

控制与决策

Control and Decision

基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制

华长春, 陈传虎, 陈健楠, 张宇

引用本文:

华长春, 陈传虎, 陈健楠, 张宇. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1652>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 363–370 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

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>

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

基于干扰观测器的水下机器人预定性能控制

华长春[†], 陈传虎, 陈健楠, 张宇

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对受外界干扰的水下机器人, 提出一个预定性能控制器. 首先, 针对水下机器人的外界干扰, 设计一个干扰观测器并且估计误差在有限时间内收敛至零; 然后, 利用干扰观测器进行前馈补偿, 基于一种指数型障碍李雅普诺夫函数设计一个非奇异快速积分终端滑模控制器, 使得水下机器人的轨迹跟踪误差在有限时间内收敛至零并且满足预定的性能要求; 最后, 严格地证明控制系统的稳定性, 并通过仿真实例验证所提方法的有效性.

关键词: 预定性能控制; 有限时间干扰观测器; 非奇异快速积分终端滑模; 水下机器人

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1652

引用格式: 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.

Prescribed performance control of underwater robot based on disturbance observer

HUA Chang-chun[†], CHEN Chuan-hu, CHEN Jian-nan, ZHANG Yu

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: This paper investigates the prescribed performance control problem for underwater robots with disturbance. Firstly, for the disturbance of underwater robots, a disturbance observer is designed, and the disturbance estimation error converges to zero in finite time. Then, a nonsingular fast integration terminal sliding mode controller (NFITSMC) is proposed based on the exponential-type barrier Lyapunov function (E-BLF). The controller can make the tracking error converge to zero in finite time and ensure that the static and dynamic performance satisfies prescribed performance index. Finally, the stability of the control system is proved, and a simulation example is given to illustrate the effectiveness of the proposed methods.

Keywords: prescribed performance control; finite time disturbance observer; nonsingular fast integral terminal sliding mode control; underwater robot

0 引言

水下机器人广泛地应用于军事、水下资源探索、水下搜救等领域^[1-2], 在许多场合, 比如收集数据、轨迹跟踪、姿态保持等应用场合需要对水下机器人进行高精度控制. 然而, 水下机器人的控制模型具有非线性、多耦合的特点^[3-5]. 水下环境复杂, 水下机器人容易受外界环境影响, 在浅水时容易受风浪影响, 在深水时容易受水流影响. 因此, 对水下机器人进行精准控制具有很大的挑战性. 基于这些原因, 研究水下机器人的控制算法在控制领域具有很重要的意义和价值, 并且已有许多用于水下机器人的控制方法被提出, 例如线性控制器^[6]、自适应控制器^[7]、滑模控制

器^[8-9]等.

PID 线性控制器经常用于水下机器人的控制, 这种控制方法不仅简单, 并且易于工程师的实施. 文献[10]利用 PID 及阻抗补偿的方法控制遥控水下机器人, 实现了路径跟踪控制; 此外, 文献[11]用一个多输入多输出的 PID 控制方法控制水下无人潜航器 Minerva. 但是, 在有些情况下, 特别是存在大的时变外界干扰时, PID 控制器不能达到满意的控制性能. 当存在外界干扰时, 自适应控制是一个很好的方法^[12-13]: 文献[7]采用含有重力项补偿的自适应 PD 控制器控制六自由度的水下机器人, 并且实现了无稳态误差; 文献[14]采用基于命令调速的自适应控制器控

收稿日期: 2020-11-28; 录用日期: 2021-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61825304); 河北省创新群体项目(F2020203013).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: cch@ysu.edu.cn.

制水下机器人,并且进行了实验验证,结果表明其具有更好的鲁棒性、更快的收敛速度,瞬态性能比传统的基于模型的自适应控制器有了很大的提高.滑模控制器由于其具有很强的鲁棒性,也被广泛地应用于水下机器人控制:文献[15]提出了基于干扰观测器的快速非奇异模糊终端滑模控制器,并用于水下机器人的轨迹跟踪控制,但是其设计的干扰观测器只适用于估计慢时变干扰,其假设外界总干扰的导数为零,然而在实际情况下是不合理的;文献[16]同样设计了一个观测器用于估计外界干扰,但是估计误差只能做到渐近收敛.

目前对于水下机器人的研究大多集中在稳态性能的研究,对暂态性能的研究还较少,本文考虑到在某些特殊任务中,需要轨迹跟踪误差受限的预定性能控制.例如在水下摄影跟踪鱼群时,对水下机器人的位置有一定的限制,要求跟踪位置在一定的范围内,这对控制器的暂态性能具有要求.因此,本文基于障碍李雅普诺夫函数设计一个预定性能控制器,实现预定性能控制,然后考虑到外界快时变干扰,设计一个有限时间干扰观测器对控制器进行前馈补偿,使得控制器具有很强的鲁棒性.本文主要有3方面的创新点:1)对于外界的时变干扰,设计一个有限时间干扰观测器用于估计系统的不确定性,干扰估计误差能够在有限时间内收敛至零,而文献[15-16]中提出的干扰观测器只能实现渐近稳定;2)本文基于非奇异快速积分终端滑模设计水下机器人的控制器,相较于传统的非奇异终端滑模,其收敛时间与初始误差无关,可提高收敛性能;3)为了实现位置跟踪误差受限的预定性能控制,基于一种指数型障碍李雅普诺夫设计一个非奇异快速积分终端滑模控制器,然后利用干扰观测器的估计值对其进行前馈补偿,实现水下机器人轨迹跟踪误差受限的预定性能控制,并且轨迹跟踪误差在有限时间内收敛至零且具有很强的鲁棒性.

