, 等. 智能船舶航行功能测试验证的方法体系[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 45-50.
LIU J L, YANG F, MA F, et al. Method system of navigation function test and verification for intelligent ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16 (1): 45-50. (in Chinese)
- [12] 沈海青, 李铁山, 郭晨, 等. 船舶自动舵算法测试仿真系统[J]. 中国航海, 2015, 38(4): 1-5.
SHEN H Q, LI T S, GUO C, et al. Simulation system for testing marine autopilot control algorithm [J]. Navigation of China, 2015, 38(4): 1-5. (in Chinese)
- [13] 张国庆, 张显库. 船舶自动舵控制算法仿真测试平台[J]. 中国航海, 2013, 36(2): 1-5.
ZHANG G Q, ZHANG X K. Simulation platform for testing marine autopilot control algorithm[J]. Navigation of China, 2013, 36(2): 1-5. (in Chinese)
- [14] 秦有成. 基于 ROS 的智能航行系统仿真平台设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
QIN Y C. Design of simulation platform for intelligent navigation system based on ROS[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] 严新平, 吴超, 马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计[J]. 中国航海, 2017, 40(4): 95-98.
YAN X P, WU C, MA F. Conceptual design of Navigation Brain System for intelligent cargo ship [J]. Navigation of China, 2017, 40 (4): 95-98. (in Chinese)
- [16] International Maritime Organization. IMO takes first steps to address autonomous ships [EB/OL]. [2022-6-5]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MSC-99-MASS-scoping.aspx>
- [17] 林德辉, 王云, 沈宏旻. 苏伊士运河及其航行规则简介[J]. 船舶标准化与质量, 2008(2): 4.
LIN D H, WANG Y, SHEN H M. Suez Canal and its navigation rules [J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2008(2): 4. (in Chinese)
- [18] LIU J L, HEKKENBERG R, QUADVLIEG F, HOPMAN H, ZHAO B Q. An integrated empirical manoeuvring model for inland vessels [J]. Ocean Engineering, 2017, 137 (Jun. 1): 287-308.

(上接第 147 页)

- [10] DU M, CHEN J, ZHAO P, et al. An improved RRT-based motion planner for autonomous vehicle in cluttered environments [C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014: 4674-4679.
- [11] TRAN N, PRODAN I, GRTLI E I, et al. Safe navigation in a coastal environment of multiple surface vehicles under uncertainties: a combined use of potential field constructions and NMPC[J]. Ocean Engineering, 2020, 216(23): 107706.
- [12] KARAMAN S, FRAZZOLI E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning [J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30 (7): 846-894.
- [13] JAUWAIRIA N, FAHAD I, USMAN M, et al. RRT*-smart: a rapid convergence implementation of RRT* [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(7).
- [14] GAMMELL J D, SRINIVASA S S, BARFOOT T D. Informed RRT*: optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic: IEEE, 10. 1109/IROS. 2014. 6942976 [P]. 2014.
- [15] JORDAN M, PEREZ A. Optimal bidirectional rapidly-exploring random trees, MIT-CSAIL-TR-2013-021 [R]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [16] JAUWAIRIA N, FAHAD I, USMAN M, et al. RRT-smart: rapid convergence implementation of RRT towards optimal solution [C]//Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on. IEEE, 2012.
- [17] ELBANHAWI M, SIMIC M. Continuous-curvature bounded trajectory planning using parametric splines [J]. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2014, 262.
- [18] 曾德全, 余卓平, 张培志, 等. 三次 B 样条曲线的无人车避障轨迹规划[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(S1): 159-163.
ZENG D Q, YU Z P, ZHANG P Z, et al. Cubic B-spline curve for obstacle avoidance trajectory planning of unmanned vehicle [J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2019, 47 (S1): 159-163. (in Chinese)