

基于改进积分视线制导律的船舶路径跟踪控制

段载誉¹, 韩冰^{1,2}, 陈宇航^{1,3}, 林昀和¹

(1. 上海船舶运输科学研究所有限公司 智能船舶研发与应用事业部, 上海 200135;

2. 闽江学院 物理与电子信息学院, 福建 福州 350108;

3. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: 针对船舶自主航行和船舶航迹高精度控制的需求, 在积分视线算法基础上提出一种划分积分区域的模糊控制方法用于自主航行船舶的路径跟踪控制。在建立船舶运动模型的基础上, 使用扩展卡尔曼滤波器通过位置信息实现了船舶速度、航向等状态的估计; 针对不同航行工况设计模糊控制器对前视距离参数进行动态调整以提高跟踪性能。以中远海运集团建造的 700 TEU 电池动力集装箱船为控制对象, 在仿真平台进行路径跟踪试验, 并与不同算法的跟踪结果进行比较。仿真结果表明, 所提出的控制算法具有更好的跟踪性能, 且对舵角的操控更为平滑, 可为自主航行船舶的路径跟踪控制提供参考。

关键词: 路径跟踪; 积分视线制导律; 模糊控制; 扩展卡尔曼滤波; 船舶运动模型

中图分类号: U675.91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.020

Ship path following control based on improved integral line-of-sight guidance law

DUAN Zaiyu¹, HAN Bing^{1,2}, CHEN Yuhang^{1,3}, LIN Yunhe¹

(1. Intelligent Ship Research and Application Division, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200135, China; 2. College of Physics & Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Addressing the requirements for ship's autonomous navigation and high-precision path following control, this paper proposes a fuzzy control method with partitioned integral regions based on the Integral Line-of-Sight (ILOS) guidance law for path following control of autonomous navigation ships. Based on the established ship motion model, an extended Kalman filter is employed to estimate ship states such as speed and heading using GNSS measurement data. Fuzzy controllers are designed to dynamically adjust the look-ahead distance parameter according to different navigation conditions, thereby improving tracking performance. The 700 Twenty-foot Equivalent Unit (TEU) battery-powered container ship built by COSCO Shipping Group is taken as the plant for path following experiments on a simulation platform. Comparative analyses with results from different algorithms show that the proposed control algorithm achieves superior performance and smoother rudder manipulation. This method can provide reference for path following control of autonomous navigation ships.

Key words: path following; integral line-of-sight guidance law; fuzzy control; extended Kalman filter; ship motion model

收稿日期: 2024-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2807004); 福建省自然科学基金项目(2022J011128); 上海市科技计划资助项目(23XD1431000)

作者简介: 段载誉(1999—), 男, 硕士, 研究方向为船舶自动控制。E-mail: duanzaiyu1999@outlook.com

通信作者: 韩冰(1981—), 男, 研究员, 研究方向为船舶自动控制。E-mail: han.bing@coscoshipping.com

引用格式: 段载誉, 韩冰, 陈宇航, 等. 基于改进积分视线制导律的船舶路径跟踪控制[J]. 中国航海, 2025, 48(3): 166-175.

DUAN Z Y, HAN B, CHEN Y H, et al. Ship path following control based on improved integral line-of-sight guidance law[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 166-175. (in Chinese)

水路运输因其成本低、运量大等特点,在货物运输中处于不可替代的地位^[1],水路运输中的主力集装箱船等大型船舶为了适应持续增长的贸易需求,不断地向着数字化、自主化、智能化方向发展^[2]。船舶自主航行技术是智能船舶最具代表性的功能,也是航运技术未来的发展趋势。智能船舶实现自主航行需要完善的技术体系作为支撑^[3],自主航行技术需要根据船舶当前的位置,控制推进动力装置,使船舶沿预定的航线航行,因此船舶路径跟踪技术是实现船舶自主航行的关键,具有重要的研究意义^[4]。

在船舶运动仿真方面,有多种方法可用来建立船舶运动模型。FOSSSEN^[5]使用一阶 Nomoto 模型来表示船舶的运动。Nomoto 模型也被称为响应型数学模型,可通过该模型在船舶机动性测试数据的基础上建立船舶运动系统输入输出的响应关系^[6]。这种形式的模型对船舶运动进行了降阶或简化处理,不包含船舶本身的物理特性,而是一种适合于设计控制器的模型。SONG 等^[7]采用 Abkowitz 所提出的整体型模型 (Abkowitz 模型) 来描述船舶的运动。该模型将船舶视为一个整体,并通过泰勒展开将作用于船舶整体的水动力展开为三阶的泰勒级数^[8]。这种泰勒级数展开式的建模方法对于船舶运动的描述具有很高的精确度,但是模型中包含大量的未知水动力导数,这些导数的求取通常需要依赖船模平面运动机构试验的结果。SANDEEPMAR 等^[9]使用船舶操纵运动数学模型研讨小组 (Ship Maneuvering Mathematical Model Group, MMG) 的分离型建模方法建立了 KVLCC2 油轮的 3 自由度船舶模型。与 Abkowitz 模型相比该模型对船体、螺旋桨和船舵分别建模,同时计算各个部位产生的流体动力^[10]。此外,很多研究者通过大量的试验总结出计算经验公式,通过经验公式计算模型中的未知参数,可以大大减少建模过程对船舶水池试验的依赖。QU 等^[11]使用了一种由状态空间表示的船舶运动模型,该建模方式由 FOSSSEN 提出。该模型将系统的对称性、偏斜对称性和矩阵的正定性等特性纳入到稳定性分析中,有利于控制器的设计,同时状态空间方程来自船舶的刚体和水动力特性,也可以体现船舶的物理特性^[12]。

近年来很多控制方法已经应用于船舶路径跟踪控制,郭杰等^[13]设计了基于多模态快速非奇异终端滑模的自抗扰控制器,并以大连海事大学“育龙”号为对象进行仿真试验,控制器能快速、准确地跟踪期望直线和曲线路径。谭聪等^[14]将输出重定义方法

