

控制与决策

Control and Decision

基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法

苑守正, 刘志林, 郑林焯, 孙雨鑫

引用本文:

苑守正, 刘志林, 郑林, 孙雨鑫. 基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 336–344.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0260>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

Best phase matching based control strategy for ship stabilizer at low speed

控制与决策. 2021, 36(4): 940–946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1028>

基于最佳相位匹配的减摇鳍低航速控制策略

Best phase matching based control strategy for ship stabilizer at low speed

控制与决策. 2021, 36(4): 940–946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1028>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller

控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization

控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法

苑守正^{1,2}, 刘志林^{1,2†}, 郑林焯³, 孙雨鑫^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 船海装备智能化技术与应用教育部重点实验室 哈尔滨 150001; 3. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 哈尔滨 150078)

摘要: 船舶在自动靠泊的过程中会受到风、浪、流和岸壁效应等多种因素的干扰. 鉴于此, 针对全驱动船舶在复杂海洋条件下的自动靠泊问题, 基于事件触发机制和模型预测控制, 设计一种船舶自动靠泊控制器, 以解决全驱动船舶在模型不确定性、执行器饱和、未知环境扰动以及岸壁效应等因素影响下的船舶自动靠泊问题. 首先将船舶的三自由度模型进行线性化和离散化处理, 并根据全驱动船舶的特性采用先泊位外镇定再平行靠拢的靠泊方式; 然后为了提高求解速度, 提出一种基于事件触发的自适应时域模型预测控制方案并进行稳定性分析; 最后对一艘全驱动船舶进行仿真实验, 将所提出的控制方案与其他已知方法进行对比. 实验结果表明, 所提出控制方案不仅能明显降低运算时间, 而且具有更好的控制效果.

关键词: 船舶控制; 航迹规划; 自动靠泊; 模型预测控制; 事件触发控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0260

引用格式: 苑守正, 刘志林, 郑林焯, 等. 基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 336-344.

Ship berthing based on event-triggered adaptive horizon MPC

YUAN Shou-zheng^{1,2}, LIU Zhi-lin^{1,2†}, ZHENG Lin-he³, SUN Yu-xin^{1,2}

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Technology and Application of Marine Equipment of Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute, Harbin 150078, China)

Abstract: Ships may be disturbed by various factors such as wind, waves, currents and shore wall effects in automatic berthing. Therefore, we design a ship automatic berthing controller based on event-triggered mechanism and model predictive control to solve the automatic berthing problem of fully actuated ships under the influence of model uncertainty, actuator saturation, unknown environmental disturbance and shore wall effect. Firstly, a three-degree-of-freedom model of the fully actuated ship is linearized and discretized, and out-of-berth stabilizing followed by parallel berthing is adopted according to the characteristics of the fully actuated ship. Then, an event-based adaptive horizon model predictive control scheme is proposed to improve the computational speed, and the proof of stability is also proven. Finally, simulation experiments are conducted on a fully actuated ship to compare the proposed control scheme with other known methods, and the experimental results show that the proposed control scheme not only significantly reduces the calculation time, but also has better control performance.

Keywords: ship control; trajectory planning; automatic berthing; model predictive control; event-triggered control

0 引言

随着智能船舶的发展, 智能船舶控制逐渐成为船舶领域最重要的问题之一^[1]. 众多船舶控制问题中, 船舶自动靠泊更具挑战性: 一方面, 船舶在近岸低速靠泊时水动力系数变化较大^[2-3], 其数学模型具有较强的不确定性, 无法得到实时、精确的数学模型; 另一

方面, 风、浪、流和岸壁效应等外界因素的干扰^[4]给船舶的安全靠岸带来了极大困难, 甚至造成人身安全问题和巨大的经济损失.

关于船舶靠泊控制方法的研究较少, 目前最常见的靠泊方法还是人工靠泊, 人工靠泊完全依赖船长的操作, 具有较强的不确定性, 根据数据统计, 超过

收稿日期: 2022-02-18; 录用日期: 2022-10-10.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0105400).

责任编委: 张海涛.

†通讯作者. E-mail: liuzhilin@hrbeu.edu.cn.

70%的靠泊事故与操纵人员的错误操作有关^[5]. 由于靠泊过程的复杂性,人们开始探索利用人工神经网络^[6](artificial neural networks, ANN)代替船长操纵船舶靠泊. Namkyun等^[7]提出了一种在隐藏层中具有两个神经网络的并行控制器,仿真结果表明所提出控制器获得的靠泊效果优于集中式网络. 贾玉鹏等^[8]为解决外界干扰下的欠驱动船舶自动靠泊问题,利用仿真实验在2个没有训练数据的泊位实现了自主靠泊. 为了能够估计船舶未知的水动力和扰动, Zhang等^[9]提出了一种基于自适应神经网络的控制方案,相较于之前的工作,该方法在一定程度上减少了运算量,只需对4个未知参数进行更新. 然而,在船舶的实际靠泊过程中,需要较短的控制收敛时间,因此基于ANN建模控制的实时性难以保障;另一方面,由于神经网络需要获得目标船舶训练的样本并不具有普适性,基于ANN建模的控制方法难以广泛应用于船舶的实际靠泊中^[10].

除了ANN建模方法,非线性最优控制方法也被广泛应用于自动靠泊中,目前主要有顺序共轭梯度恢复算法^[11]、模型预测控制^[12](model predictive control, MPC)和协方差矩阵适应进化策略^[13]等. MPC产生于工业领域的实际应用,是目前工业领域最热门的控制方法之一,具有模型预测、反馈校正和滚动优化等优点^[14],其预测思想也同样适合处理船舶的自动靠泊问题. Mizuno等^[15]提出了一种基于最小时间的准实时靠泊控制方法,并应用于实船实验,然而该方法在靠泊平稳后艏向角偏差较大,仍需进一步改进. Li等^[12]针对欠驱动船舶提出了一种基于非线性模型预测控制(nonlinear model predictive control, NMPC)的方法,根据船舶所处不同靠泊阶段调节状态变量权重,同时将控制输入转化为船舶舵角和螺旋桨转速,实现船舶自动靠泊. 该方法控制效果较好,然而NMPC计算量较大,难以保证靠泊控制的实时性. 文献[16]将船舶自动靠泊问题表述为离线最小时间最优控制问题,针对非线性问题带来的计算困难,采用协方差矩阵适应进化策略对实值变量进行优化. 然而以上研究针对非线性模型进行求解,计算量较大,且未考虑模型不确定性和岸壁效应的干扰.

