

控制与决策

Control and Decision

基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制

夏国清, 孙显信, 任哲达

引用本文:

夏国清, 孙显信, 任哲达. 基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 2028–2034.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1953>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制

Fixed-time distributed sliding mode cooperative control for multiple surface vessels with actuator faults

控制与决策. 2023, 38(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0747>

考虑控制饱和的连铸结晶器振动位移系统预设性能控制

Prescribed performance control for vibration displacement of continuous casting mold with control saturation

控制与决策. 2023, 38(2): 413–420 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0942>

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>

基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader-follower strategy

控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

参数不确定离散时间系统的有限时间输出反馈预见控制器设计

Design of finite-time output feedback preview controller for discrete-time systems with parameter uncertainty

控制与决策. 2021, 36(9): 2074–2084 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1584>

基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制

夏国清[†], 孙显信, 任哲达

(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 研究在时变环境干扰和输入饱和约束条件下, 基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制. 首先, 为了准确地估计时变的海洋环境干扰, 提出一种有限时间干扰观测器; 然后, 为了处理执行机构的物理约束, 采用一种辅助动态系统; 最后, 为了实现多无人水面船集群控制, 设计一种状态反馈控制器. 采用李雅普诺夫方法证明了系统的稳定性, 仿真结果验证了所设计的状态反馈控制器的有效性.

关键词: 多无人水面船系统; 集群控制; 时变环境干扰; 输入饱和; 状态反馈控制器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1953

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 夏国清, 孙显信, 任哲达. 基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 2028-2034.

Swarm control for multiple unmanned surface vehicles system based on state feedback controller

XIA Guo-qing[†], SUN Xian-xin, REN Zhe-da

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In this paper, swarm control for multiple unmanned surface vehicles subject to time-varying environmental disturbances and input saturation based on state feedback controllers is studied. Firstly, to accurately measure the environmental disturbances, a finite-time disturbance observer is proposed. Then, to solve the actuator saturation, an auxiliary dynamic system is introduced. Furthermore, a state feedback controller is designed for each USV to realize the swarm control of multiple unmanned surface vehicles. The stability of the system is proved using the Lyapunov method. The effectiveness of the proposed controller is verified via simulation results.

Keywords: multiple unmanned surface vehicles; swarm control; time-varying environmental disturbances; input saturation; state feedback controller

0 引言

近年来,多无人水面船(USV)的集群控制得到学者们广泛的关注,并在许多领域取得了成果,例如跟踪任务^[1],搜索和救援行动^[2],保护和围捕^[3]等等.在USV集群执行任务时,会面临时变环境干扰和输入饱和的问题,这就给USV集群控制带来了挑战.为此,本文针对USV集群控制中涉及到时变环境干扰和输入幅值饱和两个问题展开研究.

扰动总是伴随着物理系统的运动过程而来.环境干扰是由海风、海浪和海流产生的.由于测量的不精确,导致无法获得准确的环境干扰值.因此,在USV集群控制的设计过程中考虑环境干扰这一变量是有必要的.为了处理环境干扰,文献[4]利用内部模型

方法来估计干扰;文献[5]采用神经网络的方法来估计未知时变环境干扰.也有学者利用不同的观测器来估计时变环境干扰,例如高增益观测器^[6],扩张状态观测器^[1].然而,这些方法只能保证跟踪误差的最终渐近收敛,而不能提高其收敛速度.为了提高其收敛速度,文献[7]提出了一种有限时间控制技术,保证了闭环系统中所有的信号在有限时间内最终一致有界.因此,将有限时间控制技术与观测器相结合,可以有效地估计环境干扰.

USV集群控制的另一个难点就是输入饱和.由于船舶执行机构的功率和相应速率的限制,导致船舶的输入信号(即力和力矩)不可能是无限的,进而导致期望输入信号与执行器的实际输出之间存在

收稿日期: 2021-11-11; 录用日期: 2022-03-15.

基金项目: 第七代超深水钻井装置创新项目; 国家自然科学基金项目(51879049).

责任编辑: 张维海.

[†]通讯作者. E-mail: xiaguqing@hrbeu.edu.cn.

偏差. 因此, 控制信号的幅值通常被限制在一定范围内. 此外, 由于不同作业场景的要求, 船舶存在输入饱和和约束. 因此, 针对这些作业场景中存在的约束, 在设计控制器的过程中需要考虑到执行器物理约束, 即输入饱和和约束. 文献[8]提出了一种一致性算法来解决输入幅值饱和问题; 文献[9]提出了一种适用于水面船舶的鲁棒自适应位置锚泊控制系统, 采用变结构的控制方法来解决该问题; 文献[10-11]提出了一种辅助动态系统来解决输入饱和问题. 本文通过对众多文献提出的方法进行分析, 在集群控制的设计过程中, 采用辅助动态系统来解决输入饱和问题.

为了进一步综合考虑上述的两个问题, 本文从系统整体架构着手, 提出一种状态反馈控制器. 该控制器由有限时间干扰观测器、辅助动态系统和其他控制部分组成. 同时, 采用李雅普诺夫方法对整个系统的稳定性进行证明.

1 预备知识与问题描述

1.1 图论

通常采用图论来描述 n 艘 USV 和虚拟领航者之间的通信拓扑结构. 有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 由顶点集 $\mathcal{V} = \{0, 1, \dots, n\}$ 和边集 $\mathcal{E} \subseteq \{(i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}\}$ 组成. 如果 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 则节点 i 是 j 的相邻节点. $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V}, (i, j) \in \mathcal{E}\}$ 为 i 的所有相邻节点集^[12].

