



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



考虑状态约束与执行器饱和的水下机器人轨迹跟踪控制

王宇梁, 李一平, 李良

引用本文:

王宇梁, 李一平, 李良. 考虑状态约束与执行器饱和的水下机器人轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 1778–1786.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1776>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems

控制与决策. 2021, 36(5): 1040–1048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

考虑状态约束与执行器饱和的水下机器人轨迹跟踪控制

王宇梁^{1,2,3,4†}, 李一平^{1,2,3}, 李良^{1,2,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110016;
3. 辽宁省水下机器人重点实验室, 沈阳 110016;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对执行器饱和、模型参数不确定以及海流干扰等因素影响下的水下机器人, 提出一种考虑状态约束以及执行器饱和的轨迹跟踪控制器. 首先, 构建水下机器人水平面轨迹跟踪误差方程; 然后, 对载体模型参数不确定性产生的模型误差以及海流干扰, 设计一个非线性观测器进行估计并用于对控制器进行扰动补偿; 接着, 引入执行器饱和补偿系统、二阶滤波器以及滤波器误差补偿系统, 设计命令滤波反步滑模控制器来控制水下机器人的水平面轨迹跟踪; 最后, 严格验证命令滤波反步滑模控制器的稳定性并进行数值仿真, 验证所提出控制器的有效性.

关键词: 状态约束; 执行器饱和; 水下机器人; 反步滑模法; 轨迹跟踪

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1776

引用格式: 王宇梁, 李一平, 李良. 考虑状态约束与执行器饱和的水下机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1778-1786.

Trajectory tracking control of underwater vehicle considering state constraint and actuator saturation

WANG Yu-liang^{1,2,3,4†}, LI Yi-ping^{1,2,3}, LI Liang^{1,2,3,4}

- (1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Key Laboratory of Marine Robotics, Liaoning Province, Shenyang 110016, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For an underwater vehicle affected by actuator saturation, hydrodynamic parameters uncertainty and ocean current interference, a controller considering actuator saturation compensation and state constraint used trajectory tracking is proposed. Firstly, the horizontal trajectory tracking error equation of the underwater vehicle is constructed. Secondly, a non-linear observer is designed to estimate and compensate for model error resulting from uncertain hydrodynamic parameters and disturbances. Then, an actuator saturation compensation system, a second-order filter and a filter error compensation system are introduced and the command filtering backstepping sliding mode controller is designed to control the trajectory tracking of the underwater vehicle on the horizontal plane. Finally, the stability of the command-filtered backstepping sliding mode controller is strictly proved and the effectiveness of the controller is verified by numerical simulation.

Keywords: state constraint; actuator saturation; underwater vehicle; backstepping sliding mode control; trajectory tracking

0 引言

随着人类对海洋的不断开发, 利用水下机器人对海洋进行探索已成为重要的方法之一^[1]. 水下机器人可进行海洋科学调查、水下目标搜索等复杂任务, 而水下机器人在执行任务时, 能否准确地跟踪预定轨

迹是保证稳定可靠地完成所赋予使命的关键技术之一^[2-3]. 水下机器人所处的环境未知且复杂, 且在水下机器人的设计过程中, 其自身的状态量, 如速度、角速度等具有物理极限值. 同时, 水下机器人的执行器, 如推进器、舵等也具有饱和性. 诸如以上一系列实际问

收稿日期: 2022-10-13; 录用日期: 2023-03-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4602404, 2021YFC2801101).

责任编辑: 方勇纯.

†通讯作者. E-mail: wangyuliang2@sia.cn.

题均会影响水下机器人跟踪轨迹的控制性能,甚至会导致水下机器人运行不稳定的情况发生^[4].

针对轨迹跟踪控制方法,文献[5]提出了一种基于非线性干扰观测器(NDO)以及径向神经网络(RBF)的滑模控制器来解决水下机器人轨迹跟踪问题,具有很好的仿真实验效果,但是,该方法并未考虑水下机器人的状态约束问题,易导致状态物理量超出实际设计标准,从而影响控制效果.文献[6]提出了一种基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制,但是,预设性能方法所设置的预设性能包络直接影响系统的收敛效果,具有一定的局限性. Yang等^[7]利用反步法结合外界干扰观测器进行了水面艇轨迹跟踪控制器的设计,但是,该方法并未解决执行器的饱和问题.文献[8]结合障碍Lyapunov函数并利用反步法解决了在状态以及输入约束条件下的水面艇轨迹跟踪问题,获得了很好的控制效果.文献[9]利用非线性变换函数来约束轨迹跟踪误差并结合反步法和RBF解决了水面艇的轨迹跟踪问题,具有很好的鲁棒性.文献[10]利用扩展状态观测器(ESO)来对外界干扰进行观测并利用反步法解决了同样的问题,该方法保证了跟踪误差在有限时间内收敛.然而,反步法随着系统阶数的增加,会引发“微分爆炸”问题,增加控制器的计算复杂度^[11-12].为了解决上述问题,文献[13]利用命令二阶滤波器对反步法虚拟控制量的微分值进行了估计并利用自适应反步法对水下机器人进行了轨迹跟踪控制.文献[14]利用自适应反步滑模控制方法解决了欠驱动水面艇的轨迹跟踪问题.

基于对上述文献的分析可以发现,关于轨迹跟踪问题的研究大部分均建立于理想状态,不适用于实际工程.本文针对在执行器饱和、外界干扰以及状态约束条件下的水下机器人水平面轨迹跟踪问题进行研究,提出一种基于障碍型Lyapunov函数的命令反步滑模控制方法.首先,设计干扰观测器对水下机器人受到的海流干扰以及由模型不确定性引入的误差值进行估计;然后,利用对数型障碍Lyapunov函数设计反步滑模控制器,引入二阶命令滤波器对反步法虚拟控制量的微分值进行估计并利用滤波误差补偿系统对估计误差进行补偿,利用执行器饱和补偿系统来解决执行器的饱和问题;最后,验证控制器的稳定性并进行数值仿真.本文的主要内容如下.

1) 针对海流干扰以及模型参数的不确定性产生的模型误差,设计扩展状态干扰观测器来进行估计,估计误差在有限时间内收敛.