受到上述工作的启发,本文对全驱动船舶自动靠泊的航迹规划控制方法进行研究. 将船舶三自由度数学模型进行离散化和线性化,转化为最优问题,并同时考虑船舶模型的不确定性和靠泊过程中船体受到的未知环境扰动与岸壁效应. 在航迹规划层面,根据船舶的全驱动特性,采取先泊位外镇定再平行靠

拢的方式进行靠泊轨迹规划,并引入贝塞尔曲线对轨迹进行优化. 在控制层面,为了在保证控制表现的同时减少MPC算法的计算量,提出一种基于事件触发的自适应时域模型预测控制方法(event-triggered adaptive horizon model predictive control, EAHMPC).

本文的主要贡献如下:

1) 基于全驱动船舶的三自由度线性离散数学模型,通过数学推导建立船舶自动靠泊的最优问题,同时考虑模型不确定性、控制器输入饱和、环境扰动以及岸壁效应的干扰.

2) 根据船舶的全驱动特性,采用先泊位外镇定再平行靠拢的方式进行靠泊,并采用三阶贝塞尔曲线对泊位外镇定前的航迹进行规划.

3) 目前用于船舶自动靠泊控制的算法相对较少,为了保证控制效果的基础上降低计算负担,提出一种新型EAHMPC控制策略用于船舶自动靠泊控制,并进行稳定性证明和仿真实验. 实验结果显示,所提出EAHMPC方案相较于NMPC和MPC有更好的综合表现.

1 问题分析与建模

1.1 符号表示

\mathbb{R} 和 \mathbb{N} 分别表示实数和非负整数. $|x|$ 表示标量 x 的绝对值, $[x]$ 表示取 x 的整数部分, $\|\mathbf{x}\|$ 表示向量 \mathbf{x} 的二范数. 对于矩阵 \mathbf{x} , $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}$, $\|\mathbf{x}\|_M^2$ 表示 $\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x}$. $\mathbf{0}$ 和 \mathbf{I} 分别表示零矩阵和单位矩阵, \inf 表示下确界.

1.2 坐标系建立

为了描述船舶运动^[17],建立如图1所示的固定坐标系和船体运动坐标系.

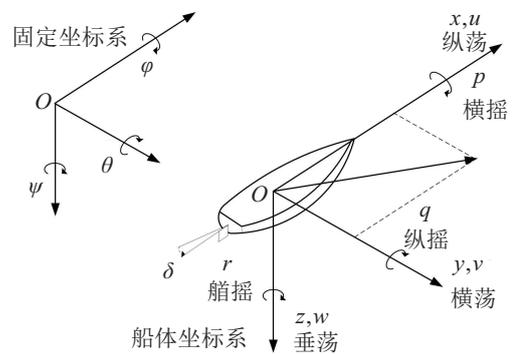


图1 坐标系示意图

1.3 船舶靠泊数学模型的建立

由于船舶近岸靠泊过程在水平面上低速运动,仅考虑船体在横荡、纵荡和船摇三个自由度方向上的运动,此时船舶靠泊的非线性数学模型^[18]为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v}, \quad (1)$$

$$M\dot{\boldsymbol{v}} + D\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{R}^T(\psi)\boldsymbol{b} + \boldsymbol{d}. \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ 为船舶在固定坐标系下的横坐标、纵坐标和航向角; $\boldsymbol{R}^T(\psi) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为两坐标系之间的坐标转换矩阵, 表达式为

$$\boldsymbol{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

且满足 $\boldsymbol{R}^{-1}(\psi) = \boldsymbol{R}^T(\psi)$ 以及 $\|\boldsymbol{R}(\psi)\| = 1$; $\boldsymbol{v} = [u, v, r]^T$ 为船舶在船体运动坐标系下的船舶纵向速度、横向速度以及艏摇角速度; 考虑船舶模型的不确定性, 惯性矩阵和阻尼矩阵分别表示为 $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_0 + \Delta\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}_0 + \Delta\boldsymbol{D}$, 且

$$\boldsymbol{M}_0 = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{D}_0 = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

分别为标称惯性矩阵和标称线性阻尼矩阵, $\Delta\boldsymbol{M}$ 和 $\Delta\boldsymbol{D}$ 为实际矩阵与标称矩阵之间的偏差; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$, τ_1 为船舶纵向控制力, τ_2 为船舶横向控制力, τ_3 为船舶艏摇控制力矩; $\boldsymbol{b} = [b_1, b_2, b_3]^T$ 为固定坐标系下由于二阶风、浪和海流引起的缓慢变化的环境扰动力和力矩, 以及未建模非线性动力学引起的模型不确定性; $\boldsymbol{d} = [d_1, d_2, d_3]^T$ 为岸壁效应对船舶的干扰力和力矩. 对于模型做以下假设.

假设1 船舶的模型不确定性 $\Delta\boldsymbol{M}$ 和 $\Delta\boldsymbol{D}$ 是有界的.

假设2 未知环境扰动 \boldsymbol{b} 为风、浪和海流的叠加扰动, 其变化率是有界的, 即 $\|\dot{\boldsymbol{b}}\| \leq \dot{\boldsymbol{b}}^* < \infty$, 其中 $\dot{\boldsymbol{b}}^*$ 为未知常数向量.

假设3 岸壁效应干扰 \boldsymbol{d} 有界, 即 $\|\boldsymbol{d}\| \leq \boldsymbol{d}^* < \infty$, 其中 \boldsymbol{d}^* 为未知常数向量.

船舶的水动力系数随航速变化而改变. 当船舶近岸低速航行时, 船速相对平稳且变化幅度较小, 因此, 可以认为船舶水动力系数的变化是有界的, 即船舶的模型不确定性 $\Delta\boldsymbol{M}$ 和 $\Delta\boldsymbol{D}$ 是有界的, 假设1成立.

当船舶沿近岸靠泊时, 主要受到船岸对船身的侧向吸引力和船舶的艏摇力矩. 由于近岸港口环境相对稳定, 风、浪流和岸壁效应对船舶的干扰有限, 即 \boldsymbol{b} 和 \boldsymbol{d} 有界, 假设2和假设3成立.

由于船舶动力装置能提供的推力有限, 控制输入的非线性饱和约束可以表示为

$$\tau_{i \min} \leq \tau_i \leq \tau_{i \max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_C. \quad (6)$$

其中: $\tau_{i \min} = [\tau_{1 \min}, \tau_{2 \min}, \tau_{3 \min}]^T$, $\tau_{i \max} = [\tau_{1 \max}, \tau_{2 \max}, \tau_{3 \max}]^T$ 分别为船舶舵和浆所能提供的最小和最大的推力和转向力矩, N_C 为控制时域.

