



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116382313 A  
(43) 申请公布日 2023. 07. 04

(21) 申请号 202310470876.1  
(22) 申请日 2023.04.27  
(71) 申请人 浙江大学  
地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号  
(72) 发明人 黄豪彩 宋子龙 吴哲远 王卿 谢苗苗  
(74) 专利代理机构 杭州天勤知识产权代理有限公司 33224  
专利代理师 彭剑  
(51) Int.Cl.  
G05D 1/06 (2006.01)

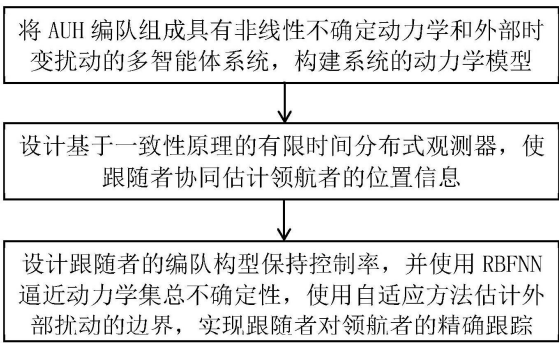
权利要求书3页 说明书11页 附图4页

## (54) 发明名称

一种考虑通信受限的AUH协同编队控制方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,包括:(1) 将AUH编队组成具有非线性不确定动力学和外部时变扰动的多智能体系统,并构建系统的动力学模型;(2) 设计基于一致性原理的有限时间分布式观测器,使跟随者协同估计领航者的位置信息;(3) 在控制器中,设计跟随者的编队构型保持控制率,并使用RBFNN逼近动力学集总不确定性,使用自适应方法估计外部扰动的边界,实现跟随者对领航者的精确跟踪。本发明充分考虑了水下环境的复杂性可能会限制AUH之间的信息交换,使跟随者能够协同观测和获取领航者的状态信息,能够更有效的进行跟踪控制。



1. 一种考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,其特征在于,包括:

(1) 将AUH编队组成具有非线性不确定动力学和外部时变扰动的多智能体系统,并构建系统的动力学模型;

(2) 设计基于一致性原理的有限时间分布式观测器,使跟随者协同估计领航者的位置信息;

(3) 在控制器中,设计跟随者的编队构型保持控制率,并使用RBFNN逼近动力学集总不确定性,使用自适应方法估计外部扰动的边界,实现跟随者对领航者的精确跟踪。

2. 根据权利要求1所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,其特征在于,步骤(1)中,系统的动力学模型如下:

$$\dot{\eta}_i = J(\eta_i)v_i$$

$$M\dot{v}_i = -C(v_i)v_i - D(v_i)v_i - \Delta(\eta_i, v_i) + \tau_{d,i} + \tau_i$$

式中,下标*i*表示第*i*个智能体,  $i \in \mathcal{N} = [0, 1, \dots, N]$ , 其中0表示AUH编队的领航者, 1, 2, ..., *N*代表AUH编队的跟随者;  $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i]^T$  表示在世界坐标系下的位移和航向偏角,  $v_i = [u_i, v_i, w_i, p_i, q_i, r_i]^T$  表示在体坐标系下的线速度和角速度, *M*表示包含附加质量的惯性矩阵, *J*( $\eta_i$ )表示世界坐标系和体坐标系之间的坐标转换矩阵, *C*( $v_i$ )表示具有不确定性的科氏力和向心力矩阵, *D*( $v_i$ )表示具有不确定性的水动力阻尼矩阵,  $\Delta(\eta_i, v_i)$ 表示系统的未建模动力学部分,  $\tau_{d,i}$ 表示外部时变扰动,  $\tau_i \in \mathbb{R}^6$ 表示控制输入。

3. 根据权利要求2所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,其特征在于,跟随者之间的通信拓扑结构由无向图 $\mathcal{G}_1$ 描述,整个AUH编队的通信拓扑结构通过有向图 $\mathcal{G}_2$ 建立,领航者和跟随者之间的通信是单向的,信息传输只能由领航者发起。

4. 根据权利要求2所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,其特征在于,步骤(2)中,设计的有限时间分布式观测器如下:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\eta}}_0^i = & -k_1 \text{sig}^{\beta_2} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \\ & -k_2 \text{sig} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \end{aligned}$$