2) 利用对数型障碍Lyapunov函数设计命令滤波

反步滑模控制器来解决状态约束问题并保证水下机器人的轨迹跟踪误差在有限时间内收敛至原点邻域内.该控制器具有很好的控制效果.

1 模型建立与问题描述

1.1 水下机器人模型

由于水下机器人在水中的运动规律十分复杂,在实际实验中,常常将水下机器人的运动分解为水平面运动和垂直面运动.一般情况下,在执行海洋观测等任务时,水下机器人会先下潜至预定深度后再开始执行所赋予的使命^[15],因此,本文仅考虑水下机器人的水平面运动.图1为水下机器人水平面的轨迹跟踪示意图.其中: $E-\xi\eta$ 为大地坐标系, $G-xy$ 为载体坐标系, G 为水下机器人的重心, (ξ_G, η_G) 为水下机器人重心在大地坐标系下的坐标, d 为水下机器人重心到船部的距离.

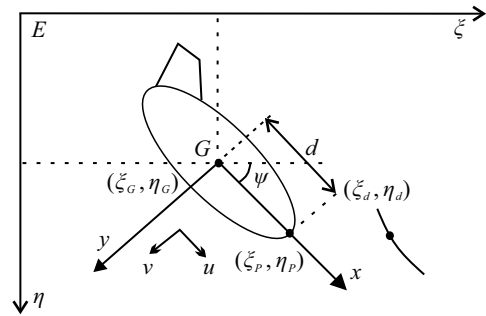


图1 水下机器人轨迹跟踪示意图

由文献[15-16],得到水下机器人在水平面的运动学和动力学方程如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{P} = J(P)v, \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v, \dot{v})v + G(P) = \tau + f. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $P = [\xi_G, \eta_G, \psi]^T$, ψ 为水下机器人的船向角; $J(P)$ 为坐标转换矩阵,即

$$J(P) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

满足 $J(P)^T J(P) = 1$; $v = [u, v, r]^T$, u 为水下机器人沿载体纵向坐标 x 轴的前进速度, v 为水下机器人沿载体横向坐标 y 轴的侧移速度, r 为水下机器人绕载体垂向坐标 z 轴的转船角速度, z 轴垂直于 xGy 平面; $M \in R^{3 \times 3}$ 为系统惯性矩阵(包含附加质量矩阵); $C(v) \in R^{3 \times 3}$ 为科氏向心力矩阵(包含附加质量引起的科氏向心力); $D(v, \dot{v}) \in R^{3 \times 3}$ 为水动力阻尼矩阵(包含一阶线性阻尼参数以及高阶阻尼参数); $G(P) \in R^{3 \times 3}$ 为水下机器人的恢复力矩阵; $\tau \in R^{3 \times 1}$ 为水平面3个自由度的力和力矩; $f \in R^{3 \times 1}$ 为水平面3个自由度的干扰项.

水下机器人配备的推进系统以及转向舵是具有饱和性的,往往实际的物理系统输出量 τ_c 达不到理论控制量 τ ,表达式如下式所示:

$$\tau = \begin{cases} \tau_c^{\max}, & \tau \geq \tau_c^{\max}; \\ \tau_c, & \tau_c^{\min} < \tau < \tau_c^{\max}; \\ \tau_c^{\min}, & \tau \leq \tau_c^{\min}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: τ_c^{\max} 为执行器可提供的最大输出量, τ_c^{\min} 为执行器可提供的最小输出量。

由于水下机器人所处的作业环境极其复杂,水下机器人的水动力参数会发生变化,这将影响控制器对水下机器人的控制效果,降低控制器的鲁棒性^[17]。因此,在设计控制器时,应考虑到水下机器人的模型参数不确定性引起的模型参数误差,式(1)变为

$$(M + \Delta M)\dot{v} + (C(v) + \Delta C)v + (D(v, \dot{v}) + \Delta D)v + G(P) = \tau + f. \quad (4)$$

其中: $\Delta M \in R^{3 \times 3}$ 为水下机器人惯性矩阵的系数时变误差, $\Delta C \in R^{3 \times 3}$ 为水下机器人科氏向心力矩阵的时变误差, $\Delta D \in R^{3 \times 3}$ 为水动力阻尼矩阵的时变误差。本文将模型参数不确定性所引起的误差同样视为外界干扰 $\omega \in R^{3 \times 1}$,则水下机器人所受的外界总体干扰为

$$\omega = f - \Delta M\dot{v} - \Delta Cv - \Delta Dv. \quad (5)$$

1.2 水平面轨迹跟踪误差方程

图1中, (ξ_d, η_d) 为水下机器人的期望位置坐标。本文将水下机器人艏部作为参考点。在大地坐标系下,轨迹跟踪误差 $E = [E_x, E_y, E_\psi]^T$ 为

$$\begin{cases} E_x = \xi_G + d \cos(\psi) - \xi_d, \\ E_y = \eta_G + d \sin(\psi) - \eta_d, \\ E_\psi = \psi_P - \psi_d. \end{cases} \quad (6)$$

考虑到外界干扰、执行器饱和以及水下机器人状态约束的条件下,本文将设计合理的控制器使得轨迹跟踪误差 E 在有限时间内收敛至原点邻域内,保证水下机器人完成水平面的轨迹跟踪。

1.3 引理与假设

引理1 对于 $\forall x \in R, \forall \varepsilon_0 \in (0, +\infty)$ 和 $\forall \alpha \in (0, 1)$,满足下式^[18-19]成立:

$$\|x\|^2 \geq \frac{\varepsilon_0^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{\alpha} ((\|x\|^2)^\alpha - (1-\alpha)\varepsilon_0). \quad (7)$$

引理2 考虑到非线性系统 $\dot{x} = f(x)$,若存在Lyapunov函数 $V(x)$ 且导数满足 $\dot{V}(x) \leq -cV(x)^{p_1} + \vartheta$ (其中:实数 $c > 0, p_1 \in (0, 1), \vartheta \in (0, +\infty)$),则这个非线性系统是半全局一致有界收敛的,跟踪误差收敛到一个小的集合内 Ω ,集合为

$$\Omega = \left\{ \lim_{t \rightarrow \infty} |V(x)| \leq \left(\frac{\vartheta}{c(1-\theta)} \right)^{\frac{1}{p_1}} \right\}, \quad (8)$$