由 n 个节点组成的图 \mathcal{G} 中, 所有节点之间的通信关系由邻接矩阵 $\mathcal{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 表示. 拉普拉斯矩阵的定义为 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$, 其中 $\mathcal{D} = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_n]$,

$$d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}.$$

虚拟领航者的邻接矩阵用对角矩阵 $\mathcal{A}_0 = \text{diag}[a_{10}, \dots, a_{n0}]$ 表示. 同时, 当且仅当第 i 艘 USV 从虚拟领航船接收通讯信息时, $a_{i0} = 1, i = 1, 2, \dots, n$; 否则, $a_{i0} = 0$. 最后, 信息交互矩阵 $\mathcal{H} = \mathcal{L} + \mathcal{A}_0$.

假设1 图 \mathcal{G} 是有向图, 从根节点到虚拟领航者节点至少有一棵生成树, 即 \mathcal{H} 是正定矩阵.

1.2 有限时间稳定

引理1 考虑系统的微分方程组^[13]

$$\dot{y}(t) = f(y(t)), f(0) = 0, \quad (1)$$

其中 $f: U \rightarrow \mathbf{R}^n$ 在原点的一个开邻域 $U \in \mathbf{R}^n$ 内是连续的. 如果在 $t \in T$ 内, $y(t)$ 满足式(1)的条件, 则称连续可微函数 $y: T \rightarrow U$ 是式(1)在 $T \in \mathbf{R}$ 内的解.

假设存在一个连续的正定函数 $V: U \rightarrow \mathbf{R}$, 正实数 $c_1 > 0$, 正实数 $c_2 \in (0, 1)$ 和原点的一个开邻域 $U_0 \in U$, 使得下面的不等式成立:

$$\dot{V}(x) + c_1(V(x))^{c_2} \leq 0, x \in U_0 \setminus \{0\}. \quad (2)$$

该原点即为式(1)的有限时间稳定平衡点.

如果 $U = \mathbf{R}^n$, 存在一个 $V(x)$ 满足式(2)要求, 而且在 $\mathbf{R}^n \setminus \{0\}$ 内, $\dot{V}(x)$ 小于零恒成立, 则该原点就是式(1)的全局有限时间稳定平衡点. 收敛时间函数用 T 表示, 它满足

$$T(x) \leq \frac{1}{c_1(1-c_2)}(V(x))^{1-c_2}, x \in \mathbf{R}^n \setminus \{0\}. \quad (3)$$

1.3 船舶模型及问题描述

考虑一组由 1 艘虚拟领航船(下标为 0)和 n 艘 USV(下标为 1, 2, ..., n) 构成的 USV 集群, 第 i 艘 USV 的三自由度动力学及运动学方程表达式^[14]为

$$\dot{\eta}_i = R_i(\psi_i) v_i, \quad (4)$$

$$M_i \dot{v}_i + D_i v_i = \tau_i + d_i. \quad (5)$$

其中: $\eta_i := [x_i, y_i, \psi_i]^T$ 为球坐标系下的位置和艏向角矢量, $v_i := [u_i, v_i, r_i]^T$ 为船体坐标系下的速度矢量, M_i 为船体的惯性矩阵, D_i 为船体的阻尼矩阵, τ_i 为控制输入, d_i 为时变环境干扰. $R_i(\psi_i)$ 为旋转矩阵, 其表达式为

$$R_i(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

输入饱和约束下, 推进器的表达式为

$$\tau_i = \begin{cases} \tau_{i,\max}, & \tau_{ic} > \tau_{i,\max}; \\ \tau_{ic}, & \tau_{i,\min} \leq \tau_{ic} \leq \tau_{i,\max}; \\ \tau_{i,\min}, & \tau_{ic} < \tau_{i,\min}. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\tau_{i,\max}$ 和 $\tau_{i,\min}$ 分别表示第 i 艘 USV 控制力和力矩的最大值和最小值, $\tau_{ic} = [\tau_{ic1}, \tau_{ic2}, \tau_{ic3}]^T$ 通过状态反馈控制器计算得到.

本文的设计目标是通过设计状态反馈控制器, 使 USV 集群能够在保持固定队形的同时实现对期望参考信号的跟踪. 那么, 第 i 艘 USV 满足

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|\eta_i - \eta_0 - \mu_i\| \leq \sigma_i. \quad (8)$$

其中: $\|\cdot\|$ 表示 2-范数, $\eta_0 := [x_0, y_0, \psi_0]^T$ 为期望参考信号(即虚拟领航船), $\mu_i := [x_{i\mu}, y_{i\mu}, \psi_{i\mu}]^T$ 为 USV 与期望参考点之间的期望相对位置和艏向, $\sigma_i > 0$. 为了使 USV 集群能够保持固定队形, μ_i 为正常值.

假设2 期望参考信号 η_0 是光滑且处处可导的, 其一阶导数 $\dot{\eta}_0$ 和二阶导数 $\ddot{\eta}_0$ 都存在且有界.

假设3 时变环境干扰 d_i 是有界的, 其一阶导数 \dot{d}_i 是存在且有界的, 即

$$\|d_i\| \leq d_{i,\max}, \|\dot{d}_i\| \leq c_3, \quad (9)$$

其中 $d_{i,\max} > 0$ 和 $c_3 > 0$ 都是正常数.

假设4 系统的惯性矩阵 M_i 和阻尼矩阵 D_i 都是已知的.