1 系统描述及定义

1.1 水下机器人模型

从文献[10]可以得到经典的水下机器人6个自由度的运动学模型.由于恢复力的存在,开架式水下机器人在横摇和纵摇两个自由度上能够自稳定^[17-19],因此,对水下机器人的动力学模型进行简化,4自由度的动力学模型如下:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + G(\eta) = \tau_B + f_{Bd}. \quad (1)$$

其中: $v = [u \ v \ w \ r]^T$, u, v, w, r 分别是纵荡、横荡、垂荡、艏摇速度; $M = M_B + M_A \in R^{4 \times 4}$ 是正定的惯性矩阵, M_B 是本体质量惯性矩阵, M_A 是附加质量惯

性矩阵; $C(v) = C_B(v) + C_A(v) \in R^{4 \times 4}$, $C(v)$ 是科氏向心力矩阵, $C_B(v)$ 是由本体质量引起的, $C_A(v)$ 是由附加质量引起的; $D(v) = D_L(v) + D_N(v) \in R^{4 \times 4}$ 是水阻尼力矩阵, $D_L(v)$ 是一阶线性阻尼矩阵, $D_N(v)$ 是高阶非线性阻尼矩阵; $G(\eta)$ 是恢复力; $\tau_B = Lu \in R^{4 \times 1}$ 是每个自由度上推力的合力, $L \in R^{4 \times n}$ 是推力分配矩阵,与推进器的布局有关, $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T$ 是推进器的推力, u_i 是第 i 个推进器的推力, n 是推进器的数量,可以通过 $u = L^T(LL^T)^{-1}\tau_B$ 得到每个推进器的输出; $f_{Bd} \in R^{4 \times 1}$ 是外界的干扰力.水下机器人的运动学方程如下:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v. \quad (2)$$

其中: $\eta = [x \ y \ z \ \psi]^T$; $J(\eta)$ 是转换矩阵,且有

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

惯性坐标系和机体坐标系如图1所示.在图1中: x, y, z 为惯性坐标系中的位置坐标; ψ 为惯性坐标系中绕 Z_I 轴旋转的角度.

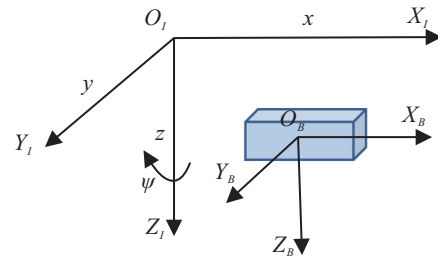


图1 惯性坐标系 $O_I X_I Y_I Z_I$ 和机体坐标系 $O_B X_B Y_B Z_B$

根据 $\dot{v} = J^{-1}(\eta)\dot{\eta} + J^{-1}(\eta)\dot{\eta}$ 从机体坐标系转换到惯性坐标系,则有

$$\ddot{\eta} + \bar{C}_I(v, \eta)\dot{\eta} + \bar{D}_I(v, \eta)\dot{\eta} + \bar{G}_I(\eta) = b\tau_I + f_d. \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{C}_I(v, \eta) &= \bar{M}_I^{-1}(\eta)J^{-T}(\eta)[M(J^{-1}(\eta)) + C(v)]J^{-1}(\eta), \\ \bar{D}_I(v, \eta) &= \bar{M}_I^{-1}(\eta)J^{-T}(\eta)D(v)J^{-1}(\eta), \\ \bar{G}_I(\eta) &= \bar{M}_I^{-1}(\eta)J^{-T}(\eta)G(\eta), \\ b &= \bar{M}_I^{-1}(\eta)J^{-T}(\eta), \tau_I = \tau_B, \\ f_d &= \bar{M}_I^{-1}(\eta)J^{-T}(\eta)f_{Bd}, \\ \bar{M}_I(\eta) &= J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta). \end{aligned}$$

对于水下机器人的运动学和动力学模型有如下假设.

假设1 外界干扰 f_d 的一阶导数有界.

$$|\dot{f}_{di}| \leq h_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (5)$$

其中 $h_i \in R$ 是正实数.

注1 在实际系统中,水下机器人在水中运动的速度 v 、加速度 \dot{v} 及 \dot{f}_{Bd} 都是有界的,因此 \dot{f}_d 有界,假设1是合理的.

1.2 指数型障碍李雅普诺夫函数

为了简化表达,有下面的定义和引理.

定义1 $\text{sig}(x)^\gamma = [|x_1|^\gamma \cdot \text{sign}(x_1) \dots |x_n|^\gamma \cdot \text{sign}(x_n)]^T$, 其中 $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$, γ 是正实数.

为了对水下机器人的轨迹跟踪实现预定性能控制,一个E-BLF函数介绍如下:

$$V_e = \rho_e^2 \left[\exp \left(\frac{e_1^2(t)}{\rho_e^2 - e_1^2(t)} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

其中: $|e_1(0)| < |\rho_e(0)|$, $e_1(t)$ 是系统受限的变量, ρ_e 是连续可微的时变性能函数, 当 $t \geq 0$ 时, $|e_1| < \rho_e$.