由式(1)和(2)得到紧凑形式的状态空间方程

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}(t) &= \boldsymbol{f}(t, \boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{b}(t), \boldsymbol{d}(t)) = \\ &\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{B}_b(t)\boldsymbol{b}(t) + \\ &\boldsymbol{B}_d(t)\boldsymbol{d}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $\boldsymbol{x} = [x, y, \psi, u, v, r]^T \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量, $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\tau}$ 为控制输入, $\boldsymbol{f}(\cdot)$ 为线性函数, 可直接分解为状态空间形式, 其状态空间矩阵为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \boldsymbol{R}(\psi(t)) \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \boldsymbol{M}^{-1} \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{B}_b(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{R}(\psi(t)) \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B}_d(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \boldsymbol{M}^{-1} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

将式(7)进行离散化, 得到

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k+1) &= \\ &\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{u}(k) + \boldsymbol{B}_b(k)\boldsymbol{b}(k) + \boldsymbol{B}_d(k)\boldsymbol{d}(k), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{C}_k\boldsymbol{x}(k). \quad (9)$$

其中: $k = [t/T]$ 为当前时间步, $\boldsymbol{A}_k = \boldsymbol{e}^{\boldsymbol{A}(t)T}$ 为离散时间步长, $\boldsymbol{B}_k = \boldsymbol{A}^{-1}(t)(\boldsymbol{A}_k - \boldsymbol{I}) \cdot \boldsymbol{B}(t)$, $\boldsymbol{I} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为单位矩阵, $\boldsymbol{B}_b(k) = \boldsymbol{A}^{-1}(t)(\boldsymbol{A}_k - \boldsymbol{I}) \cdot \boldsymbol{B}_b(t)$, $\boldsymbol{B}_d(k) = \boldsymbol{A}^{-1}(t)(\boldsymbol{A}_k - \boldsymbol{I}) \cdot \boldsymbol{B}_d(t)$, $\boldsymbol{C}(k) = [\boldsymbol{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 3}]$. 将式(8)和(9)作为预测模型, 迭代得到如下预测状态:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k + N_P | k) &= \\ &\boldsymbol{A}_k^{N_P} \boldsymbol{x}(k) + \sum_{i=1}^{N_C} \boldsymbol{A}_k^{N_P-i} \boldsymbol{B}_k \boldsymbol{u}(k+i-1) + \\ &\sum_{i=1}^{N_C} \boldsymbol{A}_k^{N_P-i} \boldsymbol{B}_b(k) \boldsymbol{b}(k+i-1) + \\ &\sum_{i=1}^{N_C} \boldsymbol{A}_k^{N_P-i} \boldsymbol{B}_d(k) \boldsymbol{d}(k+i-1). \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)与(10)联立, 并转换为如下所示的紧凑形式:

$$\boldsymbol{Y}(k) = \boldsymbol{\Phi}_k \boldsymbol{X}(k) + \boldsymbol{\Theta}_k \boldsymbol{U}(k) + \boldsymbol{T}_1 \boldsymbol{B} + \boldsymbol{T}_2 \boldsymbol{D}. \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Y}(k) &= \\ &[\boldsymbol{y}^T(k|k) \quad \boldsymbol{y}^T(k+1|k) \quad \dots \quad \boldsymbol{y}^T(k+N_P-1|k)]^T, \\ \boldsymbol{U}(k) &= \\ &[\boldsymbol{u}^T(k|k) \quad \boldsymbol{u}^T(k+1|k) \quad \dots \quad \boldsymbol{u}^T(k+N_C-1|k)]^T, \\ \boldsymbol{\Phi}_k &= [(\boldsymbol{C}_k \boldsymbol{A}_k)^T \quad (\boldsymbol{C}_k \boldsymbol{A}_k^2)^T \quad \dots \quad (\boldsymbol{C}_k \boldsymbol{A}_k^{N_P})^T]^T, \end{aligned}$$

$$\Theta_k = \begin{bmatrix} C_k B_k & 0 & \cdots & 0 \\ C_k A_k B_k & C_k B_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ C_k A_k^{N_P-1} B_k & C_k A_k^{N_P-1} B_k & \cdots & C_k A_k^{N_P-1} B_k \end{bmatrix},$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} C_k B_b & 0 & \cdots & 0 \\ C_k A_k B_b & C_k B_b & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ C_k A_k^{N_P-1} B_b & C_k A_k^{N_P-1} B_b & \cdots & C_k A_k^{N_P-1} B_b \end{bmatrix},$$

$$B = [B_b^T(k) \ B_b^T(k+1) \ \cdots \ B_b^T(k+N_P-1)]^T,$$

$$D = [B_d^T(k) \ B_d^T(k+1) \ \cdots \ B_d^T(k+N_P-1)]^T,$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} B_d & 0 & \cdots & 0 \\ C_k A_k B_d & C_k B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ C_k A_k^{N_P-1} B_d & C_k A_k^{N_P-1} B_d & \cdots & C_k A_k^{N_P-1} B_d \end{bmatrix},$$

N_P 为预测时域。

2 船舶靠泊轨迹规划和控制器设计

2.1 靠泊轨迹规划

以往研究根据靠岸方式区分,船舶主要有3种靠泊方式,即泊位外镇定^[19]、直接靠泊^[20]和先泊位外镇定后平行靠泊^[21]。考虑到本文研究对象的全驱动特性,采用先泊位外镇定后平行靠泊的靠泊方式。靠泊轨迹规划分为两部分:泊位外轨迹跟踪和近泊位平行靠拢。对于泊位外轨迹跟踪部分,首要任务是设计一条从船舶初始位置到泊位外镇定点的平滑曲线。然而,传统的路径规划方法通常会生成一条具有多个锐角的路径^[22],其斜率在拐角处是非连续的,无法满足船舶靠泊跟踪的需要。为了使船舶的靠泊过程更加平稳,采用三阶贝塞尔曲线作为泊位外的轨迹跟踪曲线,船舶靠泊轨迹规划示意图如图2所示。贝塞尔曲线上点的坐标如下所示:

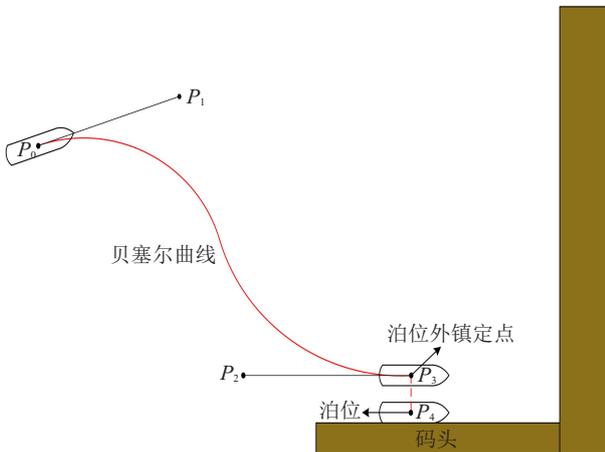


图2 靠泊轨迹规划示意图

$$P(a) = (1-a)^3 P_0 + 3a(1-a)^2 P_1 + 3a^2(1-a) P_2 + 3P_3, \quad a \in [0, 1], \quad (12)$$

其中 P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 分别为三阶贝塞尔曲线的控制点。

2.2 控制器设计

船舶的自动靠泊问题可以描述为:在每一个预测时域内,寻找最优控制序列 $U^* = [u_1^*, u_2^*, \dots, u_{N_C}^*]^T$,使优化函数达到最小,从而使船舶沿着期望航迹抵达泊位,由此得到如下最优问题:

$$\min_u V_{N_P(k)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, N_P(k)) = \sum_{i=0}^{N_P(k)-1} \ell(\mathbf{x}(k+i), \mathbf{u}(k+i)) + V_f(\mathbf{x}(N_P(k))).$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}(k+i+1|k) = \mathbf{A}(k+i)\mathbf{x}(k+i) + \mathbf{B}(k+i)\mathbf{u}(k+i),$$

$$i = 0, 1, \dots, N_P - 1;$$

$$\ell(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{x}_e^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_e + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u};$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k), \quad k = 0, 1, \dots, N_P - 1;$$

$$\mathbf{u}(k) \in \mathbf{U}, \quad k = 0, 1, \dots, N_C - 1. \quad (13)$$

其中: V 为李雅普诺夫候选函数, $N_P(k)$ 为时变预测时域, $V_f = \{\mathbf{x} : \|\mathbf{x}(k+N_P(k))\|_P^2 \leq \varepsilon^2\}$, $\varepsilon > 0$ 为终端域, \mathbf{x}_e 为当前状态与期望状态之间的误差, \mathbf{Q} 和 \mathbf{P} 为状态误差和输入权重矩阵, \mathbf{U} 为输入向量的集合。

由于信号传输的带宽有限,信号拥挤可能会导致信息传输的延迟和丢失,进而可能会降低系统的稳定性。在合理范围内降低信息传输的频率对于系统的稳定是有益的,基于此想法,采用事件触发机制以减少信息传输和系统计算的频率。不失一般性,假设 $t_0 = 0$ 为初始触发时间,定义船舶靠泊问题在航迹跟踪阶段的触发机制为

$$\mathbf{u}(t_i) = \mathbf{u}(t), \quad \forall t_i \in [t_k, t_{k+1}); \quad (14)$$

$$t_{k+1} = \inf\{t > t_k \mid \|\mathbf{y}_e(t)\| > m\}. \quad (15)$$

其中: \mathbf{y}_e 为实际输出向量与期望输出向量之间的误差, m 为固定阈值。在事件触发机制下,控制输入 $\mathbf{u}(k)$ 只在触发条件(14)被满足时进行更新;不被满足时控制器不会进行求解,此时将上一时刻的输入应用于被控系统中,控制系统如图3所示。

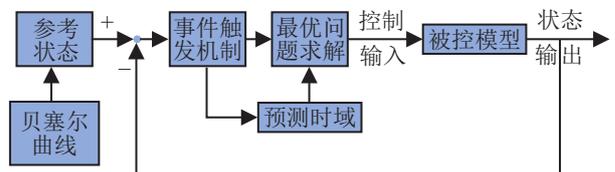


图3 控制系统框图

对于事件触发控制,由于Zeno现象的存在,控制器可能会在有限时间内被无限触发,进而会影响控制系统的稳定性.控制系统的稳定性除了受到MPC稳定性的影响,还与最小触发时间有关.为了避免Zeno现象,采用仿真时间间隔作为事件触发时间间隔的下确界,同时对连续不触发次数进行限制,提出最大连续不触发次数 T_{\max} ,保证控制系统的稳定.

对于MPC的航迹跟踪问题,合适的预测时域不仅有利于保证控制系统的稳定性,还会降低计算量,提高运算速度.反之,过长的预测时域也会增加系统的计算负担,严重还可能会影响系统的实时性.基于以上考虑,采用时域自适应的思想,使MPC的预测时域随着上一时刻误差变化而变化,具体算法如下所示.

step 1: 初始化时间步 $k = 0$ 和预测时域 $N_P(0) = 50$.

step 2: 求解最优问题(12)得到最优序列 $\mathbf{u}^*(k)$.

step 3: 将最优序列的 $\mathbf{u}^*(k)$ 的第1个元素代入控制系统并得到下一时刻的状态 $\mathbf{x}(k+1)$.

step 4: 增加时间步 $k = k + 1$.

step 5: 计算输入误差的范数.如果 $\|\mathbf{y}_e(t)\| > m$,则保持当前预测时域 $N_P(k+1) = N_P(k)$ 并返回step 2;否则,减少下一时刻的预测时域 $N_P(k+1) = N_P(k) - 1$ (大于最小预测时域),并将上一时刻控制输入作为此时刻的控制输入.当此步骤连续触发次数大于 T_{\max} 时,返回step 2.

step 6: 若未达到最大循环次数则返回step 4;否则,停止循环.

MPC控制器的预测时域满足以下条件:

$$N_{P\min} \leq N_P(k) \leq N_P(0); \quad (16)$$

$$N_P(i+1) \leq N_P(i), \quad i = 1, 2, \dots, N_P(k) - 1. \quad (17)$$

其中: $N_{P\min}$ 为预测时域的最小值, $N_P(0)$ 为初始预测时域.