2 有限时间干扰观测器设计

相比较单船和编队而言,USV 集群控制具有更好的可拓展性优势. 在USV 集群执行任务时,会面临时变环境干扰的问题. 为了处理这一新的研究问题,在USV 集群控制中,采用有限时间的方法设计观测器,用来估计环境干扰. 受参考文献[11]的启发,为了解决该难题,本文提出一种有限时间干扰观测器以实现对环境扰动的估计. 其表达式为

$$M_i \dot{\hat{v}}_i = -D_i v_i + \tau_i + \hat{d}_i. \quad (10)$$

其中: \hat{d}_i 为环境干扰 d_i 的估计值, \hat{v}_i 为 v_i 的估计值.

为了设计观测器,首先,定义一个新的变量

$$\omega_i = M_i v_i - M_i \hat{v}_i; \quad (11)$$

然后,设计观测器,其具体表达式为

$$\dot{\hat{d}}_i = H_{i1} \text{sig}^{\delta_{i1}}(\omega_i) + H_{i2} \int \text{sig}^{\delta_{i2}}(\omega_i) dt. \quad (12)$$

其中: H_{i1} 和 H_{i2} 都是正定的对角矩阵; $\text{sig}^\delta(\omega_i) = |\omega_i|^\delta \text{sgn}(\omega_i)$, $\delta > 0$ 和 $\omega_i \in \mathbf{R}$. δ_{i1} 和 δ_{i2} 都是正常数,并且满足 $0.5 \leq \delta_{i1} < 1$ 和 $\delta_{i2} = 2\delta_{i1} - 1$.

定义一个新的变量,干扰的估计误差 $\tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$. 对式(11)求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i &= d_i - \dot{\hat{d}}_i = \tilde{d}_i = \\ &- H_{i1} \text{sig}^{\delta_{i1}}(\omega_i) - H_{i2} \int \text{sig}^{\delta_{i2}}(\omega_i) dt + d_i. \end{aligned} \quad (13)$$

接下来,再定义一个新的变量 $\rho_i = [x_{i1}^T, x_{i2}^T]^T = [\omega_i^T, \varsigma_i^T]^T$, 其中 $\varsigma_i = -H_{i2} \int \text{sig}^{\delta_{i2}}(\omega_i) dt + d_i$. 式(13)可以改写为

$$\dot{x}_{i1} = -H_{i1} \text{sig}^{\delta_{i1}}(x_{i1}) + x_{i2}, \quad (14)$$

$$\dot{x}_{i2} = -H_{i2} \text{sig}^{\delta_{i2}}(x_{i1}) + \dot{d}_i. \quad (15)$$

定理1 对于由式(10)和(12)构成的任意系统的观测器,时变环境干扰可以在有限时间内被估计,且干扰的估计误差在有限时间内收敛到零.

证明 李雅普诺夫函数 V_i 的表达形式为

$$V_i = \frac{1}{2} \chi_i^T P_i \chi_i. \quad (16)$$

其中

$$\chi_i = \begin{bmatrix} \text{sig}^{\delta_{i1}}(x_{i1}) \\ x_{i2} \end{bmatrix}, P_i = \begin{bmatrix} \frac{2H_{i2}}{\delta_{i1}} + H_{i1}^2 & -H_{i1} \\ -H_{i1} & 2I_3 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

李雅普诺夫函数 V_i 除了 $\rho_i = \{(x_{i1}, x_{i2}) | x_{i1} = 0_{3 \times 1}\}$ 之外都是正定的、连续的、处处可导的.

对李雅普诺夫函数 V_i 进行求导,可以得到

$$\dot{V}_i = -|x_{i1}|^{\delta_{i1}-1} \chi_i^T L_i \chi_i + \chi_i^T l_i \dot{d}_i \leq$$

$$-\lambda_{\min}(L_i) |x_{i1}|^{\delta_{i1}-1} \|\chi_i\|^2 + c_3 \|\chi_i\| \|l_i\|. \quad (18)$$

其中

$$L_i = H_{i1} \begin{bmatrix} H_{i2} + \delta_{i1} H_{i1}^2 & -\delta_{i1} H_{i1} \\ -\delta_{i1} H_{i1} & \delta_{i1} I_3 \end{bmatrix}, l_i = \begin{bmatrix} -H_{i1} \\ 2I_3 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

经过计算,可以得出下面的不等式:

$$\dot{V}_i \leq -c_{i1} \|\chi_i\|^{\frac{\delta_{i1} + \delta_{i2}}{\delta_{i1}}}, \quad (20)$$

其中 $c_{i1} = \lambda_{\min}(L_i) - c_3 \|l_i\| \|\chi_i\|^{-\frac{\delta_{i2}}{\delta_{i1}}}$.

为了保证系数 $c_{i1} > 0$, 需要满足以下条件:

$$\|\chi_i\| > \left(\frac{c_3 \|l_i\|}{\lambda_{\min}(L_i)} \right)^{\frac{\delta_{i1}}{\delta_{i2}}}. \quad (21)$$

经过分析可以得到 \dot{V}_i 有界, 即 $\dot{V}_i \leq -c_{i2} V_i^{c_{i3}}$. 其中: $c_{i2} = 2c_{i1} \lambda_{\min}^{-c_{i3}}(P_i) > 0$, $0 < c_{i3} = (\delta_{i1} + \delta_{i2}) / 2\delta_{i1} < 1$.