注2 很明显如式(6)所示的E-BLF函数是正定函数, 当没有约束时, 即 ρ_e 趋于 $+\infty$ 时, 通过洛必达法则可以得到

$$\lim_{\rho_e \rightarrow +\infty} \rho_e^2 \left[\exp \left(\frac{e_1^2(t)}{\rho_e^2 - e_1^2(t)} \right) - 1 \right] = e_1^2(t). \quad (7)$$

这意味着当没有约束时, E-BLF函数会变为 $e_1^2(t)$. 因此, 本文中的E-BLF既可以处理受限系统, 又可以处理非受限系统, 当跟踪误差不受限时同样有效.

引理1^[20] 考虑如下的非线性微分方程:

$$\dot{x} + k_1 \text{sig}(x)^{\frac{1}{2}} + k_2 \int_0^t \text{sign}(x) d\tau = \varphi(t). \quad (8)$$

其中: $\varphi(t)$ 是未知干扰, 且 $|\dot{\varphi}(t)| \leq L$, L 是正实数; x 是式(8)的解, 如果 $k_1 \geq 1.5\sqrt{L}$ 且 $k_2 \geq 1.1\sqrt{L}$, 则 x 和 \dot{x} 将会在有限时间 t_r 内收敛至0, 收敛时间 t_r 由如下表达式决定:

$$t_r \leq \frac{7.6x(0)}{k_2 - L}, \quad (9)$$

这里 $x(0)$ 是 x 的初始状态.

引理2^[21] 一阶滑模微分器设计如下:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_0 &= \zeta_1 = -\epsilon_0 \text{sig}(\lambda_0 - f(t))^{\frac{1}{2}} + \lambda_1, \\ \dot{\lambda}_1 &= -\epsilon_1 \text{sig}(\lambda_1 - \zeta_1). \end{aligned}$$

其中: λ_0 和 λ_1 是系统的状态, ϵ_0 和 ϵ_1 是一阶滑模微分器设计的正实参数, $f(t)$ 是一个已知的函数. 如果 $\lambda_0(t_0) - f(t_0)$ 和 $\lambda_1(t_0) - \dot{f}(t_0)$ 有界, 则 $\zeta_1 - \dot{f}(t)$ 将会在有限时间内收敛至零.

引理3 考虑以下标量系统:

$$\dot{x} = -b_1 \text{sig}(x)^{\alpha_1} - b_2 \text{sig}(x)^{\alpha_2}, \quad x(0) = x_0. \quad (10)$$

其中: $b_1, b_2 \in R^+$, $0 < \alpha_1 < 1$ 且 $1 < \alpha_2$. 上述系统是有限时间稳定的, 且会在有限时间 T 内收敛, 收敛时间 T 如下:

$$T < T_{\max} = \frac{1}{b_1} \frac{1}{1 - \alpha_1} + \frac{1}{b_2} \frac{1}{\alpha_2 - 1}. \quad (11)$$

2 控制器设计

2.1 干扰观测器设计

当水下机器人的位置 η 和速度 $\dot{\eta}$ 可测, 并且系统的不确定性满足假设1时, 有限时间干扰观测器设计如下.

首先, 选择辅助变量 $\sigma_1 = [\sigma_{11} \ \sigma_{12} \ \sigma_{13} \ \sigma_{14}]^T$ 和 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$ 并有下面的关系式:

$$\sigma_1 = \theta - \dot{\eta},$$

$$\dot{\theta} = -\bar{C}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{D}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{G}_I(\eta) + b\tau_I + \hat{f}_d.$$

其中: \hat{f}_d 是 f_d 的估计, σ_1 的一阶微分为

$$\dot{\sigma}_1 = \dot{\theta} - \ddot{\eta} =$$

$$\begin{aligned} & -\bar{C}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{D}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{G}_I(\eta) + b\tau_I + \hat{f}_d - \\ & (-\bar{C}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{D}_I(v, \eta)\dot{\eta} - \bar{G}_I(\eta) + b\tau_I + f_d) = \\ & \hat{f}_d - f_d = \tilde{f}_d, \end{aligned}$$

这里 \tilde{f}_d 是干扰估计误差. 然后设计滑模微分器

$$\dot{\lambda}_0 = \zeta_1 = -\epsilon_0 \text{sig}(\lambda_0 - \sigma_1)^{\frac{1}{2}} + \lambda_1,$$

$$\dot{\lambda}_1 = -\epsilon_1 \text{sig}(\lambda_1 - \zeta_1),$$

其中 ϵ_0, ϵ_1 是正实数. 根据引理2, $\dot{\sigma}_1 = \zeta_1 + \xi$, 其中 ξ 是估计误差且 $\|\xi\| \leq \iota$, ι 是正实数. 有限时间干扰观测器设计为

$$\dot{\hat{f}}_d = -\zeta_1 - k_1 \text{sig}(\sigma_2)^{\frac{1}{2}} - k_2 \int_0^t \text{sign}(\sigma_2) d\tau. \quad (12)$$

其中: $\sigma_2 = \sigma_1 + \zeta_1$, $k_1 = \text{diag}([k_{11} \ k_{12} \ k_{13} \ k_{14}])$, $k_2 = \text{diag}([k_{21} \ k_{22} \ k_{23} \ k_{24}]) \in R^{4 \times 4}$ 是正定对角矩阵, 且 k_1, k_2 满足 $k_{1i} \geq 1.5\sqrt{\bar{h}_i}$ 和 $k_{2i} \geq 1.1\sqrt{\bar{h}_i}$, $\bar{h}_i > \xi_i - \dot{f}_{di} - \dot{\xi}_i$.