和扩张状态观测与动态逆控制方法相结合来设计欠驱动船舶航迹跟踪控制律,并考虑到了未知时变外部干扰和参数摄动问题。祝亢等^[15]在视线 (Line-of-Sight, LOS) 算法的基础上引入深度强化学习技术来应对复杂的控制环境,使用一艘 7 m KVLCC2 船模进行测试,针对变化的航迹有很好的跟踪效果。REN 等^[16]提出了一种时间尺度分解方法来解决路径跟随中的舵滚稳定控制问题来使路径跟随性能更稳定、更平滑。HUANG 等^[17]提出了一种使用内部模型控制的观测器,用于快速估计视线制导法中的侧滑角,并证明了所提出的侧滑角观测器在提高路径跟随精度方面的功效。GHOMMAM 等^[18]针对船舶模型不确定性和干扰不确定性,对未建模的船舶动力学和环境扰动信息设计了一种模糊自适应观测器,仅使用全局位置信息和方位角的局部测量进行准确的状态估计。WANG 等^[19]在视线算法中引入天线突变甲虫群预测学习算法,通过优化算法解决船舶参数不确定问题,并以一艘 64 TEU 集装箱船为对象进行了仿真验证。章沪淦等^[20]使用径向基神经网络与滑模控制结合的方法,以“育龙”号为控制对象,在风浪流的干扰下可以很好地逼近总未知项,实现航迹跟踪。刘训文等^[21]引入自适应神经网络和事件触发控制技术,通过事件触发控制技术来减少执行器的物理损伤。国内外学者在对船舶路径跟踪的研究中,经常使用简化的响应型模型,而实际的船舶具有很强的内外不确定性^[22],响应型模型不能准确地反映船舶实际航行情况。同时,设计控制算法时对于控制输入的处理也使用理想化的方式,将理论值当成船舶实际的控制输入,不符合实际工程实践。现实中船舶的操纵会受到实际物理条件的约束,在航行过程中船舶的舵角和螺旋桨的转速都受到一定的限制,常规操纵下的船舶不会使用大舵角进行转向,也不会频繁打舵。除此之外,多数研究对于跟踪算法的改进都集中于抗干扰能力的提升,而忽视了船舶本身在不同航行工况下的操纵特点对跟踪性能的影响,比如船舶在曲线或是回转工况下,在直线路径上表现良好的算法会遇到超调量增加、偏差振荡等问题,导致跟踪效果变差。

本文以中远海运集团建造的 700 TEU 电池动力集装箱船为控制对象,通过扩展卡尔曼滤波算法使用全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 提供的位置信息实现了对地航速、航向等状态的准确估计。进而设计了划分积分区域的模糊控制可变前视距离的积分视线 (Integral Line-of-Sight, ILOS) 算法,并针对不同航行工况对模糊规

则进行细化区分,结合比例-微分(Proportion Differentiation, PD)控制器控制舵角使其在直线、曲线和回转路径上都有良好的跟踪效果。最后,通过各种条件下的仿真试验对比验证了本文所提控制算法的有效性。算法的控制性能好、转向频率低、鲁棒性强,对船舶实现自主航行具有重要意义。

1 船舶运动模型

本文以中远海运集团建造的700 TEU 电池动力集装箱船为仿真对象,考虑船舶航行中纵荡、横荡和艏摇这三个自由度建立船舶运动数学模型,目标船采用双机双桨双舵设计,船舶参数见表1。

表1 船舶参数

Tab.1 Ship parameters

参数	数值
船长/m	119.8
作业吃水/m	5.5
船舶排水量/kg	12 600 000
舵面积/m ²	13.02
桨直径/m	2.8
型宽/m	23.6
方形系数	0.835
型深/m	9
舵展弦比	1.355
推进电机功率/kW	900

本文采用MMG分离型建模方法建立仿真模型,模型的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \varphi + v \sin \varphi \\ \dot{y} = u \sin \varphi + v \cos \varphi \\ \dot{\varphi} = r \end{cases} \quad (1)$$

式中:(x, y)为船舶在东北坐标系下的位置; φ 为艏向角;(u, v, r)分别表示船舶在船体坐标系下的纵荡速度、横荡速度和艏摇速度。

模型的动力学方程为

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y)vr = X \\ (m + m_y) \dot{v} - (m + m_x)ur = Y \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} = N \\ T\dot{\delta} + \delta = K\delta_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: X, Y, N 分别为船体纵向受力、横向受力和转舵力矩; m 为船舶质量; I_{zz} 为船舶绕轴惯性矩; m_x, m_y, J_{zz} 为三方向上的附加质量和惯性矩; δ_c 为控制器输出的指令舵角; δ 为当前舵角, $\delta \leq \pm 35^\circ$; $\dot{\delta} \leq$

$1.75(^{\circ})/s$; K 为响应增益; T 为时间常数。

$$\begin{cases} X = X_H + X_P + X_R + X_W + X_C \\ Y = Y_H + Y_P + Y_R + Y_W + Y_C \\ N = N_H + N_P + N_R + N_W + N_C \end{cases} \quad (3)$$

式中:下标H、P、R、W、C分别代表船体、桨、舵、风、流,以表示其对船舶产生的作用力和力矩。

使用前人总结的经验公式基于船舶参数计算作用于船体上的流体力 and 力矩^[23],公式为

$$\begin{cases} X_H = X(u) + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_H = Y_vv + Y_r r + Y_{|v|v}|v|v + Y_{|v|r}|v|r + Y_{|r|r}|r|r \\ N_H = N_vv + N_r r + N_{|v|v}|v|v + N_{vrr}v^2r + N_{vrr}vr^2 \end{cases} \quad (4)$$

使用经验公式计算的水动力参数值见表2。

表2 水动力参数

Tab.2 Hydrodynamic parameters

参数	数值
X_{vv}	-0.051 9
X_{vr}	-1.310 7 × 10 ⁶
X_{rr}	-0.065
Y_v	-0.350 9
Y_r	-0.039 9
$Y_{ v v}$	-0.193 7
$Y_{ v r}$	-0.329 9
$Y_{ r r}$	-0.012 6
N_v	-0.073 7
N_r	-0.044 3
$N_{ v v}$	-0.011 2
N_{vrr}	-0.287 9
N_{vrr}	-0.056 2