根据引理1, 由式(14)和(15)构成的新的闭环系统在有限时间内收敛到零. \square

3 状态反馈控制器设计

3.1 状态反馈控制器

本节重点介绍状态反馈控制器的设计, 该设计具有分布式连接保持集群跟踪的性能. 为了处理集群控制跟踪中的连通性保持问题, 定义了以下4个变量: 位置和艏向角跟踪误差 z_{i1} , 速度跟踪误差 z_{i2} , 辅助动态系统对位置、艏向角跟踪误差的补偿 β_{i1} 和对速度跟踪误差补偿 β_{i2} . 它们的定义如下:

$$\begin{aligned} z_{i1} &= \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} (\eta_i - \mu_i - (\eta_j - \mu_j)) + \\ &a_{i0} (\eta_i - \eta_0 - \mu_i) - \beta_{i1}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$z_{i2} = v_i - v_{id} - \beta_{i2}, \quad (23)$$

$$\dot{\beta}_{i1} = -L_{i1} \beta_{i1} + a_{id} R_i \beta_{i2}, \quad (24)$$

$$\dot{\beta}_{i2} = -L_{i2} \beta_{i2} + M_i^{-1} \Delta \tau_i. \quad (25)$$

其中: \mathcal{N}_i , a_{ij} 和 a_{i0} 的定义见1.1节; η_i , μ_i 和 η_0 的定义见式(8). 同理, η_j 和 μ_j 也具备相同的含义.

为了解决输入饱和约束问题, 这里采用辅助动态系统的方法, 如图1所示. $L_{i1} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 和 $L_{i2} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是正定对角矩阵; $a_{id} = d_i + a_{i0}$; $\Delta \tau_i = \tau_i - \tau_{ic}$, $\|\Delta \tau_i\| \leq \Delta \tau_{i, \max}$, $\Delta \tau_{i, \max} > 0$ 是正常数. 只有在发生输入饱和时 β_{i1} 和 β_{i2} 不为零, 才会产生对 z_{i1} 和 z_{i2} 的补偿; 如果未发生输入饱和, 则 β_{i1} 和 β_{i2} 均为零, 此时, 没有对 z_{i1} 和 z_{i2} 补偿.

对式(22)进行求导, 结合(4)和(24), 得到

$$\begin{aligned} \dot{z}_{i1} &= \\ &\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{\eta}_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{\eta}_j + a_{i0} \dot{\eta}_i - a_{i0} \dot{\eta}_d - \dot{\beta}_{i1} = \end{aligned}$$

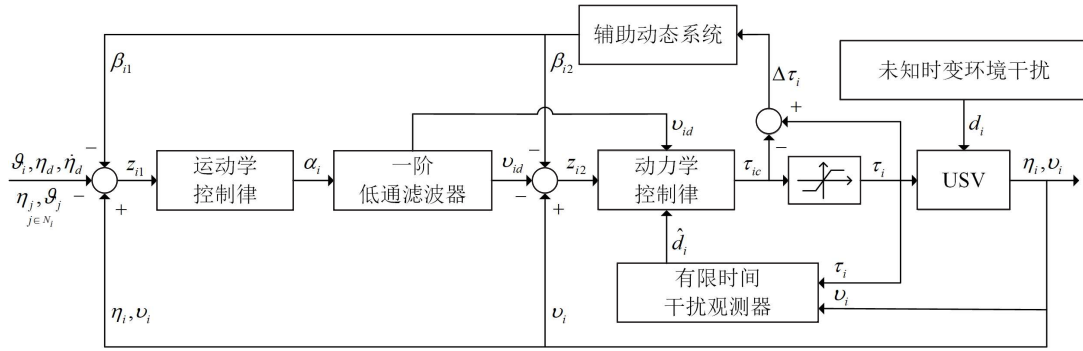


图1 基于状态反馈控制器的USV结构

$$a_{id}R_i v_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{\eta}_j - a_{i0} \dot{\eta}_d + L_{i1} \beta_{i1} - a_{id} J_i \beta_{i2}. \tag{26}$$

选择 v_i 作为式(23)的虚拟输入,通过采用动态面技术,从而得到动力学控制律

$$\alpha_i = \frac{R_i^T}{a_{id}} \left\{ -K_{i1} z_{i1} + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{\eta}_j + a_{i0} \dot{\eta}_d - L_{i1} \beta_{i1} \right\}, \tag{27}$$

其中 $K_{i1} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是正定的对角矩阵.

为了避免因为求导所导致的计算复杂性,这里引入一阶低通滤波器

$$l_i \dot{v}_{id} = \alpha_i - v_{id}, \quad v_{id}(0) = \alpha_i(0). \tag{28}$$

其中: $l_i > 0$ 为时间常数, $v_{id} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为滤波器输出.

对式(23)进行求导,结合式(5)和(25),得到

$$M_i \dot{z}_{i2} = -D_i v_i + \tau_{ic} + d_i - M_i (\dot{v}_{id} - L_{i2} \beta_{i2}). \tag{29}$$

接下来,将式(29)中的环境干扰 d_i 用经过有限时间干扰观测器得到的环境干扰估计值 \hat{d}_i 代替;然后,采用动态面方法^[15],进而得到动力学控制律

$$\tau_{ic} = -K_{i2} z_{i2} + D_i v_i + M_i (\dot{v}_{id} - L_{i2} \beta_{i2}) - \hat{d}_i, \tag{30}$$

其中 $K_{i2} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是正定的对角矩阵.