稳定性分析 σ_2 的一阶微分如下:

$$\dot{\sigma}_2 = \dot{\sigma}_1 + \dot{\hat{f}}_d - \dot{f}_d - \dot{\xi}. \quad (13)$$

将式(12)代入(13)有

$$\dot{\sigma}_2 + k_1 \text{sig}(\sigma_2)^{\frac{1}{2}} + k_2 \int_0^t \text{sign}(\sigma_2) d\tau = H, \quad (14)$$

其中 $H = \xi - \dot{f}_d - \dot{\xi}$. 根据假设1以及引理2可知, $|\dot{H}_i| < \bar{h}_i$, \bar{h}_i 是正实数. 根据引理1可知, σ_2 和 $\dot{\sigma}_2$ 将会在有限时间 $t_{r1} = \max \left(\frac{7.6\sigma_{2i}(0)}{k_{2i} - \bar{h}_i} \right)$ 内收敛至零, 又因为 $\sigma_2 = \sigma_1 + \zeta_1$, 根据引理2以及文献[22]可知 σ_1 将会在有限时间 t_{r2} 内收敛至零, 所以估计误差 \tilde{f}_d 将会在有限时间 $t_r = t_{r1} + t_{r2}$ 内收敛至零.

注3 在实践中, 选取 k_1 和 k_2 时满足 $k_{1i} \geq 1.5\sqrt{\bar{h}_i}$ 和 $k_{2i} \geq 1.1\sqrt{\bar{h}_i}$ 即可, 因此首先选取 k_{1i} 与 k_{2i} 为较大的正数, 然后根据测试情况逐渐调小.

2.2 非奇异快速积分终端滑模控制器设计

下面设计一个基于干扰观测器的非奇异快速积分终端滑模控制器, 并从理论上进行严格的证明. 控制器的结构如图2所示.

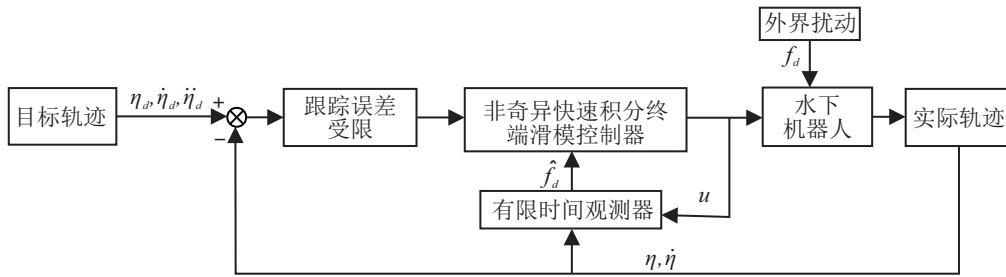


图2 控制器结构

首先给出如下定义:

$$e_1 = \eta - \eta_d. \quad (15)$$

其中: $e_1 \in R^{4 \times 1}$ 是位置跟踪误差, η 是水下机器人实际位置, η_d 是目标位置.

$$e_2 = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d. \quad (16)$$

其中: e_2 是速度跟踪误差, $\dot{\eta}$ 是实际速度, $\dot{\eta}_d$ 是目标速度. 非奇异快速积分滑模面选择如下:

$$S = e_2 + \int_0^t (\beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{21}} + \beta_{22} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{22}} + \beta_{11} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{11}} + \beta_{12} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{12}}) d\tau. \quad (17)$$

其中: β_{11} 、 β_{12} 、 β_{21} 和 $\beta_{22} \in R^{4 \times 4}$ 是正定对角矩阵; α_{11} 、 α_{12} 、 α_{21} 和 α_{22} 都是正实数且满足 $1 < \alpha_{21} < 2, 0 < \alpha_{22} < 1, \alpha_{11} = \frac{\alpha_{21}}{2 - \alpha_{21}}, \alpha_{12} = \frac{\alpha_{22}}{2 - \alpha_{22}}$. $S = 0$ 后 e_1 和 e_2 的收敛时间是一个确定值且与初始状态无关^[23]. S 的一阶微分为

$$\begin{aligned} \dot{S} = & \dot{e}_2 + \beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{21}} + \beta_{22} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{22}} + \\ & \beta_{11} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{11}} + \beta_{12} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{12}} = \\ & -\bar{C}_I(v, \eta) \dot{\eta} - \bar{D}_I(v, \eta) \dot{\eta} - \bar{G}_I(\eta) + b\tau_I + \\ & f_d - \dot{\eta}_d + \beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{21}} + \beta_{22} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{22}} + \\ & \beta_{11} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{11}} + \beta_{12} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{12}}. \end{aligned} \quad (18)$$