其中 $\theta \in (0, 1)$ 。到达集合 Ω 的时间是有界的,满足^[20]

$$T \leq \frac{1}{c\theta(1-p_1)} \left(V(x(0))^{1-p_1} - \left(\frac{\vartheta}{c(1-\theta)} \right)^{\frac{1-p_1}{p_1}} \right). \quad (9)$$

引理3 对于 $\forall a, b \in R$ 且 $\exists \epsilon > 0$,满足下式^[21]:

$$ab \leq \frac{\epsilon^p}{p} |a|^p + \frac{1}{q\epsilon^q} |b|^q. \quad (10)$$

其中: $p > 1, q > 1$ 且 $(p-1)(q-1) = 1$ 。

引理4 考虑到非线性系统 $\dot{x} = f(x)$,若存在Lyapunov函数 $V(x)$ 且导数满足 $\dot{V}(x) \leq -2\mu V(x) + \sigma$ ($\mu > 0, \sigma > 0$),则该系统是有限时间收敛的,且收敛域有界且半径任意小,该收敛域的集合 Ω ^[20-21]为

$$\Omega = \{r \in R \mid \|r\| \leq \chi, \chi > \sigma\}, \quad (11)$$

且Lyapunov函数 $V(t)$ 最终的收敛集合为

$$V(t) \in \left[0, \frac{\sigma}{2\mu} + \left[V(x(0)) - \frac{\sigma}{2\mu} \right] e^{-2\mu t} \right]. \quad (12)$$

引理5 对于 $\forall x \in R$,满足 $|x| \leq \chi$,则下列不等式成立:

$$x^2 \geq \frac{1}{2} \log \left(\frac{\chi^2}{\chi^2 - x^2} \right). \quad (13)$$

假设1 水下机器人所受海流干扰有界, $\|f\| \leq \bar{f}$,水下机器人模型不确定性所产生的的变化量有界, $\|\Delta M\| \leq M_m, \|\Delta C\| \leq C_m, \|\Delta D\| \leq D_m$ 。由式(6)可知,外界干扰 ω 有界,上述界值均为正数且未知。

假设2 期望轨迹 (ξ_d, η_d) 连续且有界,其一阶导数、二阶导数连续且有界。

2 状态约束下的轨迹跟踪控制器设计

2.1 干扰观测器的设计

为了补偿总体扰动 ω 对水下机器人轨迹跟踪的影响,参考文献[7, 10]设计干扰观测器,有

$$\begin{cases} \dot{f}_1 = -2K_\omega f_1 + K_\omega f_2 + K_\omega^\top K_\omega v, \\ \dot{f}_2 = -K_\omega f_1 - K_\omega (M^{-1}(-C(v)v - D(v, \dot{v})v - G(P) + \tau)), \\ \dot{\hat{\omega}} = -f_1 + f_2 + K_\omega v. \end{cases} \quad (14)$$

其中: $f_1, f_2 \in R^{3 \times 1}$ 为干扰观测器的系统内部变量, $K_\omega \in R^{3 \times 3}$ 为系统的正定参数增益对角矩阵, $\hat{\omega} \in R^{3 \times 1}$ 为干扰估计量。该非线性干扰观测器的估计误差可在有限时间内收敛。证明过程如下。

证明 定义干扰估计误差为 $\tilde{\omega} \in R^{3 \times 1}$,有

$$\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}. \quad (15)$$

定义Lyapunov函数

$$V_\omega = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^\top I \tilde{\omega}, \quad (16)$$

其中 $I \in R^{3 \times 3}$ 为单位对角矩阵。由式(14)和(15),得到

V_ω 的导数为

$$\dot{V}_\omega = \tilde{\omega}^\top I \dot{\tilde{\omega}} = \tilde{\omega}^\top I \dot{\omega} - \tilde{\omega}^\top K_\omega \tilde{\omega}. \quad (17)$$

由引理1~引理3,并对式(17)展开,得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_\omega &\leq -\tilde{\omega}^\top K_\omega \tilde{\omega} + \frac{\epsilon}{2} \tilde{\omega}^\top I \dot{\tilde{\omega}} + \frac{1}{2\epsilon} \dot{\tilde{\omega}}^\top I \dot{\omega} \leq \\ &-\left[\lambda_{\min}(K_\omega) - \frac{\epsilon}{2}\right] \tilde{\omega}^\top I \dot{\tilde{\omega}} + \frac{1}{2\epsilon} \dot{\tilde{\omega}}^\top I \dot{\omega} \leq \\ &-2^\alpha \left[\lambda_{\min}(K_\omega) - \frac{\epsilon}{2}\right] \frac{\epsilon_0^{1-\alpha}}{\alpha} V_\omega^\alpha + \\ &\left[\lambda_{\min}(K_\omega) - \frac{\epsilon}{2}\right] (1-\alpha)\epsilon_0 I + \frac{1}{2\epsilon} \dot{\tilde{\omega}}^\top I \dot{\omega} \leq \\ &-cV_\omega^\alpha + \vartheta. \end{aligned} \quad (18)$$

其中:参数 $\alpha \in (0, 1)$, $\lambda_{\min}(K_\omega)$ 为参数矩阵 K_ω 的最小特征值. 由引理2可知,必定存在合适的 α 、 ϵ 使得式(18)成立,则该干扰观测器的估计误差是在有限时间内收敛. □

2.2 命令滤波反步滑模控制器设计

由于反步设计法需要对虚拟控制量进行微分运算,这会导致随着被控对象系统阶数的增加,其微分运算的复杂度也会增加.同时,利用离散数值法计算微分项也存在较为明显的数值误差.为了解决该问题,本文引入二阶命令滤波器对虚拟控制量的微分值进行估计,定义^[11-12]如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -2\zeta\omega x_2 - \omega^\top \omega(x_1 - \alpha). \end{cases} \quad (19)$$