2.3 稳定性分析

定理1 根据假设1~假设3,对于受干扰的不确定系统有下式成立:

$$\begin{aligned} & V_{N_P(k+1)}(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\kappa_{N_P(k+1)}(\mathbf{x})) - V_{N_P(k)}(\mathbf{x}) \leq \\ & -\ell(\mathbf{x}, \kappa_{N_P(k)}(\mathbf{x})). \end{aligned} \quad (18)$$

证明 假设最优问题(13)在 k 时刻的最优控制序列为

$$\mathbf{u}^*(k) = [\mathbf{u}_0^*(k), \mathbf{u}_1^*(k), \dots, \mathbf{u}_{N_C-1}^*(k)]^T. \quad (19)$$

将式(19)代入(13),得到相应的最优状态序列

$$\mathbf{u}^*(k) = [\mathbf{u}_0^*(k), \mathbf{u}_1^*(k), \dots, \mathbf{u}_{N_C-1}^*(k)]^T. \quad (20)$$

同时,将隐式MPC控制律表示为

$$\kappa_N(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_0^*(k), \quad (21)$$

从而得到在下一个时间步 $k+1$ 的相应状态量为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\kappa_N(\mathbf{x}). \quad (22)$$

考虑如下候选序列:

$$\tilde{\mathbf{u}}(k) = [\mathbf{u}_1^*(k), \mathbf{u}_2^*(k), \dots, \mathbf{u}_{N_C-1}^*(k), \mathbf{u}_{N_C}(k)]^T. \quad (23)$$

选择 $\mathbf{u}_{N_C}(k) \in \mathbf{U}$,使得系统在 $N_P(k)$ 时的状态满足 $\mathbf{x}(N_P(k)) = \mathbf{A}\mathbf{x}(N_P(k)-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}_{N_C}(k) \in \mathbf{X}_f$,且有 $V_f(\mathbf{x}(N_P(k))) + \ell(\mathbf{x}(N_P(k)-1), \mathbf{u}(N_C(k)-1)) \leq V_f(\mathbf{x}(N_P(k)-1))$.

$$(24)$$

根据式(16)和(24)得到

$$\begin{aligned} & V_{N_P(k+1)}(\mathbf{x}(k+1), \tilde{\mathbf{u}}, N_P(k+1)) \leq \\ & V_{N_P(k)}(\mathbf{x}(k+1), \tilde{\mathbf{u}}, N_P(k)) \leq \\ & V_{N_P(k)}^*(\mathbf{x}(k), \tilde{\mathbf{u}}, N_P(k)) - \ell(\mathbf{x}, \kappa_{N_P(k)}(\mathbf{x})). \end{aligned} \quad (25)$$

由此

$$\begin{aligned} & V_{N_P(k)}^*(\mathbf{x}(k+1), \mathbf{u}, N_P(k)) \leq \\ & V_{N_P(k)}(\mathbf{x}(k+1), \tilde{\mathbf{u}}, N_P(k)) \leq \\ & V_{N_P(k)}^*(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}, N_P(k)) - \ell(\mathbf{x}, \kappa_{N_P(k)}(\mathbf{x})). \end{aligned} \quad (26)$$

可以说明系统的初始状态在 \mathbf{X} 上是渐近稳定的. \square

3 仿真实验

本文运行仿真实验所采用的处理器配置为:AMD Ryzen™9 3900X,主频3.8 GHz,主机运行内存为32.0 GHz.以挪威科技大学按照1:70比例复制的船模CybershipII(CSII)作为控制对象^[18]进行仿真实验,CSII的水动力参数如表1所示.将仿真中的模型不确定性矩阵设为 $\Delta\mathbf{M} = 0.1\mathbf{M}_0$ 和 $\Delta\mathbf{D} = 0.1\mathbf{D}_0$.

表1 CSII船参数

参数	值	单位	参数	值	单位
m	23.8	kg	$N_{\dot{r}}$	-1.0	kg·m ²
I_z	1.76	kg·m ²	X_u	-2.0	kg/s
X_g	0.046	m	Y_v	-7.0	kg/s
$X_{\dot{u}}$	-2.0	kg	Y_r	-0.1	kg·m/s
$Y_{\dot{v}}$	-10.0	kg	N_v	-0.1	kg·m/s
$Y_{\dot{r}}$	-0.0	kg·m	N_r	-0.5	kg·m ² /s

控制器的主要控制参数设置如表2所示.为了更好地体现所提出控制方案的优越性,分别对右舷靠泊和左舷靠泊两种场景进行仿真.

在右舷靠泊场景中,船舶的初始位置和航向角设置为 $\boldsymbol{\eta}_0 = [-40, 10, 90^\circ]^T$;令式(11)中 $P_0 = (-40, 20)$, $P_1 = (-30, 25)$, $P_2 = (-10, 3)$,泊位外镇定点设置为

表2 主要控制参数

控制器参数	值
总步数 (N)	2300
仿真时间间隔 (T_s)/s	0.1
初始预测时域 ($N_P(0)$)	30
控制时域 (N_C)	5
触发阈值 (m)	0.05
最大连续不触发次数 (Tr_{max})	5
输出权值矩阵 (Q)	$\text{diag}(10, 10, 0.2)$
控制权值矩阵 (R)	$\text{diag}(1, 1, 1)$
最大控制输入 $\tau_{i \max}$	$[1.5 \text{ N}, 1.5 \text{ N}, 2 \text{ N}\cdot\text{m}]^T$
最小控制输入 $\tau_{i \min}$	$[-1.5 \text{ N}, -1.5 \text{ N}, -2 \text{ N}\cdot\text{m}]^T$

$\eta_{d1} = [0, 3, 90^\circ]^T$, 其位置坐标对应式(11)中的 P_3 ; 期望泊位的位置和航向角设置为 $\eta_{d2} = [0, 0, 90^\circ]^T$.

在左舷靠泊场景中, 船舶的初始位置和航向角设置为 $\eta_0 = [40, 10, -90^\circ]^T$; 令式(11)中 $P_0 = (40, 20)$, $P_1 = (30, 25)$, $P_2 = (-10, 3)$, 泊位外镇定点设置为 $\eta_{d1} = [0, 3, -90^\circ]^T$, 其位置坐标对应式(11)中的 P_3 ; 期望泊位的位置和航向角设置为 $\eta_{d2} = [0, 0, -90^\circ]^T$.