考虑到集装箱船等中大型船舶在正常航行时,主机-螺旋桨转速为定值,本文仿真模型将螺旋桨转速设为定值,通过操控转舵来对船舶进行控制,使用一阶惯性环节来表示舵机特性^[24],由转舵带来的力和力矩为

$$\begin{cases} X_R = (1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R = (1 + \alpha_H)F_N \cos \delta \\ N_R = (x_R + \alpha_H x_H)F_N \cos \delta \end{cases} \quad (5)$$

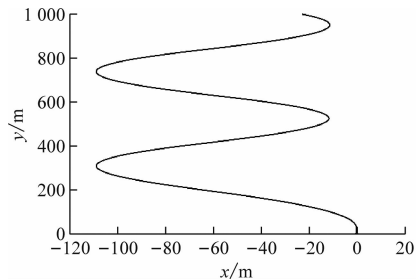
式中: F_N 为舵正压力; x_R 为舵作用力点的纵向距离; x_H 为操舵诱导船体横向力作用点到重心距离; t_R 为舵阻力减额系数; α_H 为舵力修正因子。风力和流及其力矩的计算公式为

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ N_w \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho_a v_w^2 \begin{bmatrix} C_x(\theta_w) A_{Fw} \\ C_y(\theta_w) A_{Lw} \\ C_N(\theta_w) A_{Fw} L \end{bmatrix} \quad (6)$$

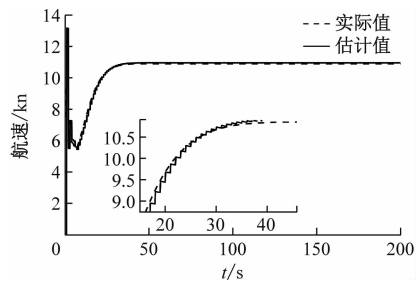
$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ N_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho L d v_c^2 \begin{bmatrix} C_x(\theta_c) \\ C_y(\theta_c) \\ C_N(\theta_c) L \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: v_w 和 v_c 分别为风速和流速; θ_w 和 θ_c 分别为风向角和流向角; ρ_a 和 ρ 分别为空气和水的密度; L 为船长; d 是船舶吃水; A_{Fw} 和 A_{Lw} 分别为船体水上正面和侧面的面积; $C_x(\theta_w)$ 、 $C_y(\theta_w)$ 、 $C_N(\theta_w)$ 、 $C_x(\theta_c)$ 、 $C_y(\theta_c)$ 、 $C_N(\theta_c)$ 为通过试验测定的三个维度的风压力和流压力系数。

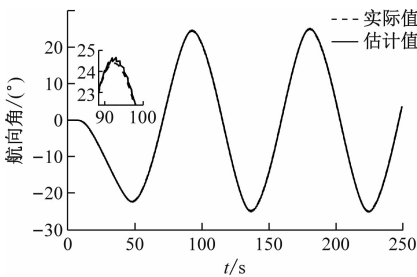
在静水环境下船舶以 12 kn(约 6 m/s) 的初速度航行,进行 20°/20°Z 形试验和旋回试验,来测试仿真模型的可用性,同时在测试中使用扩展卡尔曼算法来对船舶运动状态进行估计。在 20°/20°Z 形试验中,船舶进行 20°/20°Z 形运动。仿真测试结果如图 1 所示,第一超越角约为 4.5°,第二超越角约为 4.3°,模型可以较好地仿真实际船舶运动,并对船舶运动状态进行准确估计。



(a) 运动路径



(b) 航速估计

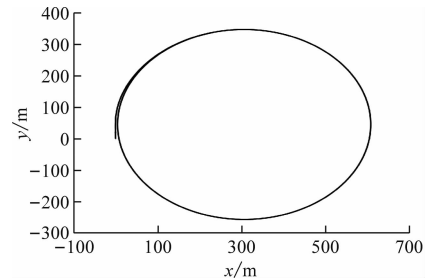


(c) 航向估计

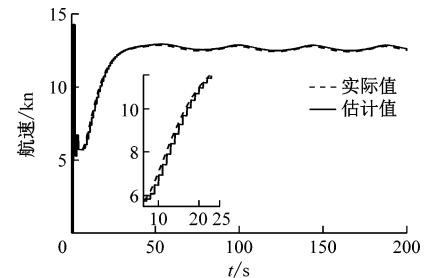
图1 Z形操纵仿真试验

Fig. 1 The Z maneuver simulation test

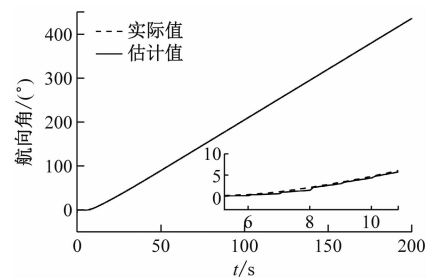
在旋回试验中,船舶仿真模型以 35° 最大舵角进行旋回运动,测试记录回转过程中船舶位置和航速以及艏向角的变化情况,同时扩展卡尔曼滤波器通过船舶位置信息对船舶运动状态进行估计。仿真测试结果如图 2 所示,船舶进距为 323 m,小于 3 倍的船长(L_{pp}),船舶旋回初径为 616 m,小于 6 倍船长,扩展卡尔曼滤波器可以对船舶航速和航向进行准确的估计。



(a) 运动路径



(b) 航速估计



(c) 航向估计

图2 旋回仿真试验

Fig. 2 The turning circle simulation test

2 控制系统设计

控制系统基本框图如图 3 所示,船上安装有 GNSS,可以动态地获取船舶实时位置并通过扩展卡尔曼滤波器对船舶状态进行估计,模糊控制器可改变 ILOS 法的前视距离。根据提前设置的路径点与船舶实时位置计算出期望航向,然后通过 PD 控制器来控制船舶舵机转动从而控制船舶跟随预定路径。