其中: x_1 为对反步法虚拟控制量的估计值 α^c ; x_2 为对虚拟控制量的导数估计值 $\dot{\alpha}^c$; α 为二阶滤波器的输入值,即期望的虚拟控制量;滤波器参数 $\zeta \in (0, 1)$; $\omega \geq 0$. 理论上,选择合适的参数可使得滤波器估计误差趋近于0. 本文利用二阶滤波器对输入信号 $0.4 \sin(\pi t) + 0.3 \cos(\pi t)$ 及其微分信号进行估计. 图2为二阶滤波器对输入信号微分值估计与离散数值法计算微分值的对比曲线. 由图2可见,利用二阶滤波器对信号微分值的估计效果较好,但是仍然存在一定的误差. 因此,引入滤波误差补偿系统是有必要的. 本文引入误差补偿系统的定义^[11-12]如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = -K_\delta \delta_1 + J(\eta)(\alpha^c - \alpha) + J(\eta)\delta_2, \\ \dot{\delta}_2 = 0. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\delta_1, \delta_2 \in R^{3 \times 1}$ 为系统状态变量; $K_\delta \in R^{3 \times 3}$ 为正定的系统增益对角矩阵; $\alpha^c \in R^{3 \times 1}$ 为滤波器对虚拟控制量的估计值,即输出量 x_1 ; $\alpha \in R^{3 \times 1}$ 为反步法的虚拟控制量,即滤波器的输入值. 图3为利用二阶滤波器与二阶滤波器结合滤波误差补偿系统进行对比来测试滤波误差补偿系统的性能效果. 由图3可见,

在二阶滤波器的基础上增加滤波误差补偿系统会减少二阶滤波器对输入信号微分值的估计误差. 误差值随着时间的增加逐渐减小为0.

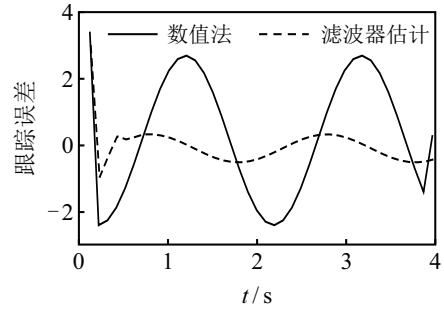


图2 二阶滤波器与离散数值法对信号微分值的估计误差

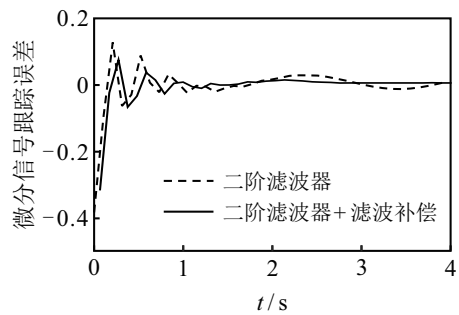


图3 滤波误差补偿系统效果

水下机器人的状态向量 $\rho = [P + W, v]^\top$ 是有物理限制的: $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$, 其中 $W = [d \cos(\psi), d \sin(\psi), 0]$. 为了保证水下机器人能够在状态变量的受限情况下,准确地跟踪预设轨迹,本文引入对数型障碍Lyapunov函数^[22],即

$$V(e) = \frac{q(e)}{2} \log\left(\frac{e_{\max}^2}{e_{\max}^2 - e^2}\right) + \frac{1 - q(e)}{2} \log\left(\frac{e_{\min}^2}{e_{\min}^2 - e^2}\right). \quad (21)$$

$$q(e) = \begin{cases} 1, & e \geq 0; \\ 0, & e < 0. \end{cases} \quad (22)$$

其中: ρ_d 为期望状态, $e_{\min} = \rho_{\min} - \rho_d$ 为最小允许误差, $e_{\max} = \rho_{\max} - \rho_d$ 为最大允许误差.

基于上述介绍,现定义系统跟踪误差状态变量为 $z_1 = [z_{1,x}, z_{1,y}, z_{1,\psi}]^\top$, $z_2 = [z_{2,u}, z_{2,v}, z_{2,r}]^\top$, 有

$$\begin{cases} z_1 = E - \delta_1, \\ z_2 = v - \alpha_c - \delta_2. \end{cases} \quad (23)$$

根据水下机器人实际的物理量约束选择合适的约束条件,即

$$\begin{cases} z_1^{\min} = E_{\min} - \delta_1, \\ z_1^{\max} = E_{\max} - \delta_1, \\ z_2^{\min} = v_{\min} - \alpha_c - \delta_2, \\ z_2^{\max} = v_{\max} - \alpha_c - \delta_2. \end{cases} \quad (24)$$

其中: $E_{\min} < 0$ 为位置变量的最小允许误差, $E_{\max} > 0$ 为位置变量的最大允许误差.

首先,由式(21)和(24)构建位置误差的对数型 Lyapunov 函数 V_1 并进行求导,结合式(1)、(20)和(23),代入(21),得到

$$\dot{V}_1 = \frac{z_1^\top}{H_1} (J(\eta)v - \dot{\eta}_d + K_\delta \delta_1 - J(\eta)\alpha_c + J(\eta)\alpha - J(\eta)\delta_2 + Q). \quad (25)$$

其中:参数 $H_1 = (z_1^k)^\top z_1^k - z_1^\top z_1$, 参数 $k = \{\max, \min\}$; $Q = [-dr \sin(\psi), dr \cos(\psi), 0]^\top$. 将 α 视为该系统的虚拟控制输入量,设计该动力学虚拟控制量为

$$\alpha = J^\top(\eta)(-K_1(z_1 + \delta_1) + \dot{\eta}_d - Q), \quad (26)$$

式中 $K_1 \in R^{3 \times 3}$ 为正定的对角增益矩阵. 将式(23)和(26)代入(25),得到

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{H_1} (-z_1^\top K_1 z_1 + z_1^\top J(\eta)z_2). \quad (27)$$

当误差向量 $z_2 = 0$ 时,该子系统是全局稳定收敛的,但是,并不能保证向量 $z_2 = 0$,因此,为误差向量 z_2 设计控制器使得 z_2 收敛至 0.

同样,定义速度、角速度误差对数型 Lyapunov 函数 V_2 并结合式(1)、(20)和(23)求导后,得到

$$\dot{V}_2 = \frac{z_2^\top}{H_2} (M^{-1}(-C(v)v - D(v, \dot{v})v - G(P) + \tau + \omega) - \dot{\alpha}_c), \quad (28)$$

其中 $H_2 = (z_2^k)^\top z_2^k - z_2^\top z_2$.