将式(27)和(30)代入式(22)和(23),得到关于第 i 艘USV的误差子系统

$$\dot{z}_{i1} = -K_{i1} z_{i1} + a_{id} R_i (z_{i2} + q_i), \tag{31}$$

$$M_i \dot{z}_{i2} = -K_{i2} z_{i2} - \tilde{d}_i. \tag{32}$$

其中: $q_i = v_{id} - \alpha_i$, \tilde{d}_i 的定义见式(13).

对 q_i 进行求导,结合式(28),从而得到

$$\dot{q}_i = -\frac{q_i}{l_i} - \dot{\alpha}_i. \tag{33}$$

对式(33)的两侧进行积分,可以得到

$$q_i(t) = q_i(0) e^{-t/l_i} - \int_0^t e^{-(t-\tau)/l_i} \dot{\alpha}_i(v) dv. \tag{34}$$

继续对式(34)进行分析,可以得到

$$\|q_i(t)\| \leq$$

$$\|q_i(0)\| e^{-\frac{t}{l_i}} + \sup_{v \in [0, t]} \{\dot{\alpha}_i(v)\} \int_0^t e^{-\frac{t-v}{l_i}} dv \leq \|q_i(0)\| e^{-\frac{t}{l_i}} + l_i \|\dot{\alpha}_i\|_\infty. \tag{35}$$

由于USV的控制输入是有限的,即 $\exists \alpha_{i, \max} > 0$, 有 $\|\dot{\alpha}_i\| \leq \alpha_{i, \max}, \forall t \in [0, \infty]$. 对于第 i 艘USV而言,可以得到

$$\|q_i(t)\| \leq \|q_i(0)\| e^{-t/l_i} + l_i \alpha_{i, \max}. \tag{36}$$

所以, $q_i(t)$ 是有界的,而且满足 $\|q_i(t)\| \leq q_{i, \max}$.

3.2 稳定性证明

定理2 对于由有限时间干扰观测器、辅助动态系统和状态反馈控制器构成的任意系统,闭环系统内的所有信号都是有界的,并且能够在有限时间内跟踪误差收敛到零.

证明 李雅普诺夫函数 V 的表达形式为

$$V = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} z_{i1}^T z_{i1} + \frac{1}{2} z_{i2}^T M_i z_{i2} + \frac{1}{2} \beta_{i1}^T \beta_{i1} + \frac{1}{2} \beta_{i2}^T \beta_{i2} \right\}. \tag{37}$$

对李雅普诺夫函数 V 进行求导,得到

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \left\{ z_{i1}^T \dot{z}_{i1} + z_{i2}^T M_i \dot{z}_{i2} + \beta_{i1}^T \dot{\beta}_{i1} + \beta_{i2}^T \dot{\beta}_{i2} \right\}. \tag{38}$$

由式(26)和杨氏不等式的性质,得到

$$z_{i1}^T \dot{z}_{i1} \leq -z_{i1}^T K_{i1} z_{i1} + a_{id} \|z_{i1}\|^2 + \frac{a_{id}}{2} \|z_{i2}\|^2 + \frac{a_{id}}{2} \|q_i\|^2. \tag{39}$$

同理,可得以下不等式成立:

$$\begin{aligned} z_{i2}^T M_i \dot{z}_{i2} &\leq -z_{i2}^T K_{i2} z_{i2} - \frac{1}{2} \|z_{i2}\|^2 + \frac{1}{2} \|\tilde{d}_i\|^2, \\ \beta_{i1}^T \dot{\beta}_{i1} &\leq -\beta_{i1}^T L_{i1} \beta_{i1} + \frac{a_{id}}{2} \|\beta_{i1}\|^2 + \frac{a_{id}}{2} \|\beta_{i2}\|^2, \\ \beta_{i2}^T \dot{\beta}_{i2} &\leq -\beta_{i2}^T L_{i2} \beta_{i2} + \frac{1}{2} \|\beta_{i2}\|^2 + \frac{1}{2} (\Delta \tau_i)^T (M_i^{-1})^T M_i^{-1} \Delta \tau_i. \end{aligned} \tag{40}$$

将式(39)和(40)代入(38)中,得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \left\{ -(\lambda_{\min}(K_{i1}) - \alpha_{id})\|z_{i1}\|^2 - \right. \\ & \left. \left(\lambda_{\min}(K_{i2}) - \frac{\alpha_{id} + 1}{2} \right) \|z_{i2}\|^2 - \right. \\ & \left. \left(\lambda_{\min}(L_{i1}) - \frac{\alpha_{id}}{2} \right) \|\beta_{i1}\|^2 - \right. \\ & \left. \left(\lambda_{\min}(L_{i2}) - \frac{\alpha_{id} + 1}{2} \right) \|\beta_{i2}\|^2 + \frac{1}{2} \|\tilde{d}_i\|^2 + \right. \\ & \left. \frac{\alpha_{id}}{2} \|q_i\|^2 + \frac{1}{2} (M_i^{-1} \Delta \tau_i)^T M_i^{-1} \Delta \tau_i \right\}. \quad (41) \end{aligned}$$

通过观测器分析,环境干扰估计值在有限时间内会收敛到零.由此可得

$$c_4 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2} \|\tilde{d}_i\|^2 + \frac{\alpha_{id}}{2} q_{i,\max}^2 + \frac{1}{2} \lambda_{\min}((M_i^{-1})^T M_i^{-1}) (\Delta \tau_{i,\max})^2 \right\}. \quad (42)$$

其中: c_4 是有界的,即 $0 < c_4 \leq c_{4,\max}$.