2.1 ILOS 原理

ILOS 法基本原理如图 4 所示。

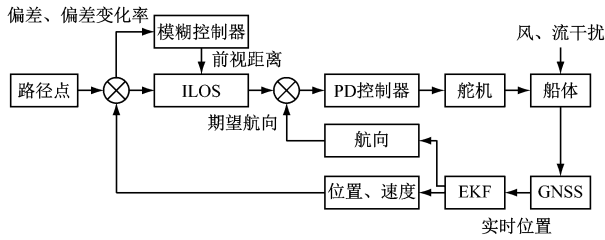


图3 控制系统基本框图

Fig. 3 Basic block diagram of control system

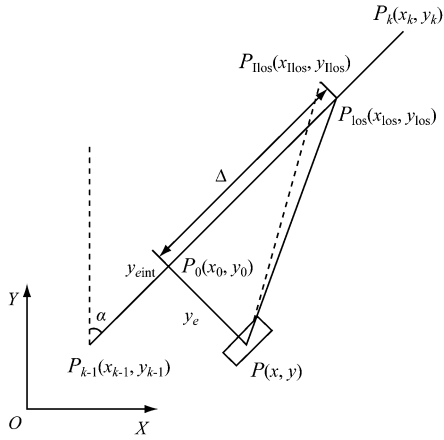


图4 ILOS原理

Fig. 4 Integral line-of-sight illustration

假设下一个船舶航路路径点为点 $P_k(x_k, y_k)$ ，上一个航路点为点 $P_{k-1}(x_{k-1}, y_{k-1})$ ，两点之间为需要跟随的直线路径，点 $P(x, y)$ 为船舶当前的位置，点 $P_0(x_0, y_0)$ 为点 P 在直线路径上的投影点， Δ 为 ILOS 前视距离参数， $P_{los}(x_{los}, y_{los})$ 为 LOS 算法在当前路径上的期望点， $P_{ILOS}(x_{ILOS}, y_{ILOS})$ 为添加了积分项后，即 ILOS 算法在当前路径上的期望点。当前直线路径的方向角

$$\alpha = \arctan2\left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}\right) \quad (8)$$

船舶当前位置到直线路径的横向误差

$$y_e = -(x - x_k) \sin \alpha + (y - y_k) \cos \alpha \quad (9)$$

不同算法对期望航向的计算方式如表 3 所示， κ 为积分项设计参数， $k > 0$ ； U 为船舶航行速度。

ILOS 算法可以将路径跟踪问题转化为对期望航向的跟踪问题。而在路径跟踪的开始阶段，船舶与既定路径之间的偏差较大，累计的较大误差容易造成积分饱和现象并产生较大过冲，为防止积分项饱和，依据横向偏差 y_e 的大小，在 Lekkas 提出的 ILOS 算法基础上划分积分使用区域，综合使用 ILOS 和 LOS 算法^[25]，如图 5 所示。当 $y_e < L_{pp}$ 时，使用 ILOS 算法；当 $y_e \geq L_{pp}$ 时，使用 LOS 算法。这样可使船舶能尽快接近期望路径，并能抵消环境干扰的影响。

表 3 不同算法对期望航向的计算

Tab. 3 Calculation of desired heading by different algorithms

算法	表达式
传统 LOS ^[26]	$\chi = \alpha - \arctan2\left(\frac{y_e}{\Delta}\right)$
Borhaug's ILOS ^[27]	$\chi = \alpha - \arctan2\left(\frac{y_e + \kappa y_{eint}}{\Delta}\right)$ $\dot{y}_{eint} = \frac{\Delta y_e}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \kappa y_{eint})^2}}$
Lekkas's ILOS ^[28]	$\chi = \alpha - \arctan2\left(\frac{y_e + \kappa y_{eint}}{\Delta}\right)$ $\dot{y}_{eint} = \frac{U y_e}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \kappa y_{eint})^2}}$

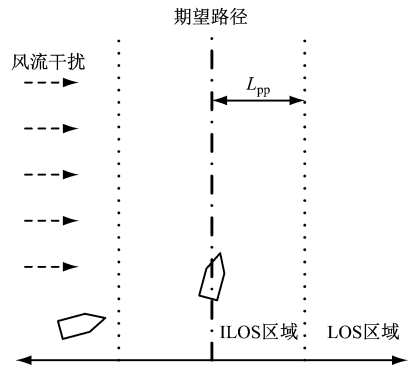


图5 区域示意

Fig. 5 Area schematic diagram

2.2 基于模糊规则的前视距离选择方法

ILOS 算法的跟踪性能与前视距离 Δ 参数有关， Δ 较大时船舶的转向会更加平稳但收敛的速度较慢； Δ 较小时，船舶的转向会更加激进，但是会容易产生振荡，所以灵活地设计前视距离 Δ 有助于船舶更快地收敛到期望路径并减少振荡。模糊控制器利用模糊规则对 ILOS 算法的前视距离参数进行动态调整，根据偏差值 e 和偏差的变化率 de ，自适应调整 ILOS 算法的前视距离 Δ ，使船舶能够平稳地接近期望路径。

首先将 e 和 de 定义为模糊集合上的论域， $e = [-50, 50]$ ， $de = [-0.3, 0.3]$ ， $\Delta = [100, 300]$ 。然后定义其模糊子集， $e = [\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}]$ ， $de = [\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}]$ ， $\Delta = [\text{PVS}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}]$ ；隶属函数选用高斯隶属函数。解模糊方法使用加权平均法，公式为

$$u = \left(\sum_{i=1}^N w_i z_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N w_i \right) \quad (10)$$

式中： N 为规则数； w_i 为各规则的权重； z_i 为模糊子集元素值； u 为输出的精确值。

设计模糊规则时,本文根据不同航行工况下的特性来对模糊规则进行细化区分。在直线工况下,船舶从较远的位置向着预定直线路径靠拢并跟随,模糊控制器通过 e 和 de 来判断船舶的运动趋势,当船舶运动趋势远离路径时,减小前视距离 Δ ,促使船舶加快转向;当船舶运动趋势靠近路径时,增大前视距离 Δ ,以减小超调量。在曲线工况下,船舶艏向会有多次较大的偏转,而船舶在转向时会因为漂角的存在导致横向偏差变大。为了抵消转弯漂角的影响,需要使用更小的前视距离 Δ ,来使船舶更加积极转向,以此来抵消转弯时增大的偏差。在回转工况下,船舶的艏向会发生持续性的变化,此时由于环境干扰会发生周期性变化,从而导致 e 也会发生周期性变化,导致偏差难以收敛。因此在回转工况下的模糊规则制定中通过 de 来判断船舶所受干扰的大小,并动态地调整前视距离 Δ ,以此来抵消环境干扰的变化。最后形成的模糊规则表见表4~表6。