采用一阶马尔科夫过程表示未知环境扰动产生的干扰力和干扰力矩, 有

$$\begin{cases} \mathbf{d} = \mathbf{J}^T(\psi)\mathbf{b}, \\ \dot{\mathbf{b}} = -\mathbf{T}_c^{-1}\mathbf{b} + \rho\mathbf{n}. \end{cases} \quad (27)$$

其中: $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^3$ 为固定坐标系下的干扰向量, $\mathbf{T}_c = \text{diag}(10^3, 10^3, 10^3)$ 为常数对角矩阵, \mathbf{n} 为零均值高斯白噪声, $\rho = \text{diag}(1, 1, 1)$ 为 \mathbf{n} 的幅值矩阵. 此外, 船岸作用于船体产生的岸壁效应的扰动力和扰动力矩为

$$\mathbf{d}(t) = 0.1 \times \begin{bmatrix} \sin(0.2t) + \cos\left(0.2t + \frac{\pi}{4}\right) \\ \sin(0.2t) + \cos\left(0.2t + \frac{\pi}{4}\right) \\ \sin(0.2t) + \cos\left(0.2t + \frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix}. \quad (28)$$

为体现所提出 EAHMPC 算法的优越性, 对 NMPC^[12]、MPC 和 EAHMPC 三种方案分别进行仿真实验, 结果如图4~图9所示. 此外, 采用绝对误差积分 (integral absolute error, IAE) 和绝对时间误差积分 (integral time absolute error, ITAE) 定量地比较两种算法的稳态和瞬态响应性能, 定义 $\text{IAE}_x = \int_0^t |x_e(s)| ds$, $\text{IAE}_y = \int_0^t |y_e(s)| ds$, $\text{IAE}_\psi = \int_0^t |\psi_e(s)| ds$. 定义 $\text{ITAE}_x = \int_0^t s|x_e(s)| ds$, $\text{ITAE}_y = \int_0^t s|y_e(s)| ds$, $\text{ITAE}_\psi = \int_0^t s|\psi_e(s)| ds$. 其中: x_e 、 y_e 和 ψ_e 分别表示真实值与参考值之间的误差, 对比结果如表3和表4所示.

图4表示船舶靠泊过程中船舶的航行轨迹. 可知, 3种控制方案均能使船舶在未知时变环境干扰和岸壁效应的影响下抵达期望泊位. 从局部放大图可以看出, 在靠泊的初始阶段, MPC和EAHMPC能够使船舶较快地跟踪上期望航迹, 且超调量比NMPC更

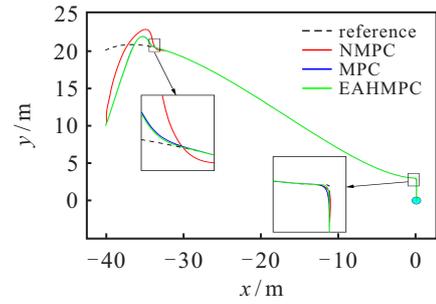


图4 船舶航行轨迹(右舷靠泊)

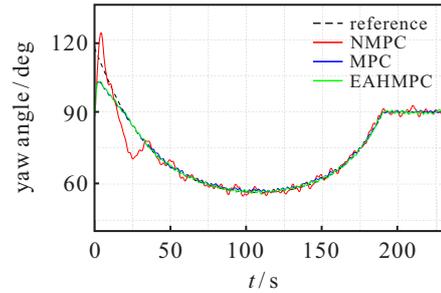


图5 船舶艏向角(右舷靠泊)

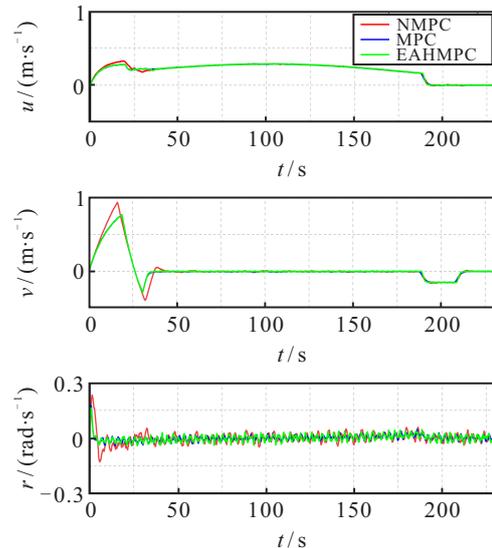


图6 船舶航行速度(右舷靠泊)

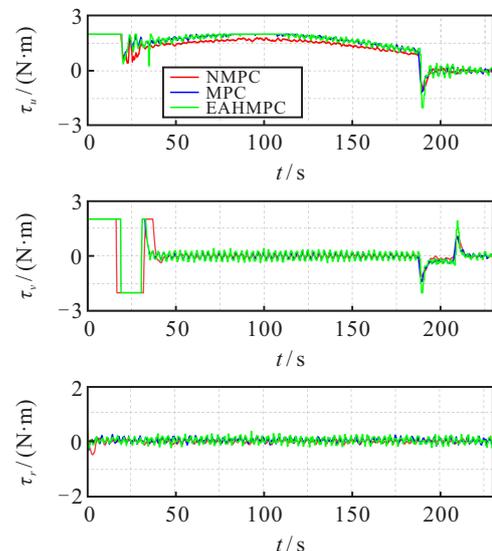


图7 控制输入(右舷靠泊)

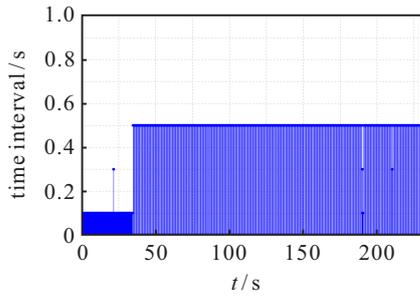


图8 相邻触发节点间时间间隔(右舷靠泊)

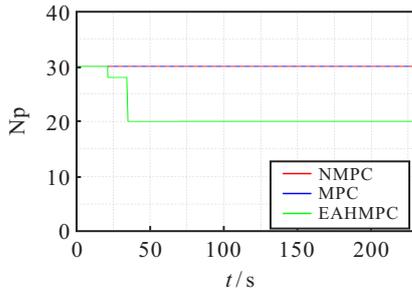


图9 预测时域(右舷靠泊)

表3 绝对误差积分(右舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
$IAE_x (\times 10^2)$	2.38	1.85	1.27
$IAE_y (\times 10^3)$	1.44	1.47	1.44
$IAE_\psi (\times 10)$	7.76	4.30	3.66

表4 绝对时间误差积分(右舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
$IAE_x (\times 10^4)$	6.36	11.02	4.80
$IAE_y (\times 10^5)$	1.61	1.83	1.45
$IAE_\psi (\times 10^4)$	4.85	2.64	1.99

小;当船舶临近泊位外镇定点时,EAHMPC能使船舶更好地沿着期望轨迹航行,从而到达泊位.图5表示3种方案下船舶靠泊过程中的艏向角变化曲线,可知EAHMPC和MPC方案具有更好的艏向角跟踪效果,且波动较NMPC更小.图6表示3种方案下船舶靠泊过程中的速度变化曲线,3种方案速度最终均趋于0,表明3种方案均能在输入约束下完成船舶靠泊任务.图7表示船舶靠泊过程中的控制输入变化曲线,可以看出3种方案的控制输入波动较小,有利于控制器的执行.图8表示EAHMPC方案中相邻两次触发时间点之间的时间间隔,可以看出触发的分布平均且稀疏,有利于有效减少运算时间且保证控制效果.图9表示3种方案下的预测时域随时间变化曲线.