控制器设计为

$$\begin{aligned} \tau_I = & b^{-1}(\bar{C}_I(v, \eta) \dot{\eta} + \bar{D}_I(v, \eta) \dot{\eta} + \\ & \bar{G}_I(\eta) - \hat{f}_d + \dot{\eta}_d + \bar{\tau} + \Pi). \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\bar{\tau}, \Pi \in R^{4 \times 1}$ 为

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_i = & -\frac{\rho_{ei}(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)(E_i - 1)}{\rho_{ei} E_i S_i} + \frac{(\rho_{ei} \dot{\rho}_{ei} - e_{1i} \dot{e}_{1i}) S_i}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2} - \\ & \frac{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2}{\rho_{ei}^2 E_i S_i} (\delta_{1i} \rho_{ei}^{2\varepsilon_1} S_{E_i} + \delta_{2i} \rho_{ei}^{2\varepsilon_2} (E_i - 1)^{\varepsilon_2}) - \\ & \frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i}{2\varpi(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)}, \\ \Pi = & -(\beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{21}} + \beta_{22} \text{sig}(e_2)^{\alpha_{22}} + \\ & \beta_{11} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{11}} + \beta_{12} \text{sig}(e_1)^{\alpha_{12}}). \end{aligned}$$

其中: $\rho_e = [\rho_{e1} \ \rho_{e2} \ \rho_{e3} \ \rho_{e4}]^T$; δ_{1i}, δ_{2i} 和 ϖ 是正实数;

$E_i = \exp\left(\frac{S_i^2}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2}\right)$; ε_1 和 ε_2 满足 $0 < \varepsilon_1 < 1, \varepsilon_2 > 1$; S_{E_i} 为

$$S_{E_i} = \begin{cases} (E_i - 1)^{\varepsilon_1}, & |S_i| > \omega_i; \\ \left(\exp\left(\frac{\omega_i^2}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2}\right) - 1\right)^{\varepsilon_1 - 1} (E_i - 1), & |S_i| \leq \omega_i, \end{cases}$$

ω_i 是较小的正实数.

注4 S_{E_i} 的作用是为了确保 $\frac{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2}{\rho_{ei}^2 E_i S_i} \delta_{1i} \rho_{ei}^{2\varepsilon_1} S_{E_i}$ 不会出现奇异.

定理1 考虑水下机器人的运动学与动力学模型(4), 设计干扰观测器(12)以及控制器(19), 且系统的初始状态满足 $\|e_1(0)\| < \rho_e(0)$, 则轨迹跟踪误差 e_1 将会在有限时间内收敛至零, 且满足预定性能要求.

证明 构造如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \rho_{ei}^2 \left[\exp\left(\frac{S_i^2}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2}\right) - 1 \right]. \quad (20)$$

V 的一阶微分为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^4 \left(\rho_{ei} \dot{\rho}_{ei} (E_i - 1) - \right. \\ & \left. \frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i^2 (\rho_{ei} \dot{\rho}_{ei} - e_{1i} \dot{e}_{1i})}{(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)^2} + \frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i \dot{S}_i}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

结合式(18), 将(19)代入(21), 有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^4 \left(-\delta_{1i} \rho_{ei}^{2\varepsilon_1} S_{E_i} - \delta_{2i} \rho_{ei}^{2\varepsilon_2} (E_i - 1)^{\varepsilon_2} - \right. \\ & \left. \frac{\rho_{ei}^4 E_i^2 S_i^2}{2\varpi(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)^2} - \frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i \tilde{f}_{di}}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2} \right) \leq \\ & \sum_{i=1}^4 \left(-\delta_{1i} (\rho_{ei}^2 (E_i - 1))^{\varepsilon_1} - \delta_{2i} (\rho_{ei}^2 (E_i - 1))^{\varepsilon_2} - \right. \\ & \left. \frac{\rho_{ei}^4 E_i^2 S_i^2}{2\varpi(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)^2} - \frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i \tilde{f}_{di}}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

根据杨氏不等式有

$$-\frac{\rho_{ei}^2 E_i S_i \tilde{f}_{di}}{\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2} \leq \frac{\rho_{ei}^4 E_i^2 S_i^2}{2\varpi(\rho_{ei}^2 - e_{1i}^2)^2} + \frac{\varpi}{2} \|\tilde{f}_{di}\|^2.$$

然后可以得到

$$\dot{V} \leq \left(-d_1 V^{\varepsilon_1} - d_2 V^{\varepsilon_2} + \frac{\varpi}{2} \|\tilde{f}_d\|^2 \right). \quad (23)$$

其中: $d_1 = \min(2\delta_{1i}), d_2 = \min(2\delta_{2i})$. 因为干扰估计误差 \tilde{f}_d 在有限时间内收敛至零, 所以 \tilde{f}_d 是有界的, 并且在估计误差收敛至零前, V, e_{1i}, e_{2i} 和 S_i 将不会发散至无穷. 因此, 当 $t > t_r$ 时, 有

$$\dot{V} \leq -d_1 V^{\varepsilon_1} - d_2 V^{\varepsilon_2}. \quad (24)$$

根据引理3, 系统将会在有限时间内到达 $S = 0$, 并且 e_1 和 e_2 也会在有限时间收敛至零. 根据式(24)可知: 当 δ_{1i}, δ_{2i} 过大时, 收敛速度会变快, 但是控制器输出增益会很大, 容易造成输出抖动; 相反, 当它们的值太小时, 造成收敛速度变慢. 因此, 在实践中, 可以通过试错选择合适的值, 对于控制器的其余参数, 只要满足文中的条件即可, 同样可以通过试错来选择它们. □

注5 当驱动器存在饱和或死区时, 会影响控制器的性能, 目前已有许多文献进行了相关研究^[24-25]. 当本文中的驱动器存在饱和或者死区时, $\Delta\tau_I = \tau_I - \tau_{Ir}$. 其中: τ_I 是控制器输出, τ_{Ir} 是实际输出. $\Delta\tau_I$ 会被视为扰动的一部分, 由干扰观测器估计得出.