表4 直线工况模糊规则

Tab.4 Components of fuzzy rules for the line condition

de	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PVS	PS	PS	PM	PB	PM	PVS
NS	PVS	PS	PM	PB	PM	PS	PVS
ZO	PVS	PM	PS	PB	PM	PS	PVS
PS	PVS	PS	PM	PB	PM	PS	PVS
PB	PVS	PM	PB	PM	PS	PVS	PVS

表5 曲线工况模糊规则

Tab.5 Components of fuzzy rules for the curvilinear condition

de	e						
	PVS	PVS	PVS	PS	PVS	PVS	PVS
NB	PVS	PS	PM	PM	PM	PS	PVS
NS	PVS	PM	PS	PB	PM	PS	PVS
ZO	PVS	PS	PM	PM	PM	PS	PVS
PS	PVS	PVS	PVS	PS	PVS	PVS	PVS
PB	PVS	PVS	PVS	PS	PVS	PVS	PVS

2.3 扩展卡尔曼滤波算法

在航海实践中,控制算法需要获得船舶航行速度与航向等数据来对船舶进行控制,而这些信息难以测量或者需要昂贵的传感器。为了获得船舶航行时对地速度与航向等数据的准确估计,提升算法的

表6 回转工况曲线规则

Tab.6 Components of fuzzy rules for the rotation condition

de	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PVS	PVS	PS	PS	PB	PM	PVS
NS	PVS	PS	PM	PM	PM	PS	PVS
ZO	PVS	PS	PS	PB	PS	PS	PVS
PS	PVS	PS	PM	PM	PM	PS	PVS
PB	PVS	PM	PB	PS	PS	PVS	PVS

鲁棒性和抗干扰能力,本文设计一种5状态扩展卡尔曼滤波算法,通过GNSS的位置信息来估计船舶的速度、航向等状态。沿着路径航行的船舶可以使用2D目标跟踪模型进行建模^[29]。根据对AIS数据的分析,航行过程中船舶的加速度很小,在短时间内航速几乎是恒定的^[30]。航行时的航速 U 可以使用恒速度模型建模。此外,航行时的航向角 χ 可以使用恒角速度模型建模。所以,沿着路径航行时的船舶运动模型如下^[31]:

$$\begin{cases} \dot{x}^n = U \cos(\chi) \\ \dot{y}^n = U \sin(\chi) \\ \dot{U} = -\alpha_1 U + \omega_1 \\ \dot{\chi} = \omega_\chi \\ \dot{\omega}_\chi = -\alpha_2 \omega_\chi + \omega_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: (x^n, y^n) 为北东坐标系下船舶位置; ω_1 和 ω_2 为过程高斯白噪声; α_1, α_2 分别为两个 Singer 模型参数^[32], 用以确保 U, ω_χ 在定位过程中收敛。基于运动模型的扩展卡尔曼滤波算法^[33]如下:

① 初始化状态向量与协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{x}}^- [0] = \mathbf{x}_0 \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{P}}^- [0] = \mathbf{E}[(\mathbf{x}[0] - \hat{\mathbf{x}}^- [0])(\mathbf{x}[0] - \hat{\mathbf{x}}^- [0])^T] = \mathbf{P}_0 \quad (13)$$

② 计算增益矩阵:

$$\mathbf{K}[k] = \hat{\mathbf{P}}^- [k] \mathbf{C}_d^T [k] (\mathbf{C}_d [k] \hat{\mathbf{P}}^- [k] \mathbf{C}_d^T [k] + \mathbf{R}_d [k])^{-1} \quad (14)$$

③ 预测状态值:

$$\hat{\mathbf{x}}^- [k+1] = \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{x}} [k] + \mathbf{B}_d \mathbf{u} [k] \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{P}}^- [k+1] = \mathbf{A}_d \hat{\mathbf{P}} [k] \mathbf{A}_d^T + \mathbf{E}_d \mathbf{Q}_d [k] \mathbf{E}_d^T \quad (16)$$

④ 更新状态值:

$$\hat{\mathbf{x}} [k] = \hat{\mathbf{x}}^- [k] + \mathbf{K}[k] (\mathbf{y}[k] - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^- [k])) \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{P}} [k] = (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k] \mathbf{C}_d [k]) \hat{\mathbf{P}}^- [k] (\mathbf{I} - \mathbf{K}[k] \mathbf{C}_d [k])^T + \mathbf{K}[k] \mathbf{R}_d [k] \mathbf{K}^T [k] \quad (18)$$

式中: $\mathbf{x} = [x^n \ y^n \ U \ \chi \ \omega_\chi]^T$, $\mathbf{y} = [x^n \ y^n]^T$, $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1 \ \omega_2]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2]^T$, $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^- [k]) = \mathbf{C}_d [k] \hat{\mathbf{x}}^- [k]$; $\mathbf{Q}_d [k]$, $\mathbf{R}_d [k]$ 为过程和测量噪声的协方差矩阵; $\hat{\mathbf{x}}^- [k]$, $\hat{\mathbf{P}}^- [k]$ 为先验状态和更新前的协方差矩阵; $\hat{\mathbf{x}} [k]$, $\hat{\mathbf{P}} [k]$ 为后验状态和更新后的协方差矩阵。

3 仿真试验

在仿真试验平台使用前文所述的船舶运动模型进行路径跟踪仿真试验, 仿真试验使用直线、曲线和回转三种工况作为期望路径, 同时分别使用传统 LOS 算法、Borhaug 提出的 ILOS 算法、Lekkas 提出的 ILOS 算法和改进后的 ILOS 算法进行仿真测试, 验证本文所提出算法的有效性和合理性。仿真中的航向控制部分使用 PD 控制器对船舶舵角进行控制, 控制器参数 $K_p = 2.23$, $K_d = 1.99$ 。其余控制算法使用固定的前视距离参数 Δ , 参数 Δ 设置为 2 倍船长, 积分项 I 设置为 5。