进一步引入IAE和ITAE,对靠泊控制效果进行定量分析.由表3和表4可知,所提出EAHMPC方案各项数值均为最小,表明EAHMPC方案在船舶航迹跟踪过程具有更好的动态和稳态响应,进而表明所提出的控制方案在右舷靠泊场景中具有更好的靠泊航

迹跟踪效果.

为了评估所提出方案的计算表现,采用运行时间和触发次数评估3种方案的计算表现,具体实验数据如表5所示.可知所提出EAHMPC方案仅触发735次,相较于其他两种方案减少了1565次.另一方面,EAHMPC方案的仿真运行时间相较于NMPC和MPC方案明显降低,可以说明,所提出EAHMPC方案在右舷靠泊场景中相较于其他两种方案运算速度更快,具备更好的计算表现.

表5 平均运行内存与运行时长(右舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
运行时长/s	93.0	49.3	15.9
触发次数	2300	2300	735

随后,对左舷靠泊场景进行仿真实验.图10为船舶靠泊过程中船舶的航行轨迹;图11为3种方案下船舶靠泊过程中的艏向角变化曲线;图12为3种方案下船舶靠泊过程中的速度变化曲线;图13为船舶靠泊过程中的控制输入变化曲线;图14为EAHMPC方案中相邻两次触发时间点之间的时间间隔;图15为3种方案下预测时域随时间变化曲线.由于仿真结果与右舷靠泊场景类似,在此不再赘述.

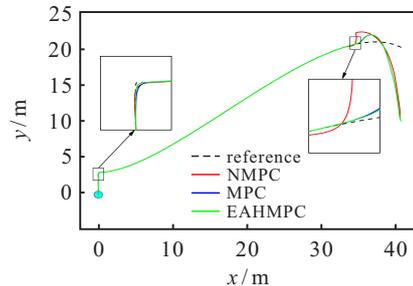


图10 船舶航行轨迹(左舷靠泊)

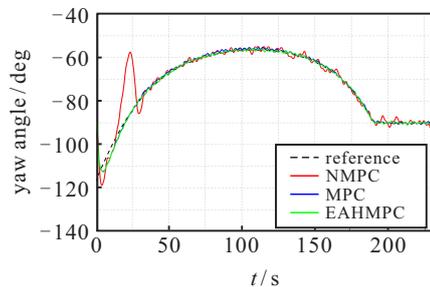


图11 船舶艏向角(左舷靠泊)

左舷靠泊的绝对误差积分与绝对时间误差积分分别如表6和表7所示.可知,所提出EAHMPC方案各项数值均为最小,表明EAHMPC方案在船舶航迹跟踪过程具有更好的动态和稳态响应,进而表明所提出控制方案在左舷靠泊场景中具有更好的靠泊航迹跟踪效果.

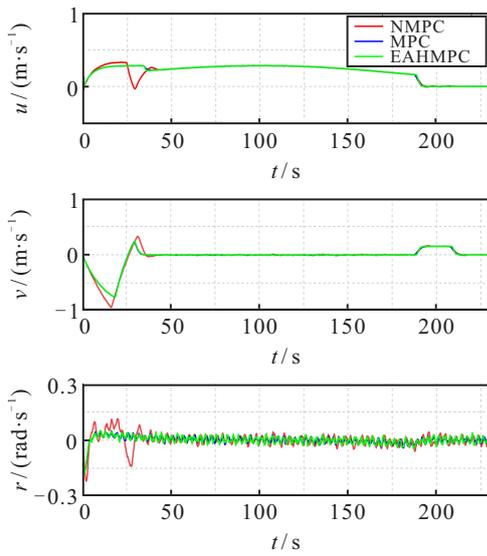


图12 船舶航行速度(左舷靠泊)

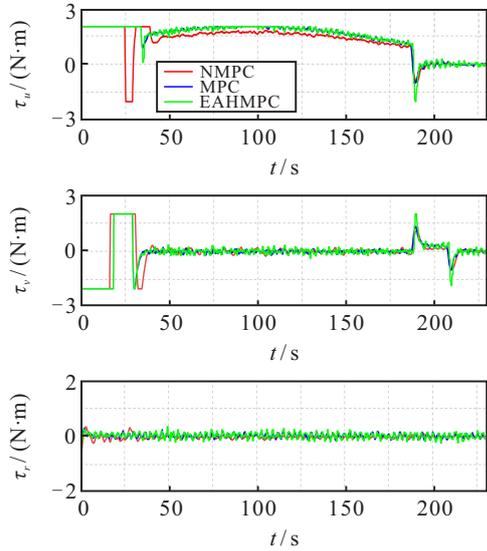


图13 控制输入(左舷靠泊)

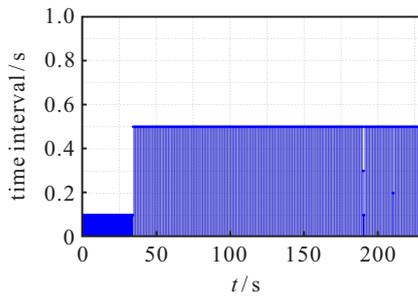


图14 相邻触发节点间时间间隔(左舷靠泊)

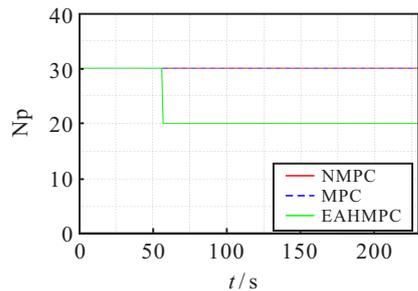


图15 预测时域(左舷靠泊)

左舷场景的计算表现如表8所示. 可知所提出EAHMPC方案仅触发736次,相较于其他两种方案减少了1564次;另一方面,EAHMPC方案仿真运行时间相较于NMPC和MPC方案明显降低. 因此可以说明,所提出EAHMPC方案在左舷靠泊场景中相较于其他两种方案运算速度更快,具备更好的计算表现.