式(28)中出现了水下机器人三自由度方向的执行器输入量 τ . 考虑到实际情况下执行器的饱和问题,为了减少执行器输入饱和对控制系统的影响,构建补偿辅助系统如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = -K_\lambda \lambda - \frac{0.5\Delta\tau^\top I \Delta\tau - L|z_2|}{\|\lambda\|^2} \lambda + \Delta\tau, \\ \|\lambda\| \geq \gamma; \\ \dot{\lambda} = 0, \|\lambda\| < \gamma. \end{cases} \quad (29)$$

其中:参数 $K_\lambda \in R^{3 \times 3}$ 和 $L \in R^{3 \times 3}$ 均为系统的正定参数增益对角矩阵, $\lambda \in R^{3 \times 1}$ 为系统内部状态变量, $\Delta\tau = \tau - \tau_c \in R^{3 \times 1}$, $\gamma \in R^{3 \times 1}$ 为每个元素任意小的正数列矩阵.

通过对上述各系统的分析,设计考虑状态约束与执行器饱和的命令滤波反步滑模轨迹跟踪控制器为

$$\begin{aligned} \tau_c = & -M \frac{H_2}{H_1} J(\eta)z_1 + C(v)v + D(v, \dot{v})v + \\ & G(P) - \dot{\omega} + M\dot{\alpha}^c - MH_2 L \text{sat}(z_2) - \\ & MH_2 K_2 z_2 - \lambda. \end{aligned} \quad (30)$$

其中: $K_2 \in R^{3 \times 3}$ 为正定参数对角矩阵, sat 为饱和函数,即

$$\text{sat}(z_2) = \begin{cases} 1, & z_2 \geq \Delta; \\ kz_2, & -\Delta < z_2 < \Delta, k = \frac{1}{\Delta}; \\ -1, & z_2 \leq -\Delta. \end{cases} \quad (31)$$

式中 $\Delta > 0$ 为滑模切换面的边界层参数. 滑模控制采用符号函数 $\text{sign}(x)$ 使得状态变量在切换面进行切换直至收敛至 0,但是,滑模控制会使得系统产生抖振现象. 为了减少由于滑模控制所产生的抖振,所提出命令滤波反步滑模控制器采用饱和函数 $\text{sat}(x)$ 来代替符号函数 $\text{sign}(x)$,在一定程度上对抖振现象有所缓解.

2.3 命令滤波反步滑模控制稳定性分析

定理 1 考虑到水下机器人的物理状态约束以及执行器具有饱和性的问题,在海流干扰以及模型参数不确定的影响下,设计干扰观测器(14)对海流干扰以及模型参数不确定所引起的模型误差进行估计. 在满足水下机器人自身物理特性的同时,所设计命令滤波反步滑模控制器(30)结合干扰观测器(14)可确保水下机器人稳定地跟踪预设轨迹,跟踪误差在有限时间内收敛至以原点为中心,半径任意小的收敛域内.

证明 构建控制器的 Lyapunov 函数为

$$V = V_1 + V_2 + \frac{1}{2} \lambda^\top I \lambda + \frac{1}{2} \tilde{\omega}^\top I \tilde{\omega}. \quad (32)$$

结合式(17)、(25)、(28)和(29)对(32)求导并展开,会出现 3 个自由度的理论控制量 τ . 将 $\tau = \tau_c + \Delta\tau$ 代入式(32),并由引理 3~引理 5,得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -z_1^\top \frac{K_1}{H_1} z_1 + z_2^\top \left(\frac{(\epsilon_1 + 1)M^{-1}M^{-\top}}{2(H_2)^2} - K_2 \right) z_2 + \\ & \lambda^\top (0.5I - K_\lambda) \lambda + \tilde{\omega}^\top \left(\frac{\epsilon_2}{2} - K_\omega \right) \tilde{\omega} + \frac{1}{2\epsilon_2} \dot{\omega}^\top I \dot{\omega} \leq \\ & -2 \min \left[\frac{\lambda_{\min}(K_1)}{H_1}, \lambda_{\min} \left(\frac{(\epsilon_1 + 1)M^{-1}M^{-\top}}{2(H_2)^2} - K_2 \right), \right. \\ & \left. \lambda_{\min}(0.5I - K_\lambda), \lambda_{\min} \left(\frac{\epsilon_2}{2} - K_\omega \right) \right] \times \\ & (z_1^\top I z_1 + z_2^\top I z_2 + \lambda^\top I \lambda + \tilde{\omega}^\top I \tilde{\omega}) + \frac{1}{2\epsilon_2} \dot{\omega}^\top I \dot{\omega} \leq \\ & -2\mu_2 V + \sigma_2. \end{aligned} \quad (33)$$

其中: $\epsilon_1, \epsilon_2 > 0$, 选择合适的参数 $K_1, K_2, K_\lambda, K_\omega$ 使得 $\mu_2 > 0$ 且 $\sigma_2 \geq 0$, 则该系统是有限时间内收敛的. \square

图 4 为所提出方法的控制系统框图.

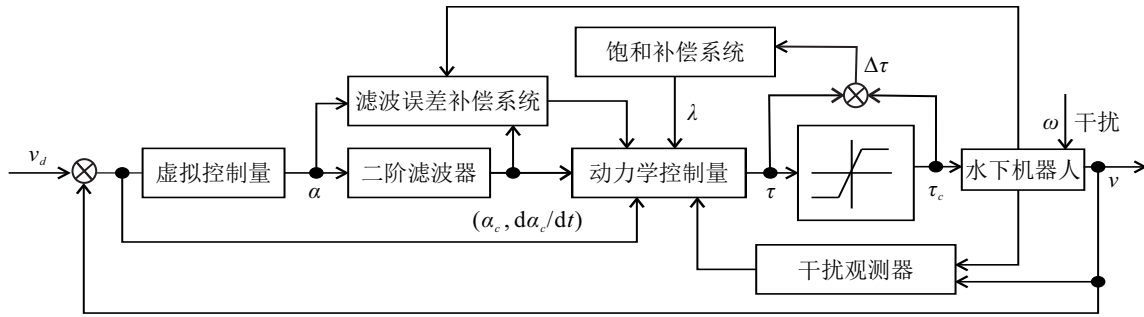


图4 控制系统框图

3 数值仿真

为了验证所提出命令滤波反步滑模控制器的有效性以及控制性能,利用Matlab结合“探索100”自主水下机器人的水动力参数以及执行器参数对所提出命令滤波反步滑模控制器进行数值仿真实验。