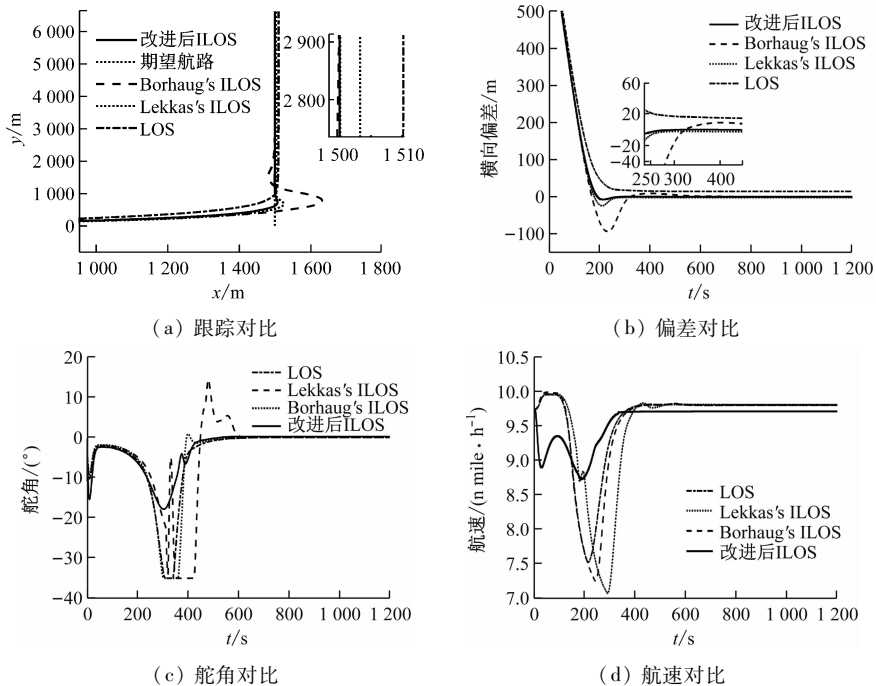


图6 直线测试仿真结果

Fig. 6 Simulation results of linear test

表7 直线测试算法跟踪结果对比

Tab. 7 Comparison of algorithm tracking performance in linear test

算法	最大超调/m	跟踪误差/m	跟踪时间/s
LOS	0	约 15	约 300
Borhaug's ILOS	117	约 1	约 190
Lekkas's ILOS	22	约 1	约 200
改进后 ILOS	5	约 1	约 200

3.1 直线路径跟踪试验

仿真中直线路径起始点坐标为(1 500, 0), 终点坐标为(1 500, 9 000), 船舶仿真参数如表 1 所示。初始位置为(0, 0), 以正东方向为初始航向, 航速为 10 kn, 风速为 1.5 m/s, 风向角为 45°, 流速为 2.2 m/s, 流向角为 45°。使用四种算法进行路径跟踪控制, 仿真结果如图 6 所示, 具体数值如表 7 所示。传统 LOS 算法跟踪速度较慢, 在约 300 s 时跟踪到路径, 且有约 15 m 左右的恒定偏差。由 Borhaug 提出的 ILOS 算法, 在约 190 s 时到达目标路径。跟踪过程产生了两次超调, 最大超调约 120 m。由 Lekkas 提出的 ILOS 算法在跟踪过程中仅产生了一次约 20 m 左右的超调, 经改进后的 ILOS 算法仅产生了 5 m 左右的超调且同样在约 200 s 时跟踪上目标路径。改进后的 ILOS 算法不仅在横向偏差上超调量较小, 在跟踪时间上也有很大的优势, 而且舵角控制更加平稳。

3.2 曲线路径跟踪试验

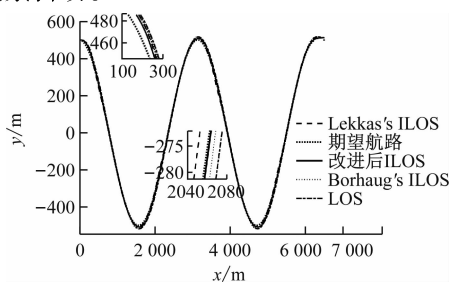
仿真试验中曲线路径参数设置为

$$\begin{cases} X_d = 500a \\ Y_d = 500\cos(a) \end{cases} \quad (19)$$

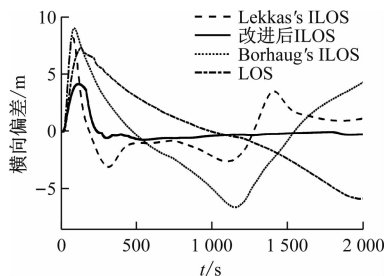
式中: $a = [0, 4\pi]$ 。

初始位置为(-100, 500), 以正东方向为初始航向, 航速为 10 kn, 风速为 1.5 m/s, 风向角为 45°, 流速为 2.2 m/s, 流向角为 45°。使用四种算法进行

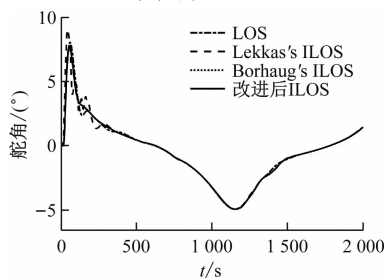
路径跟踪控制,仿真结果如图7所示,具体数值见表8。其他的 ILOS 和 LOS 算法在跟踪过程中船舶与路径之间的偏差较大,难以收敛。传统 LOS 法和 Borhaug 提出的 ILOS 算法有 $[-8\text{ m}, 8\text{ m}]$ 的偏差波动,由 Lekkas 提出的 ILOS 算法有约 4 m 的偏差波动。改进后的 ILOS 算法偏差保持在 1 m 内,较大程度减少了横向偏差的波动,提高了跟踪的稳定性,同时算法的舵角控制与航行速度的变化也较为平稳,没有频繁抖动。