表6 绝对误差积分(左舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
IAE _x (×10 ²)	2.88	3.41	2.81
IAE _y (×10 ³)	1.42	1.44	1.41
IAE _ψ (×10)	8.95	3.72	2.99

表7 绝对时间误差积分(左舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
IAE _x (×10 ⁴)	7.32	13.07	7.35
IAE _y (×10 ⁵)	1.45	1.77	1.38
IAE _ψ (×10 ⁴)	4.95	2.36	1.72

表8 平均运行内存与运行时长(左舷靠泊)

参考指标	NMPC	MPC	EAHMPC
运行时长/s	90.5	47.0	15.3
触发次数	2300	2300	736

综上所述,所提出EAHMPC方案在自动靠泊过程中相较于其他两种方案能够在小幅提升控制表现的前提下大幅降低运算时间,具有更好的控制表现和计算表现.

4 结论

本文提出一种基于EAHMPC的船舶控制策略,解决了在未知时变环境扰动和岸壁效应干扰下全驱动船舶的自动靠泊轨迹规划和控制问题. 将船舶的三自由度数学模型进行线性化和离散化处理,进一步得到最优问题. 由于控制对象为全驱动模型,采用先泊位外镇定再平行靠拢的靠泊方式将靠泊轨迹分为两个阶段,并通过三阶贝塞尔曲线对初始位置到泊位外镇定前的轨迹进行规划. 在算法层面,考虑到控制模型的不确定性和执行器的饱和特性,采用MPC算法对最优问题进行求解. 同时为了进一步减少算法的计算量,在MPC算法的基础上提出了EAHMPC控制方案. 将NMPC、MPC与EAHMPC三种方案应用于右舷靠泊和左舷靠泊两种场景进行仿真实验,结果表明所提出EAHMPC控制策略不仅能够明显降低运算时间,还具有更好的控制效果.

未来将主要针对等比缩小船模和实船进行实验研究,更多地考虑船舶在真实环境下的靠泊控制问题;另一方面,也将针对欠驱动船舶进行深入研究,探索将该方法用于欠驱动模型的可能性.

参考文献(References)

- [1] 严新平, 柳晨光. 智能航运系统的发展现状与趋势[J]. 智能系统学报, 2016, 11(6): 807-817.
(Yan X P, Liu C G. Review and prospect for intelligent waterway transportation system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016, 11(6): 807-817.)
- [2] Yuan Z M, Zhang X S, Ji C Y, et al. Side wall effects on ship model testing in a towing tank[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 447-457.
- [3] 刘志林, 苑守正, 郑林焯, 等. 船舶自动靠泊技术的发展现状和趋势[J]. 中国造船, 2021, 62(4): 293-304.
(Liu Z L, Yuan S Z, Zheng L H, et al. Development status and trend of ship automatic berthing technology[J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(4): 293-304.)
- [4] Sawada R, Hirata K, Kitagawa Y, et al. Path following algorithm application to automatic berthing control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(2): 541-554.
- [5] Liao Y L, Jia Z H, Zhang W B, et al. Layered berthing method and experiment of unmanned surface vehicle based on multiple constraints analysis[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 47-60.
- [6] 毛健, 赵红东, 姚婧婧. 神经网络的发展及应用[J]. 电子设计工程, 2011, 19(24): 62-65.
(Mao J, Zhao H D, Yao J J. Application and prospect of artificial neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(24): 62-65.)
- [7] Namkyun I M, Segawa H A. A study on automatic ship berthing using parallel neural controller[J]. 関西造船協会論文集, 2001(236): 65-70.
- [8] 贾玉鹏, 尹勇, 朱忠显. 基于泊位坐标的无人船自主靠泊仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(10): 1910-1917.
(Jia Y P, Yin Y, Zhu Z X. Research on autonomous berthing for unmanned ship based on berth coordinates[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1910-1917.)
- [9] Zhang Q, Zhu G B, Hu X, et al. Adaptive neural network auto-berthing control of marine ships[J]. Ocean Engineering, 2019, 177: 40-48.
- [10] Xiong Y, Yu J J, Tu Y J, et al. Research on data driven adaptive berthing method and technology[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108620.
- [11] Shouji K, Ohtsu K. A study on the optimization of ship maneuvering by optimal control theory (3rd report)[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1993(174): 339-344.
- [12] Li S J, Liu J L, Negenborn R R, et al. Automatic docking for underactuated ships based on multi-objective nonlinear model predictive control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 70044-70057.
- [13] Maki A, Sakamoto N, Akimoto Y, et al. On broaching-to prevention using optimal control theory with evolution strategy (CMA-ES)[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(1): 71-87.
- [14] 陈虹, 刘志远, 解小华. 非线性模型预测控制的现状与问题[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 385-391.
(Chen H, Liu Z Y, Xie X H. Nonlinear model predictive control: The state and open problems[J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 385-391.)
- [15] Mizuno N, Uchida Y, Okazaki T. Quasi real-time optimal control scheme for automatic berthing[J]. IFAC-Papers Online, 2015, 48(16): 305-312.
- [16] Maki A, Sakamoto N, Akimoto Y, et al. Application of optimal control theory based on the evolution strategy (CMA-ES) to automatic berthing[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(1): 221-233.
- [17] Fossen T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011: 1-14.
- [18] Ahmed Y A, Hasegawa K. Automatic ship berthing using artificial neural network trained by consistent teaching data using nonlinear programming method[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(10): 2287-2304.
- [19] Park J Y, Kim N. Design of an adaptive backstepping controller for auto-berthing a cruise ship under wind loads[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(2): 347-360.
- [20] Tran V L, Im N. A study on ship automatic berthing with assistance of auxiliary devices[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, 4(3): 199-210.
- [21] Liu T F, Zhang P P, Jiang Z P. Event-triggered input-to-state stabilization of nonlinear systems subject to disturbances and dynamic uncertainties[J]. Automatica, 2019, 108: 108488.
- [22] 李美霖. 基于事件触发的船舶路径跟踪控制[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
(Li M L. Event-triggered based path following control of marine surface vessel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.)

作者简介

苑守正(1996—), 男, 博士生, 从事无人水面艇控制、自动靠泊等研究, E-mail: yuanshouzheng_heu@163.com;

刘志林(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能船舶、水面无人艇控制、机器人控制等研究, E-mail: liuzhilin@hrbeu.edu.cn;

郑林焯(1993—), 男, 博士生, 从事船舶减摇、船舶水动力分析等研究, E-mail: zlh@hrbeu.edu.cn;

孙雨鑫(1995—), 女, 博士生, 从事机器视觉、机器学习及图像分割等研究, E-mail: heu_syx@hrbeu.edu.cn.