本文将传统的反步法(BC)与所提出命令滤波反步滑模方法(CFBSC)进行对比来验证所提出控制器具有更好的性能.为了直观地对比两种控制器的轨迹跟踪效果,设计期望跟踪轨迹为 $[3 \sin(0.1t), 2 \cos(0.1t)]^T \text{m}$;假设水下机器人所处深度的海流干扰为

$$\begin{bmatrix} 0.01 \sin(0.1t) + 0.2 & 0.01 \cos(0.1t) + \\ 0.2 & 0.01 \cos(0.1t) \sin(0.1t) + 0.1 \end{bmatrix}^T \text{m};$$

仿真平台的模型参数变化范围为 $M_m = 0.2, C_m = 0.4, D_m = 0.4$.“探索100”自主水下机器人的最大速度为3节,设计仿真平台的各自由度的物理量约束为 $u \in [0, 1.6] \text{m/s}, v \in [-0.1, 0.1] \text{m/s}, r \in [-0.1, 0.1] \text{rad/s}$;各自由度的允许误差范围为 $E_x \in [-4, 4] \text{m}, E_y \in [-4, 4] \text{m}, E_\psi \in [-0.174, 0.174] \text{rad}$;根据多次实验结果对比,选择干扰观测器的正定参数增益矩阵为 $K_\omega = \text{diag}([10, 10, 10])$,命令二阶滤波器参数选择

为 $\zeta = \text{diag}([0.707, 0.707, 0.707]), \omega_n = \text{diag}([100, 100, 100])$,二阶滤波器补偿系统的正定参数矩阵为 $K_\delta = \text{diag}([1, 1, 1])$,控制器参数矩阵 $K_1 = \text{diag}([1, 1, 1]), K_\lambda = \text{diag}([15, 15, 15]), K_2 = \text{diag}([35, 35, 35]), L = \text{diag}([0.1, 0.1, 0.1])$.仿真时间为100s,仿真步长为0.01.

表1为纵向进退自由度、横向侧移自由度和转艏自由度的控制性能指标,分别对比了BC与CFBSC两种控制器的调节时间、暂态最大误差值、平方误差积分指标以及时间乘平方误差积分指标.其中:调节时间表示某自由度的跟踪误差值第1次达到允许误差 $(-0.05 \text{m} \sim 0.05 \text{m})$ 或 $(-0.0087 \text{rad} \sim 0.0087 \text{rad})$ 范围内的时间;暂态最大误差值为误差调节的暂态过程中所产生的最大误差值;平方误差积分指标用来衡量响应速度以及系统的震荡大小,该指标的表达式为

$$J_1 = \int_0^t e^2(t) dt. \tag{34}$$

时间乘平方误差积分指标用来衡量系统瞬态响应后出现的误差大小,表达式为

$$J_2 = \int_0^t te^2(t) dt. \tag{35}$$

表1 控制性能指标对比

自由度	控制器	调节时间/s	暂态最大误差值	平方误差积分量- J_1	时间乘平方误差积分量- J_2
纵向进退	BC	20.8	0.8/m	70.1122	1.35×10^4
	CFBSC	27.5	-0.0783/m	1.1531	17.8310
横向侧移	BC	38.7	0.14/m	297.9548	1.3508×10^4
	CFBSC	48.9	0.0011/m	206.5067	2.5221×10^3
转艏	BC	1.4	0.014/rad	0.0136	0.1462
	CFBSC	1.6	0.0096/rad	0.0057	0.0811

图5为BC和CFBSC两种控制器控制水下机器人轨迹跟踪的轨迹跟踪控制效果.由图5可见,所提出CFBSC控制器相较于BC控制器,在轨迹跟踪的初始阶段,跟踪效果更为平滑,超调很小.图6为水下机器人合速度数值对比,图中曲线表明了CFBSC控制器所产生的合速度物理量相较于BC控制器稳定性

更好且收敛速度更快,BC控制器所产生的合速度在收敛后的部分区域内仍然存在较大误差.造成上述控制效果的原因有两点:1)BC控制器未采用二阶滤波器对虚拟控制进行估计和补偿,而是直接利用离散数值法计算虚拟控制量的微分量,这直接影响了水下机器人对轨迹的跟踪效果,所以跟踪误差以及合速度

的跟踪误差会较大;而CFBSC控制采用二阶滤波器对虚拟控制量进行估计并对误差进行补偿,减少了对虚拟控制量的计算误差,所以跟踪效果要好于BC控制器的跟踪效果. 2)在海流干扰以及模型参数不确定性的影响下,BC控制器的控制效果受到扰动的影响会产生一定的偏差,而CFBSC控制器中包含滑模控制项,其具有鲁棒性强的特点.综上所述,CFBSC相较于BC控制器具有更好的鲁棒性和稳定性.图7中,转艏角速度的数值对比表明了BC控制器与CFBSC控制器的期望角速度跟踪效果相近,均可收敛到期望值.图8~图10分别为纵向进退自由度、横向侧移自由度以及转艏自由度的干扰估计值,结果表明:对于外界干扰估计,在使用相同的干扰观测器时,相较于BC控制器,CFBSC控制器的干扰估计值以及执行器输入值跳变少,收敛时间更短.这是因为CFBSC控制器的跟踪误差更小使得CFBSC控制器中的干扰观测器效果更好.同时,可以看出观测器是有限时间内收敛的,具有较好的稳定性.