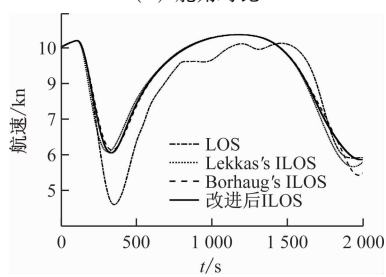
(a) 跟踪对比



(b) 偏差对比



(c) 舵角对比



(d) 航速对比

图7 曲线测试仿真结果

Fig.7 Simulation results of curve test

3.3 回转路径跟踪试验

仿真试验中回转路径参数设置为

$$\begin{cases} X_d = 1500\sin(a) \\ Y_d = 1500\cos(a) \end{cases} \quad (20)$$

表8 曲线测试算法跟踪结果对比

Tab.8 Comparison of the algorithm tracking performance in cure test

算法	最大超调/m	跟踪误差/m	跟踪时间/s
传统 LOS	7.5	约 8	约 1 160
Borhaug's ILOS	9.6	约 8	约 580
Lekkas's ILOS	8.3	约 4	约 190
改进后 ILOS	4.2	约 1	约 220

式中: $a = [0, 4\pi]$ 。

初始位置为 $(-100, 1500)$,以正东方向为初始航向,航速为 10 kn,风速为 1.5 m/s,风向角为 45° ,流速为 2.2 m/s,流向角为 45° 。使用四种算法进行路径跟踪进行控制,结果如图8所示,具体数值见表9。传统 LOS 算法有较大的横向偏差且难以收敛,其余的两种 ILOS 算法的收敛速度较慢,收敛时间超过了 1 500 s,而经过改进后的 ILOS 算法有更快的收敛速度。由图 8b 可以看出,改进后的 ILOS 算法的舵角控制也比较平缓,没有较大的舵角变化。

表9 回转测试算法跟踪结果对比

Tab.9 Comparison of the algorithm tracking performance in rotational test

算法	最大超调/m	跟踪误差/m	跟踪时间/s
传统 LOS	7.9	约 7	大于 3 000
Borhaug's ILOS	7.9	约 3	约 2 000
Lekkas's ILOS	7.8	约 1	约 1 500
改进后 ILOS	7.5	约 1	约 500

4 结论

本文研究了大型船舶的路径跟踪,提出基于改进积分视线算法的大型船舶路径跟踪控制器设计。在导航系统方面,通过扩展卡尔曼滤波器和目标跟踪模型,使用船舶 GNSS 位置信息实现了航速、航向等状态的准确估计。在制导系统方面,设计了划分积分控制区域的模糊控制可变前视距离的 ILOS 算法,并针对不同航行工况对模糊规则进行细化区分,通过在各种条件下进行模拟试验,验证了所提出算法的有效性。仿真数据表明,该算法在风、流的干扰下,对直线、曲线和回转路径都具有良好的跟踪效果,而且具有更好的平稳性和自适应力,对舵角的操控更为平滑。此外算法不需要依靠精确的船舶模型和各类感知设备,使用 GNSS 位置信息来估计船舶状态。该算法综合优势明显,对船舶实现自主航行和高精度船舶轨迹控制具有重要意义。

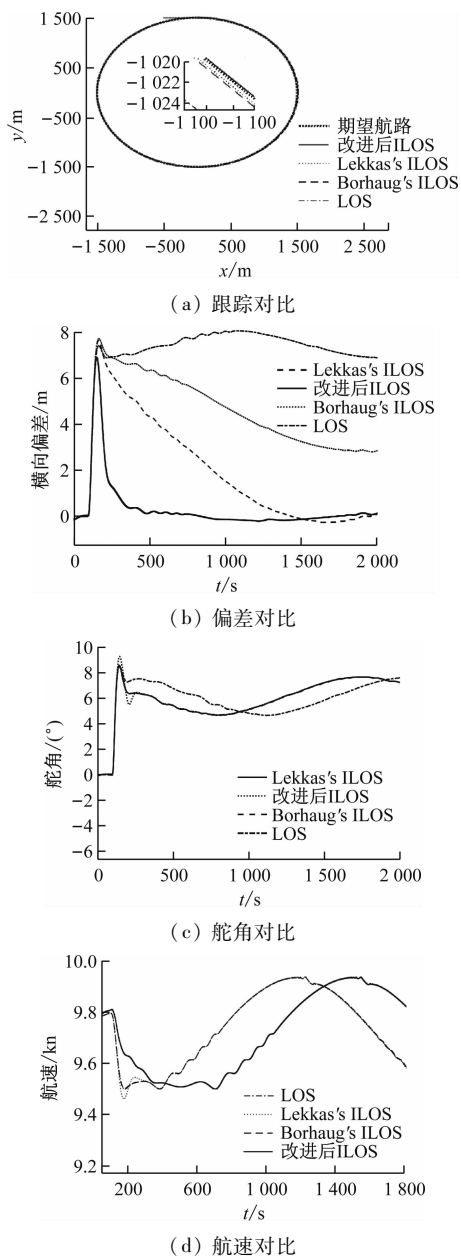


图8 回转测试仿真结果

Fig.8 Simulation results of rotational test

参 考 文 献

[1] 严新平. 实施自立自强科技创新, 开拓长江航运高质量发展新局面[J]. 中国水运, 2021(11): 12-15.
YAN X P. Implementing self-reliance and scientific and technological innovation to open new horizons for high-quality development of Yangtze River shipping [J]. China Water Transport, 2021 (11): 12-15. (in Chinese)

[2] 王行武. 大型船舶自动靠泊运动控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
WANG X W. Research on motion control of large vessel automatic berthing [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology 2020. (in Chinese)

[3] 李永杰, 张瑞, 魏慕恒, 等. 船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 32-44.
LI Y J, ZHANG R, WEI M H, et al. State-of-the-art research and prospects of key technologies for ship autonomous navigation [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 32-44. (in Chinese)

[4] 余亚磊, 苏荣彬, 冯旭, 等. 基于速变 LOS 的无人船反步自适应路径跟踪控制[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 163-171.
YU Y L, SU R B, FENG X, et al. Tracking control of backstepping adaptive path of unmanned surface vessels based on surge-varying LOS [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(3): 163-171. (in Chinese)

[5] FOSSEN T I. Line-of-sight path-following control utilizing an extended Kalman filter for estimation of speed and course over ground from GNSS positions [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2022, 27: 806-813.