3 仿真结果

为了验证所设计的基于有限时间干扰观测器的非奇异快速积分踪终端滑模控制器的有效性以及控制性能, 下面对水下机器人进行数值仿真. 选择仿真的水下机器人为MINERVA, 如图3所示, 其具体参数可从文献[26]得到.



图3 MINERVA水下机器人

水下机器人的初始状态为 $\eta_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \dot{\eta}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$; 目标轨迹为 $\eta_d = [3 + 2 \sin(0.2t) \ 1 + 2 \cos(0.2t) \ 3 + 0.2t \ 1]^T$, 外界干扰设置为 $f_{Bd} = [15 \sin(0.3t) + 15 \cos(0.2t) + 20 \sin(0.25t) + 10 \ln(t + 2) - 30 \ 25 \sin(0.3t) + 15 \cos(0.3t) + 30 \cos(0.15t) + 16 \sin(0.25t) + 0.15t + 3 \ 40 \sin(0.3t) + 10 \sin(0.25t) - 20 \ln(t + 2) + 20 \ 30 \sin(0.3t) + 20 \cos(0.2t) - 12 \sin(0.25t) - 15]^T$. 有限时间干扰观测器参数选择为 $\epsilon_0 = 10, \epsilon_1 = 10, k_1 = \text{diag}([25 \ 25 \ 25 \ 25]), k_2 = \text{diag}([20 \ 20 \ 20 \ 20])$, NFITSM滑模面选择为 $S = e_2 + \int_0^t (\beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\frac{3}{2}} + \beta_{21} \text{sig}(e_2)^{\frac{1}{2}} + \beta_{11} \text{sig}(e_1)^3 +$

$\beta_{12} \text{sig}(e_1)^{\frac{1}{3}}) d\tau$, 控制器参数选择为 $\alpha_{11} = 3, \alpha_{12} = \frac{1}{3}, \alpha_{21} = \frac{3}{2}, \alpha_{22} = \frac{1}{2}, \epsilon_1 = 0.5, \epsilon_2 = 1.5, \delta_{1i} = 1, \delta_{2i} = 2, \omega_{1i} = 0.5, i = 1, 2, 3, 4, \varpi = 1, \beta_{11} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1]), \beta_{12} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1]), \beta_{21} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1]), \beta_{22} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1 \ 1])$. 预定性能函数选择为 $\rho_{e1} = \rho_{e2} = \rho_{e3} = \rho_{e4} = 4e^{-0.6t} + 0.15$. 为了表现出本文提出的控制器的优越性, 对比PID控制器选择为 $\tau_I = b^{-1} (\tilde{C}_I(v, \eta)\dot{\eta} + \tilde{D}_I(v, \eta)\dot{\eta} + \tilde{G}_I(\eta) + \ddot{\eta}_d - 15e_1 - 3 \int (e_1)dt - 7e_2)$.

图4为干扰值及估计值, 图5为干扰观测器估计误差.

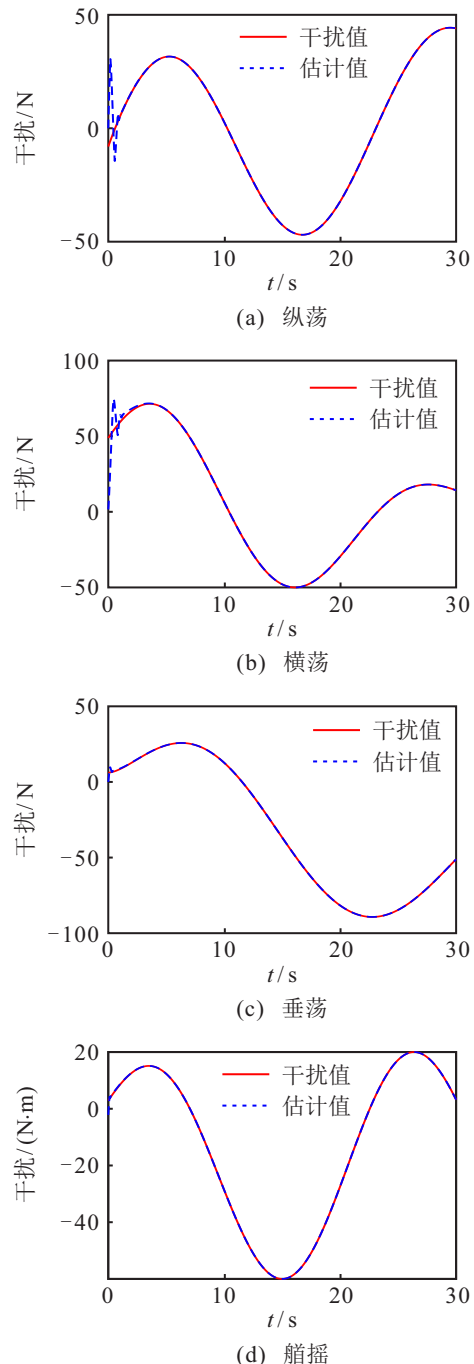
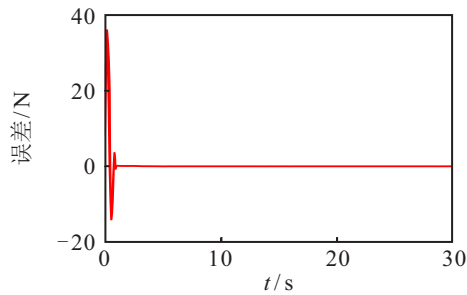
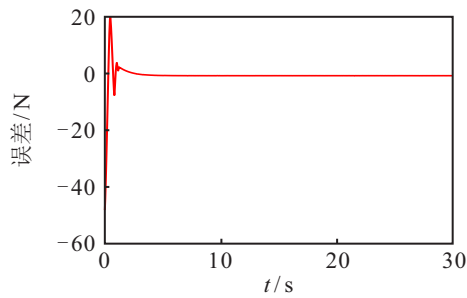