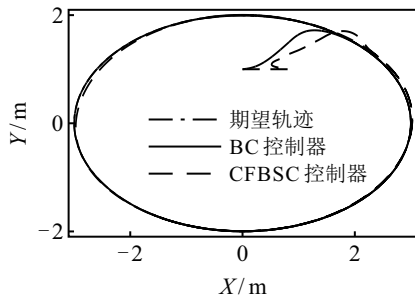


图5 BC与CFBSC的轨迹跟踪效果

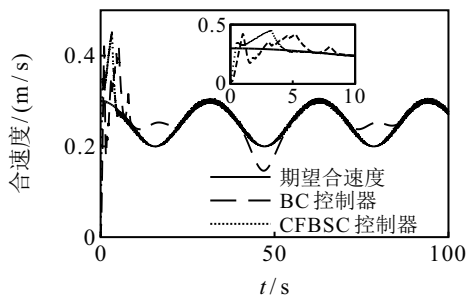


图6 合速度数值对比效果

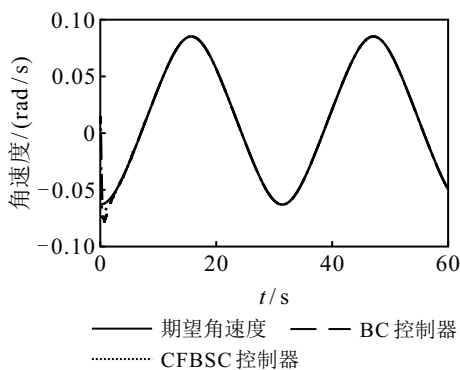


图7 角速度数值对比效果

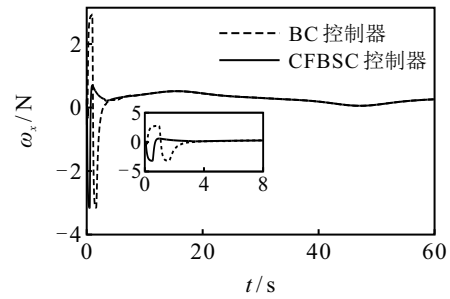


图8 纵向进退自由度外界干扰估计值

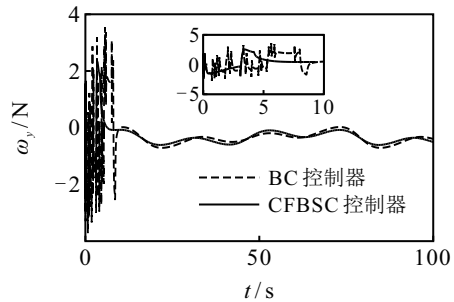


图9 横向侧移自由度外界干扰估计值

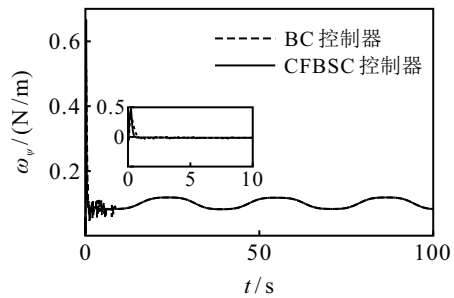


图10 转艏自由度外界干扰估计值

图11为纵向进退自由度的跟踪误差值.由表1和图11可知,水下机器人对纵向进退自由度利用BC控制器所产生暂态最大误差量为0.8m,大于CFBSC控制器所产生的暂态最大误差值-0.0783m;BC控制器的平方误差积分指标为70.1122,CFBSC控制器的平方误差积分为1.1531,其远远小于BC控制的指标,这表明CFBSC控制器具有更快的响应速度且更加稳定;CFBSC控制器的时间乘平方误差积分指标为17.8310,远远小于BC控制器的时间乘平方误差积分为 1.35×10^4 ,这表明CFBSC控制器稳态误差更小.总体表明了纵向进退自由度中CFBSC控制器相较于BC控制器具有响应速度快、稳定性好、鲁棒性强的特点,但是,BC控制器的调节时间快于CFBSC控制器6.7s.图12为横向侧移自由度的轨迹跟踪误差曲线.对于横向侧移自由度的跟踪控制,由表1可知,水下机器人利用CFBSC控制器调节时间更大,暂态最大误差量小,而BC控制器的跟踪误差呈现无规律波动,稳定性较差,但是误差波动在可接受范围内,对轨迹的跟踪无较大的明显偏差,CFBSC控制器的平方误差积分指标以及时间乘平方误差积分指

标均好于BC控制. 对于转艏自由度控制性能,由图13和表1数据可知,CFBSC控制器的暂态最大误差更小,BC控制器与CFBSC控制器的两项误差积分指标差别不大,BC控制器的调节时间快于CFBSC控制器0.2s,误差均收敛至以原点为中心,半径极小(小于 0.015°)的邻域内. 总体上分析可以看出,CFBSC控制器的调节时间相较于BC控制器均有增加,其原因有以下两点:1)CFBSC控制器使用了二阶滤波器和滤波误差补偿系统,二阶滤波器的估计收敛是具有一定时间的,因此,增加了一定的轨迹误差调节时间. 2)所设计CFBSC控制器是基于障碍Lyapunov函数设计的. 在状态受限区域的边界处,CFBSC控制器所需的控制量通常会很大甚至趋近于无穷. 但是,BC控制器所使用的常规Lyapunov函数不会出现此情况. 在初始的系统调节阶段,跟踪误差较大,这会导致系统状态处于受限边界. 由于水下机器人执行器的饱和性,CFBSC控制器可能会不足以提供所需的控制量大小. 即使水下机器人的执行器以饱和状态输出,但是仍然会增加系统的调节时间,直至系统的误差逐渐减小. BC控制器不具有状态受限的情况,在相同的跟

踪误差条件下,BC控制器所需的控制量更小. 在大部分情况下,执行器的输出量是可以满足BC控制器所需的控制量. 因此,BC控制器的调节时间更短. 综上所述,CFBSC控制器的调节时间相较于BC控制器有所增加.

综上所述,在考虑水下机器人状态约束、模型参数不确定、海流干扰以及执行器饱和的影响因素下,所提出命令反步滑模控制器的轨迹跟踪误差收敛平缓使得跟踪轨迹更平滑. 相较于传统的反步法具有更好的控制性能以及控制精度,在相同的干扰条件下,命令滤波反步滑模控制器具有更好的鲁棒性.

4 结论

针对水下机器人在进行水平面轨迹跟踪时,本文设计了干扰观测器对海流干扰和模型参数不确定所引入的模型误差进行估计. 由于水下机器人的物理量状态约束以及执行器饱和问题,利用对数型障碍Lyapunov函数并引入执行器饱和补偿系统,使用反步滑模法设计控制器对轨迹跟踪问题进行解决. 同时,引入二阶命令滤波器来估计虚拟控制量的微分值并对滤波器估计误差进行补偿. 通过控制器的稳定性验证以及数值仿真对控制器的有效性进行了验证. 仿真结果表明,所提出命令反步滑模控制器可使得水下机器人在水平面稳定地跟踪期望轨迹,达到了预期效果,具有良好的控制性能.