为了保证闭环系统的稳定性,参数 K_{i1}, K_{i2}, L_{i1} 和 L_{i2} 的选择需要满足以下条件:

$$\begin{cases} b_{i1} = \lambda_{\min}(K_{i1}) - \alpha_{id} > 0, \\ b_{i2} = \lambda_{\min}(K_{i2}) - \frac{\alpha_{id} + 1}{2} > 0, \\ b_{i3} = \lambda_{\min}(L_{i1}) - \frac{\alpha_{id}}{2} > 0, \\ b_{i4} = \lambda_{\min}(L_{i2}) - \frac{\alpha_{id} + 1}{2} > 0. \end{cases} \quad (43)$$

将式(42)和(43)代入(41),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \left\{ -b_{i1} \|z_{i1}\|^2 - b_{i2} \|z_{i2}\|^2 - \right. \\ & \left. b_{i3} \|\beta_{i1}\|^2 - b_{i4} \|\beta_{i2}\|^2 \right\} + c_{4,\max} \leq \\ & -bV + c_{4,\max}, \quad (44) \end{aligned}$$

其中 $b = 2 \min\{b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}\} > 0$.

通过分析式(44),满足

$$\begin{aligned} \|z_{i1}\| & > \sqrt{c_{4,\max}/b_{i1}}, \quad \|z_{i2}\| > \sqrt{c_{4,\max}/b_{i2}}, \\ \|\beta_{i1}\| & > \sqrt{c_{4,\max}/b_{i3}}, \quad \|\beta_{i2}\| > \sqrt{c_{4,\max}/b_{i4}} \end{aligned}$$

时, $\dot{V} \leq 0$ 恒成立,且下面的不等式成立:

$$V(t) \leq (V(0) - \frac{c_{4,\max}}{b}) e^{-bt} + \frac{c_{4,\max}}{b}. \quad (45)$$

由此可以得到:闭环系统中的所有信号都是有界的,且 $\|z_{i1}\| \leq \sqrt{2c_{4,\max}/b}, \|\beta_{i1}\| \leq \sqrt{2c_{4,\max}/b}$.

定义一个新的变量,第 i 艘 USV 的跟踪误差 δ_i 满足 $\delta_i = \eta_i - \eta_0 - \mu_i$.

根据式(26),可以得出 $z_1 + \beta_1 = (\mathcal{H} \otimes I_3)\delta$. 其中: $z_1 = [z_{11}^T, \dots, z_{n1}^T]^T, \beta_1 = [\beta_{11}^T, \dots, \beta_{n1}^T]^T$. 且 $\delta = [\delta_1^T, \dots, \delta_n^T]^T$. \mathcal{H} 的定义见1.1节.

由上述分析以及假设1可得

$$\|\delta\| \leq \frac{\sqrt{2c_{4,\max}}}{\lambda_{\min}(\mathcal{H})\sqrt{b}} + \frac{\sqrt{2c_{4,\max}}}{\lambda_{\min}(\mathcal{H})\sqrt{b}}. \quad (46)$$

由式(44)和(46)可得,通过调整控制器和观测器的参数,可以使跟踪误差减小. □

4 仿真结果及分析

假设一个由1艘虚拟领航船和6艘跟随船组成的USV集群,它们的拓扑结构如图2所示,部分参数设置如表1所示.

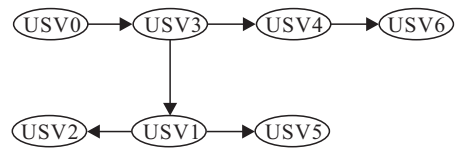


图2 USV集群的拓扑结构

表1 虚拟领航船和6艘USV的初始时刻的位置以及期望的相对位置等参数设置

参数	η_0	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	η_1	η_2	η_3	η_4	η_5	η_6
x/m	12	-2	-1	-1	1	1	2	-2.3	-1.3	-1.3	0.7	1.3	1.7
y/m	12	0	1.7	-1.7	1.7	-1.7	0	0.3	2	-2	2	-2	-0.3
ψ/deg	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

实验1 采用的是本文提出的控制策略.船舶模型为Cybership II^[16],USV输入饱和约束为 $\tau_{i1,\max} = -\tau_{i1,\min} = 2N, \tau_{i2,\max} = -\tau_{i2,\min} = 2N, \tau_{i3,\max} = -\tau_{i3,\min} = 1.5N \cdot m$. 在仿真中,环境干扰为一阶马尔科夫过程^[14].其模型为 $d_j = R_j^T b$,其中 $j = 0, 1, \dots, 6$; b 表示一阶马尔科夫过程,具体的表达式为 $\dot{b} = -T^{-1}b + E_b \vartheta_b, T \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为正定的对角矩阵, $E_b \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为缩放噪声振幅的对角矩阵, $\vartheta_b \in \mathbf{R}^3$ 是关于零均值高斯白噪声标准差的矢量. 参数为: $T = \text{diag}[10^{-3}, 10^{-3}, 10^{-3}], b(0) = [0, 0, 0]^T, \vartheta_b = [0.2, 0.2,$

$0.2]^T, E_b = \text{diag}[10^{-5}, 10^{-5}, 10^{-5}]$. 另外, $\delta_{i1} = 0.75, \delta_{i2} = 0.5, L_{i1} = \text{diag}[10, 10, 10], L_{i2} = \text{diag}[10, 10, 10], K_{i1} = \text{diag}[1.2, 1.2, 1.2], K_{i2} = \text{diag}[0.6, 0.6, 0.6], \iota_i = 0.001$.