[6] NOMOTO K, TAGUCHI K, HONDA K, et al. On the steering qualities of ships [J]. Journal of Zosen Kiokai, 1956, 99: 75-82.

[7] SONG L F, XU C Y, HAO L, et al. Research on PID parameter tuning and optimization based on SAC-Auto for USV path following [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(12): 1847.

[8] ABKOWITZ M A. Measurement of hydrodynamic characteristic from ship maneuvering trials by system identification [J]. Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1980, 88: 283-318.

[9] SANDEEPKUMAR R, RAJENDRAN S, MOHAN R, et al. A unified ship manoeuvring model with a nonlinear model predictive controller for path following in regular waves [J]. Ocean Engineering, 2021, 243: 110165.

[10] OGAWA A, KASAI H. On the mathematical model of manoeuvring motion of ships [J]. International Shipbuilding Progress, 1978, 25(292): 306-319.

[11] QU X R, JIANG Y Z, ZHANG R B, et al. A deep reinforcement learning-based path-following control scheme for an uncertain under-actuated autonomous marine vehicle [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(9): 1762.

[12] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control [M]. John Hoboken, NJ: Wiley & Sons Ltd., 2011.

[13] 郭杰, 刘轶华, 马利华. 基于多模态快速非奇异终端滑模的船舶航迹跟踪自抗扰控制[J]. 中国航海, 2020, 43(2): 7-13.
GUO J, LIU Y H, MA L H. Active disturbance

- rejection control for ship trajectory tracking with multimodal fast nonsingular terminal sliding mode strategy[J]. *Navigation of China*, 2020, 43(2):7-13. (in Chinese)
- [14] 谭聪,杜佳璐,许桂贤,等. 基于 ESO 和动态逆的欠驱动船舶航迹跟踪控制设计[J]. *船舶工程*, 2020, 42(8):103-109.
TAN C, DU J L, XU G X, et al. Trajectory tracking control design of underactuated ships based on ESO and dynamic inversion [J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(8):103-109. (in Chinese)
- [15] 祝亢,黄珍,王绪明. 基于深度强化学习的智能船舶航迹跟踪控制[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1):105-113.
ZHU K, HUANG Z, WANG X M. Tracking control of intelligent ship based on deep reinforcement learning [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1):105-113. (in Chinese)
- [16] REN R Y, ZOU Z J, WANG J Q. Time-scale decomposition techniques used in the ship path-following problem with rudder roll stabilization control[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(9):1024.
- [17] HUANG Y, SHI X C, HUANG W C, et al. Internal model control-based observer for the sideslip angle of an unmanned surface vehicle [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(4):470.
- [18] GHOMMAM J, MAAROUF S, FAISAL M. Prescribed performances based fuzzy-adaptive output feedback containment control for multiple underactuated surface vessels[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 249:110898.
- [19] WANG L, LI S J, LIU J L, et al. Data-driven path-following control of underactuated ships based on antenna mutation beetle swarm predictive reinforcement learning [J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 124:103207.
- [20] 章沪淦,卜仁祥,于稼铭. 船舶路径跟踪 RBF 神经网络滑模控制[J]. *上海海事大学学报*, 2021, 42(4):7-11.
ZHANG H G, BU R X, YU J M. RBF neural network sliding mode control for ship path following[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2021, 42(4):7-11. (in Chinese)
- [21] 刘训文,徐超,陈再发. 事件触发的自适应 PID 海洋水面船舶航迹跟踪控制[J]. *上海海事大学学报*, 2023, 44(2):11-17.
LIU X W, XU C, CHEN Z F. Event-triggered adaptive PID trajectory tracking control for marine surface vehicles[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2023, 44(2):11-17. (in Chinese)
- [22] 李伟,谢华伟,韩俊庆,等. 基于无模型自适应 PD 控制的欠驱动船舶航迹控制[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(13):21-25.
LI W, XIE H W, HAN J Q, et al. Track control of under-actuated ship based on model free adaptive PD control [J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(13):21-25. (in Chinese)
- [23] 贾欣乐,杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连:大连海事大学出版社,1998.
JIA X L, YANG Y S. *Mathematical model of ship motion*[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1998. (in Chinese)
- [24] 刘程,李铁山,陈纳新. 带有舵机特性的船舶航向自动舵 DSC-MLP 设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(1):9-14.
LIU C, LI T S, CHEN N X. Dynamic surface control and minimal learning parameter (DSC-MLP) design of a ship's autopilot with rudder dynamics [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(1):9-14 (in Chinese).
- [25] 黄宠平,邹早建,贺宏伟,等. 基于预测和粒子群的船舶避碰与路径跟踪控制[J]. *中国航海*, 2023, 46(2):125-134.
HUANG C P, ZOU Z J, HE H W, et al. Path following and collision avoidance of underactuated ships based on model predictive control and modified particle swarm optimization[J]. *Navigation of China*, 2023, 46(2), 125-134. (in Chinese)
- [26] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y. On uniform semiglobal exponential stability (USGES) of proportional line-of-sight guidance laws [J]. *Automatica*, 2014, 50(11):2912-2917.
- [27] BORHAUG E, PAVLOV A, PETTERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]//2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. [S. l.]:IEEE, 2008.
- [28] LEKKAS A M. Guidance and path-planning systems for autonomous vehicles [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [29] LI X R, JILKOV V. Survey of maneuvering target tracking. part I. dynamic models [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems*, 2003, 39(4):1333-1364.
- [30] SIEGERT G, BANYÁS P, MARTÍNEZ C S, et al. EKF based trajectory tracking and integrity monitoring of AIS data [C]//2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Savannah, GA, USA: IEEE, 2016.

- 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.