参考文献(References)

- [1] 李硕, 唐元贵, 黄琰, 等. 深海技术装备研制现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1316-1325. (Li S, Tang Y G, Huang Y, et al. Review and prospect for Chinese deep-sea technology and equipment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(12): 1316-1325.)
- [2] 秦洪德, 孙延超. AUV关键技术与发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(12): 25-28. (Qin H D, Sun Y C. Analysis of the status and development of foreign AUV[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(12): 25-28.)
- [3] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV智能化现状与发展趋势[J]. 机器人, 2020, 42(2): 215-231. (Huang Y, Li Y, Yu J C, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. Robot, 2020, 42(2): 215-231.)
- [4] Kadiyam J, Mohan S, Deshmukh D. Control of a vectorial propulsion underwater vehicle considering thruster hydrodynamics constraints and actuator saturation[C]. Global Oceans. Singapore, 2020: 1-10.
- [5] 李鑫滨, 王鹏, 骆曦, 等. 输入受限下欠驱动AUV轨

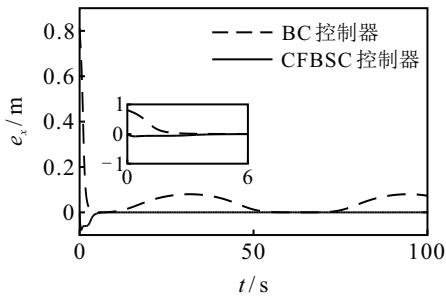


图 11 纵向进退自由度轨迹跟踪误差值

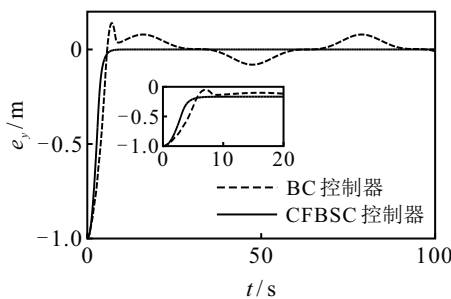


图 12 横向侧移自由度轨迹跟踪误差值

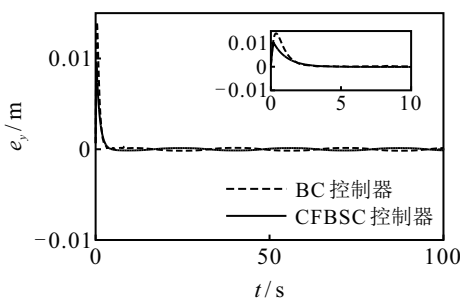


图 13 转艏自由度轨迹跟踪误差值

- 迹跟踪滑模控制[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(1): 44-53.
(Li X B, Wang P, Luo X, et al. Underactuated AUV trajectory tracking sliding mode control with input limitation[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2022, 30(1): 44-53.)
- [6] 华长春, 陈传虎, 陈健楠, 等. 基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1160-1166.
(Hua C C, Chen C H, Chen J N, et al. Prescribed performance control of underwater robot based on disturbance observer[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1160-1166.)
- [7] Yang Y, Du J L, Liu H B, et al. A trajectory tracking robust controller of surface vessels with disturbance uncertainties[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(4): 1511-1518.
- [8] Qin H D, Li C P, Sun Y C, et al. Finite-time trajectory tracking control of unmanned surface vessel with error constraints and input saturations[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(16): 11472-11495.
- [9] Zhu G B, Du J L, Kao Y G. Robust adaptive neural trajectory tracking control of surface vessels under input and output constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(13): 8591-8610.
- [10] Wang T Q, Liu Y T, Zhang X F. Extended state observer-based fixed-time trajectory tracking control of autonomous surface vessels with uncertainties and output constraints[J]. ISA Transactions, 2022, 128: 174-183.
- [11] Dong W J, Farrell J A, Polycarpou M M, et al. Command filtered adaptive backstepping[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(3): 566-580.
- [12] Lin M H, Zhang L, Ding Y, et al. Command filtering backstepping control of flexible multi-joint manipulator with output constraint and error compensation[C]. IEEE the 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference. Chongqing, 2022: 1557-1561.
- [13] Jiang Y B, Guo C, Yu H M. Adaptive trajectory tracking control for an underactuated AUV based on command filtered backstepping[C]. The 37th Chinese Control Conference. Wuhan, 2018: 3710-3715.
- [14] Zhao Y S, Sun X J, Wang G F, et al. Adaptive backstepping sliding mode tracking control for underactuated unmanned surface vehicle with disturbances and input saturation[J]. IEEE Access, 2020, 9: 1304-1312.
- [15] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000: 292-301.
(Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000: 292-301.)
- [16] Fossen T I. Maneuvering theory[C]. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: John Wiley & Sons, 2011: 109-132.
- [17] Qiao L, Zhang W D. Double-loop integral terminal sliding mode tracking control for UUVs with adaptive dynamic compensation of uncertainties and disturbances[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(1): 29-53.
- [18] Li H Y, Zhao S Y, He W, et al. Adaptive finite-time tracking control of full state constrained nonlinear systems with dead-zone[J]. Automatica, 2019, 100: 99-107.
- [19] Meng Y Z, Jiang B, Qi R Y. Adaptive fault-tolerant attitude tracking control of hypersonic vehicle subject to unexpected centroid-shift and state constraints[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 95: 105515.
- [20] Wang F, Chen B, Lin C, et al. Adaptive neural network finite-time output feedback control of quantized nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(6): 1839-1848.
- [21] Wang H Q, Chen B, Lin C. Adaptive neural tracking control for a class of stochastic nonlinear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(7): 1262-1280.
- [22] Tee K P, Ge S S, Tay E H. Barrier Lyapunov Functions for the control of output-constrained nonlinear systems[J]. Automatica, 2009, 45(4): 918-927.

作者简介

王宇梁(1997—), 男, 博士生, 从事水下机器人控制的研究, E-mail: wangyuliang2@sia.cn;

李一平(1963—), 女, 研究员, 从事水下机器人控制的研究, E-mail: lyp@sia.cn;

李良(1993—), 男, 博士生, 从事水下机器人控制的研究, E-mail: liliang@sia.cn.