仿真结果如图3~图6所示,表2为部分指标的对比.图3为在时变海洋环境干扰和输入饱和约束下6艘USV的集群运动轨迹.由图3可以看出,尽管每艘USV的初始位置存在偏差,但经过调整后,6艘USV的位置和艏向角均能够实现到达预设点.图4为6艘USV的位置和艏向角跟踪误差,可以看出6艘USV跟

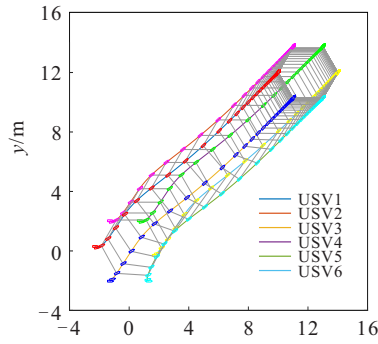


图3 6艘USV的集群运动轨迹

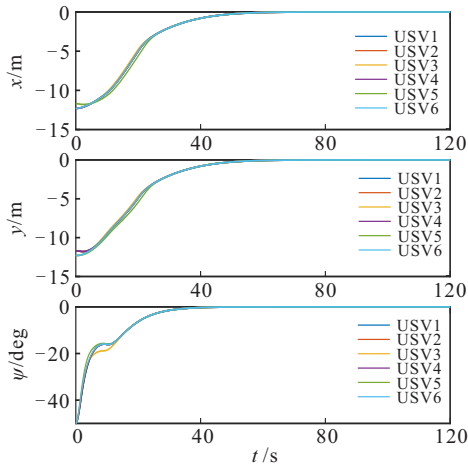


图4 6艘USV的位置和艏向角跟踪误差

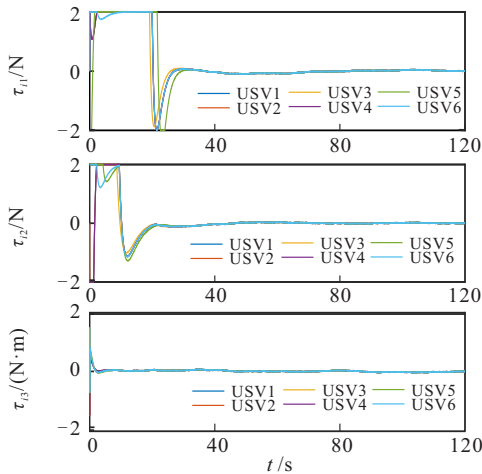


图5 6艘USV的控制输入

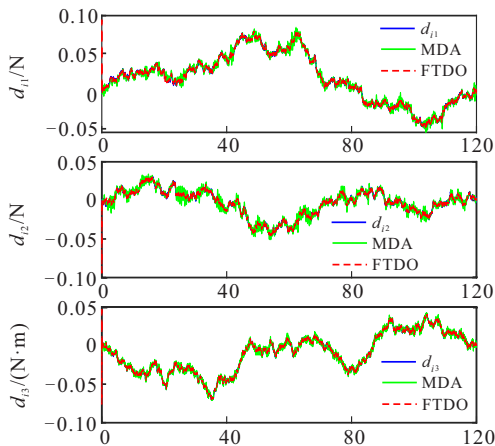


图6 作用于第1艘USV的环境干扰的真实值和估计值

表2 不同方法下的各项指标对比

方法	性能参数	数值
FTDO	观测器估计的稳态误差	0.001
MDA	观测器估计的稳态误差	0.02
考虑辅助动态系统	收敛时间/s	24.2
不考虑辅助动态系统	收敛时间/s	32.0
考虑输入饱和	最大控制力/N	2
不考虑输入饱和	最大控制力/N	200
考虑输入饱和	最大控制力矩/(N·m)	1.5
不考虑输入饱和	最大控制力矩/(N·m)	150

踪误差是收敛的. 图5为6艘USV的控制输入, 通过分析可知, 6艘USV的控制输入被限制在输入约束的范围内, 实现了输入饱和约束. 图6为以第1艘USV为例得到的作用于该船上的时变环境干扰的真实值, 以及分别采用FTDO和MDA方法得到的估计值.

实验2 作为对比组, 采用模块化设计方法(MDA)^[15]来估计环境干扰, 仿真结果见图6, 部分数据见表2. 由图6可以看出, 采用MDA方法得到的环境干扰的跟踪效果低于FTDO方法. 对表2的前两行进行对比可见, FTDO方法得到的稳态误差精度更高, 进一步体现出有限时间干扰观测器的有效性.

实验3 作为对比组, 采用的方法是: 设计的状态反馈控制器没有考虑辅助动态系统或者输入约束的情况, 仿真结果如图7和图8所示, 部分数据见表2.