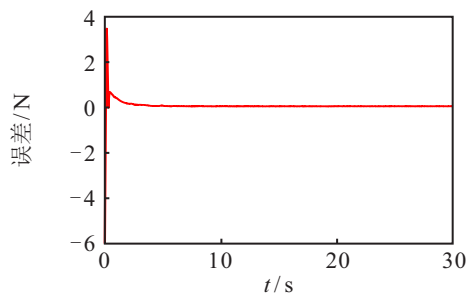
图4 干扰值与估计值



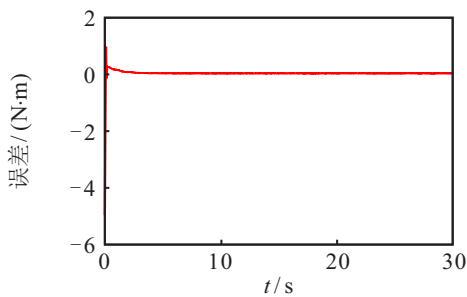
(a) 纵荡



(b) 横荡



(c) 垂荡

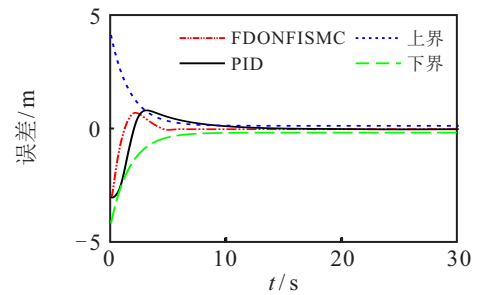


(d) 艏摇

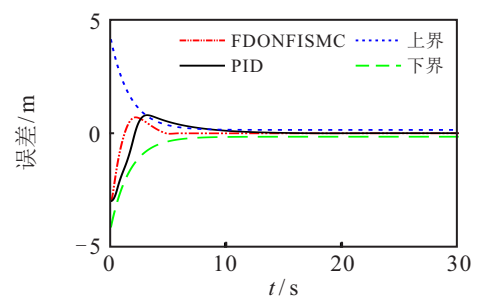
图5 干扰观测器估计误差

从图5可知,系统的估计误差在5s内快速收敛至零,说明本文设计的干扰观测器能够有效估计系统的不确定性,并且估计误差在有限时间内收敛至零.

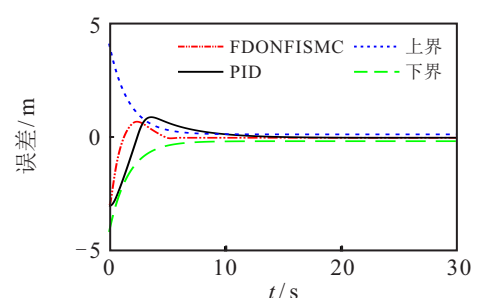
图6为轨迹跟踪误差.从图6可以看出,本文提出的基于快速干扰观测器的非奇异快速积分终端滑模(FDONFITSM)控制器能够保证水下机器人的轨迹跟踪误差始终在受限函数范围内,而PID控制器不能够保证轨迹跟踪误差始终在受限函数内,并且艏摇受外界干扰不能保持稳定.因此,本文提出的FDONFITSM控制器能够保证水下机器人满足轨迹跟踪误差受限的预定性能要求,且具有很强的鲁棒性.