将图7和图5进行对比可知, 由于所设计的状态反馈控制器仅考虑到输入约束, 在输入受限的情况下, 系统性能低于实验1. 通过对表2的第3行和第4行对比可以得到, 考虑辅助动态系统时, 系统的收敛时间为24.2s; 不考虑时, 系统的收敛时间为32.0s. 由此可以得出结论, 在控制器的设计过程中考虑辅助动态系统, 能够减小系统的收敛时间. 将图8和图5进行对比可知, 所设计的控制器既没有考虑辅助动态系统也没有考虑输入约束, 所以系统执行器的输出力高达200N, 输出力矩高达150N·m, 严重超出系统执行机

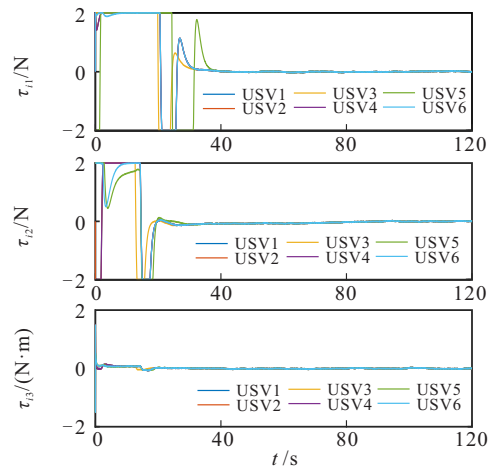


图7 仅考虑输入约束时6艘USV的控制输入

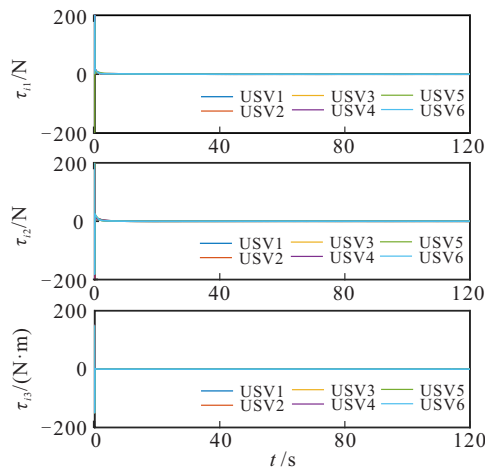


图8 输入约束和辅助动态系统都不考虑时6艘USV的控制输入

构能够提供的最大力和力矩. 通过对表2的后面4行进行对比, 两者相差甚远, 结果更为显著.

5 结论

本文研究了在时变环境干扰和输入饱和和约束存在的条件下, 基于状态反馈控制器的多无人水面船集群控制问题. 首先, 为了实现对时变环境干扰的估计, 提出了一种有限时间干扰观测器; 其次, 为了解决输入饱和约束, 采用了一种辅助动态系统; 然后, 从系统的架构出发, 为了实现对多无人水面船的集群控制, 提出了一种基于状态反馈的控制器; 同时, 采用李雅普诺夫方法证明了系统的稳定性; 最后, 通过仿真验证了所提出的状态反馈控制器的有效性. 该研究对USV的集群控制及相关内容的探索具有一定的参考价值. 然而, 在设计控制器的过程中, 本文没有将模型不确定性、避碰和避障等问题考虑在内, 仍存在一定的局限性, 这将是下一阶段研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Zhang J Q, Yu S H, Yan Y. Fixed-time output feedback trajectory tracking control of marine surface vessels subject to unknown external disturbances and uncertainties[J]. ISA Transactions, 2019, 93: 145-155.
- [2] Wu Y, Low K H, Lv C. Cooperative path planning for heterogeneous unmanned vehicles in a search-and-track mission aiming at an underwater target[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6782-6787.
- [3] Mahacek P, Kitts C A, Mas I. Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 65-75.
- [4] Lu Y, Zhang G Q, Sun Z J, et al. Adaptive cooperative formation control of autonomous surface vessels with

uncertain dynamics and external disturbances[J]. Ocean Engineering, 2018, 167: 36-44.

- [5] Li X J, Shi P, Wang Y G. Distributed cooperative adaptive tracking control for heterogeneous systems with hybrid nonlinear dynamics[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 95(3): 2131-2141.
 - [6] Jia Z H, Hu Z H, Zhang W D. Adaptive output-feedback control with prescribed performance for trajectory tracking of underactuated surface vessels[J]. ISA Transactions, 2019, 95: 18-26.
 - [7] Yu J P, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 2018, 92: 173-180.
 - [8] Miao G Y, Ma Q, Liu Q Q. Consensus problems for multi-agent systems with nonlinear algorithms[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(5): 1327-1336.
 - [9] Chen M, Ge S S, Ren B B. Adaptive tracking control of uncertain MIMO nonlinear systems with input constraints[J]. Automatica, 2011, 47(3): 452-465.
 - [10] Xia G Q, Sun C, Zhao B, et al. Neuroadaptive distributed output feedback tracking control for multiple marine surface vessels with input and output constraints[J]. IEEE Access, 2019, 7: 123076-123085.
 - [11] Xia G Q, Sun C, Zhao B, et al. Cooperative control of multiple dynamic positioning vessels with input saturation based on finite-time disturbance observer[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(2): 370-379.
 - [12] Zhang X F, Liu L, Feng G. Leader-follower consensus of time-varying nonlinear multi-agent systems[J]. Automatica, 2015, 52: 8-14.
 - [13] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
 - [14] Fossen T I, Strand J P. Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: Full-scale experiments with a supply vessel[J]. Automatica, 1999, 35(1): 3-16.
 - [15] Peng Z H, Wang D, Wang J. Cooperative dynamic positioning of multiple marine offshore vessels: A modular design[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3): 1210-1221.
 - [16] Skjetne R, Fossen T I, Kokotovi P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. Automatica, 2005, 41(2): 289-298.
- 作者简介
- 夏国清(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事动力定位、无人水面船等研究, E-mail: xiaguqing@hrbeu.edu.cn;
- 孙显信(1990—), 男, 博士生, 从事多无人水面船集群控制的研究, E-mail: hrbsunxianxin@hrbeu.edu.cn;
- 任哲达(1992—), 男, 博士生, 从事船舶运动控制和多船、协同控制的研究, E-mail: renzheda@hrbeu.edu.cn.