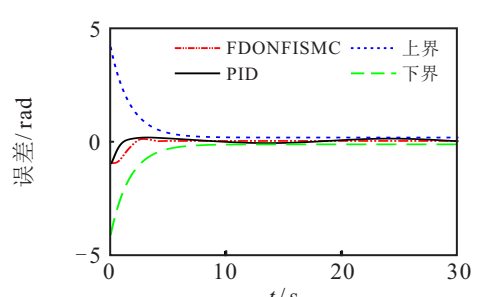
(a) 纵荡



(b) 横荡



(c) 垂荡



(d) 艏摇

图6 轨迹跟踪误差

4 结论

本文提出了一个基于有限时间干扰观测器的非奇异快速积分终端滑模控制器用于水下机器人位置误差受限的轨迹跟踪控制.对于外界快时变干扰,设计了一个有限时间干扰观测器来估计外界干扰,并且估计误差在有限时间内收敛至零.对于水下机器人跟踪轨迹位置误差受限,设计了一个基于E-BLF的非奇异快速积分终端滑模控制器,使得系统的轨迹跟踪误差在有限时间内收敛至零并满足预定性能.最后严格证明了系统的稳定性,仿真实例表明,本文提出的控制器能够满足预定性能且具有很强的鲁棒性.

参考文献(References)

- [1] Mohan S, Kim J. Coordinated motion control in task space of an autonomous underwater vehicle-manipulator system[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 104: 155-167.
- [2] Martin S C, Whitcomb L L. Nonlinear model-based tracking control of underwater vehicles with three degree-of-freedom fully coupled dynamical plant models: Theory and experimental evaluation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(2): 404-414.
- [3] Avila J P J, Donha D C, Adamowski J C. Experimental model identification of open-frame underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 60: 81-94.
- [4] Xu S J, Ma Q W, Han D F. Experimental study on inertial hydrodynamic behaviors of a complex remotely operated vehicle[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2017, 65: 1-9.
- [5] Yang X, Yan J, Hua C C, et al. Trajectory tracking control of autonomous underwater vehicle with unknown parameters and external disturbances[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(2): 1054-1063.
- [6] Jin S, Kim J, Kim J, et al. Six-degree-of-freedom hovering control of an underwater robotic platform with four tilting thrusters via selective switching control[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 2370-2378.
- [7] Antonelli G. On the use of adaptive/integral actions for six-degrees-of-freedom control of autonomous underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 300-312.
- [8] Zhang G C, Huang H, Hong D Q, et al. A novel adaptive second order sliding mode path following control for a portable AUV[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 151: 82-92.
- [9] Qiao L, Yi B W, Wu D F, et al. Design of three exponentially convergent robust controllers for the trajectory tracking of autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 134: 157-172.
- [10] Fossen T I. *Guidance and control of ocean vehicles*[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1994: 1-480.
- [11] Fernandes D D A. An output feedback motion control system for ROVs: Guidance, navigation, and control[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015: 1-187.
- [12] Guo Q, Zuo Z Y, Ding Z T. Parametric adaptive control of single-rod electrohydraulic system with block-strict-feedback model[J]. *Automatica*, 2020, 113: 108807.
- [13] Wang W, Xie B, Zuo Z Y, et al. Adaptive backstepping control of uncertain gear transmission servosystems with asymmetric dead-zone nonlinearity[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(5): 3752-3762.
- [14] Makavita C D, Jayasinghe S G, Nguyen H D, et al. Experimental study of command governor adaptive control for unmanned underwater vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(1): 332-345.
- [15] Patre B M, Londhe P S, Waghmare L M, et al. Disturbance estimator based non-singular fast fuzzy terminal sliding mode control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 159: 372-387.
- [16] van M. An enhanced tracking control of marine surface vessels based on adaptive integral sliding mode control and disturbance observer[J]. *ISA Transactions*, 2019, 90: 30-40.
- [17] Caccia M, Veruggio G. Guidance and control of a reconfigurable unmanned underwater vehicle[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(1): 21-37.
- [18] Avila J P J, Adamowski J C, Maruyama N, et al. Modeling and identification of an open-frame underwater vehicle: The yaw motion dynamics[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 66(1/2): 37-56.
- [19] Kim J, Joe H, Yu S C, et al. Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1052-1061.
- [20] Levant A. Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1447-1451.
- [21] Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. *International Journal of Control*, 2003, 76(9/10): 924-941.
- [22] Chen M, Shi P, Lim C C. Robust constrained control for MIMO nonlinear systems based on disturbance observer[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(12): 3281-3286.
- [23] Zhang Y, Hua C C, Li K. Disturbance observer-based fixed-time prescribed performance tracking control for robotic manipulator[J]. *International Journal of Systems Science*, 2019, 50(13): 2437-2448.
- [24] Yang T, Sun N, Chen H, et al. Neural network-based adaptive antiswing control of an underactuated ship-mounted crane with roll motions and input dead zones[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(3): 901-914.
- [25] Yang T, Sun N, Chen H, et al. Observer-based nonlinear control for tower cranes suffering from uncertain friction and actuator constraints with experimental verification[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(7): 6192-6204.
- [26] Daniel de Almeida Fernandes. An output feedback motion control system for ROVs[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015: 1-232.

作者简介

华长春(1979—),男,教授,博士生导师,从事非线性动力系统的控制及应用、网络化控制系统的分析与综合、基于数据驱动的故障诊断和容错控制等研究, E-mail: cch@ysu.edu.cn;

陈传虎(1995—),男,硕士生,从事水下机器人的研究, E-mail: 1434388535@qq.com;

陈健楠(1992—),男,博士生,从事四旋翼的研究, E-mail: cocoachen1992@foxmail.com;

张宇(1988—),男,讲师,博士,从事机械臂视觉伺服的研究, E-mail: zy@ysu.edu.cn.