式中,  $\hat{\eta}_0^i$ 表示分布式观测器获得的第*i*个跟随者对 $\eta_0$ 的观测值,  $\hat{\eta}_0^j$ 表示第*j*个跟随者对 $\eta_0$ 的观测值,  $\beta_2 \in (0, 1)$ 为参数,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > \|\dot{\eta}_0\|_\infty$ 为观测器增益;  $a_{ij}$ 为跟随者之间的邻接系数, 如果第*i*个跟随者能够获得*j*个跟随者的信息, 则 $a_{ij} = 1$ , 反之,  $a_{ij} = 0$ ;  $c_i$ 为跟随者与领航者之间的邻接系数, 如果第*i*个跟随者能够获得领航者的信息, 则 $c_i = 1$ , 反之,  $c_i = 0$ 。

5. 根据权利要求4所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法,其特征在于,步骤(3)中,跟随者的编队构型保持控制率设计为

$$\tau_i = M \left[ -K_{2,i} z_{2,i} - J^T(\eta_i) z_{1,i} + \hat{W}_i^T S(Y_i) + \dot{\alpha}_i - \tau_{c,i} \right]$$

式中,  $K_{2,i}$ 为增益对角矩阵,  $z_{1,i}$ 为跟踪误差,  $z_{2,i}$ 为误差变量,  $\dot{\alpha}_i$ 为虚拟控制率 $\alpha_i$ 的一阶时间导数,  $\tau_i$ 为跟随者的编队构型保持控制率,  $\hat{W}_i^T$ 是 $W_i^{*T}$ 的估计值,

$W_i^{*T} = \text{blockdiag}[W_{i1}^{*T}, \dots, W_{i6}^{*T}] \in R^{6 \times 6q}$ ,  $S(Y_i) = [S_1^T(Y_i), \dots, S_6^T(Y_i)]^T \in R^{6q}$ ;  $\tau_{c,i} = [\tau_{c,i1}, \dots, \tau_{c,i6}]^T$  为扰动补偿项, 其中  $\tau_{c,i,j}$  设计为

$$\tau_{c,i,j} = \hat{\tau}_{d,i,j}^* \tanh\left(\frac{z_{2,i,j} \hat{\tau}_{d,i,j}^*}{s}\right)$$

式中,  $s > 0$  为设计参数,  $\hat{\tau}_{d,i,j}^*$  为  $\tau_{d,i,j}^*$  的估计值, 其更新率设计为

$$\dot{\hat{\tau}}_{d,i,j}^* = \gamma_d |z_{2,i,j}|$$

式中,  $\gamma_d > 0$  为设计参数。

6. 根据权利要求5所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法, 其特征在于, 跟踪误差  $z_{1,i}$  表示为:

$$z_{1,i} = \eta_i - \hat{\eta}_{r,i} = [z_{1,i1}, \dots, z_{1,i6}]^T$$

式中,  $\hat{\eta}_{r,i}$  为第  $i$  个AUH的参考跟踪轨迹, 公式为:

$$\hat{\eta}_{r,i} = \hat{\eta}_0^i + \eta_i^*$$

式中,  $\hat{\eta}_0^i$  为由分布式观测器获得的观测值,  $\eta_i^*$  为决定编队构型的相对位置向量。

7. 根据权利要求6所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法, 其特征在于, 虚拟控制率  $\alpha_i$  表示为:

$$\alpha_i = J^T(\eta_i) (-z_{1,i} + \dot{\hat{\eta}}_{r,i})$$

式中,  $\dot{\hat{\eta}}_{r,i}$  为  $\hat{\eta}_{r,i}$  的一阶时间导数。

8. 根据权利要求7所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法, 其特征在于, 误差变量  $z_{2,i}$  定义为:

$$z_{2,i} = v_i - \alpha_i$$

式中,  $v_i$  为虚拟控制变量, 误差变量  $z_{2,i}$  的导数计算为:

$$\dot{z}_{2,i} = -M^{-1}[C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] + \tau_{M,i} + M^{-1}\tau_i - \dot{\alpha}_i$$

式中,  $\tau_{M,i} = M^{-1}\tau_{d,i}$  代表扰动项, 假设外部时变扰动是有界的, 扰动项未知上界  $\tau_{d,i}^*$ , 即满足关系

$$|\tau_{M,i}| \leq \tau_{d,i}^*$$

式中,  $\tau_{d,i}^* = [\tau_{d,i1}^*, \dots, \tau_{d,i6}^*]^T$  为未知常数向量。

9. 根据权利要求8所述的考虑通信受限的AUH协同编队控制方法, 其特征在于, 步骤(3)中, 在控制率中使用RBFNN逼近动力学集总不确定性包括:

令  $F_i(Y_i) = M^{-1}[C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] = [f_{i1}(Y_i), \dots, f_{i6}(Y_i)]^T$  为动力学集总不确定项, 使用RBFNN对其逼近

$$f_{ij}(Y_i) = W_{ij}^{*T} S_j(Y_i) + \varepsilon_{ij}$$

式中,  $\Upsilon_i = [\eta_i^T, \nu_i^T]^T \in R^{12}$ ;

RBFNN权重系数的更新率设计为

$$\dot{\hat{W}}_{ij} = -\Lambda_{1,ij} S_j(\Upsilon_i) z_{2,ij} - k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$$

式中,  $\Lambda_{1,ij} > 0$  为待设计增益矩阵,  $k_{W,ij}$  为正常数,  $-\Lambda_{1,ij} S_j(\Upsilon_i) z_{2,ij}$  为自适应项,  $k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$  为协同项。

## 一种考虑通信受限的AUV协同编队控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于水下直升机编队控制领域,尤其是涉及一种考虑通信受限的AUV协同编队控制方法。

### 背景技术

[0002] 随着海洋装备体系的完善与进步,自主水下航行器AUV因其智能化、灵活机动等优点在海洋监测、海洋观测等领域得到广泛的应用。一种称为水下直升机 (Autonomous underwater helicopter, AUH) 的新型AUV,由于其特殊的结构及推进方式,在抵近观测、定点悬停等方面具有突出优势,更加适合上述任务。同时,多AUV编队在复杂海洋环境中协同作业时具有良好的协同性、鲁棒性和容错性,因此水下智能体的编队协同控制问题成为科研工作者的研究热点之一。

[0003] 水下多智能体编队控制的复杂性来自多个方面,包括AUH具有复杂的未知非线性动力学,水下环境存在未知时变扰动,AUH编队内部存在通信时延和失效等。现有研究对以上问题提出了一些有效的解决方案,径向基函数神经网络 (Radial basis function neural network, RBFNN) 广泛用于逼近系统的动力学不确定项,外部扰动的应对策略包括扰动观测器和状态扩张观测器等。

[0004] 如公开号为CN113821028A的中国专利文献公开了一种基于分布式模型预测控制的欠驱动AUV编队轨迹跟踪控制方法,利用径向基函数神经网络逼近不确定的部分系统方程,结合最小学习参数法,减小计算复杂度。

[0005] 公开号为CN113009826A的中国专利文献公开了一种基于新型误差变换的AUV预设性能轨迹跟踪控制方法,采用了改进的性能函数和新的误差变换方法,使AUV轨迹跟踪误差能够在规定的时间内收敛。

[0006] 上述方案充分研究了使用各种策略控制AUV精确跟踪参考轨迹,然而,以上方法通常假设编队内的所有AUH均能不受限制的获取领航者的状态信息,而没有考虑受水下环境的通讯范围受限,并非所有跟随者均能接收到领航者的状态信息。同时,使用扰动观测器处理外部时变扰动加重了控制器的负担,也限制了误差的收敛速度。

### 发明内容

[0007] 本发明提供了一种考虑通信受限的AUV协同编队控制方法,充分考虑了水下环境的复杂性可能会限制AUH之间的信息交换,使跟随者能够协同观测和获取领航者的状态信息,能够更有效的进行跟踪控制。

[0008] 一种考虑通信受限的AUV协同编队控制方法,包括:

[0009] (1) 将AUH编队组成具有非线性不确定动力学和外部时变扰动的多智能体系统,并构建系统的动力学模型;

[0010] (2) 设计基于一致性原理的有限时间分布式观测器,使跟随者协同估计领航者的位置信息;

[0011] (3) 在控制器中,设计跟随者的编队构型保持控制率,并使用RBFNN逼近动力学集总不确定性,使用自适应方法估计外部扰动的边界,实现跟随者对领航者的精确跟踪。

[0012] 本发明充分考虑AUH间的通信受限问题,提出基于一致性原理的有限时间分布式观测器,协同估计领航者的状态信息。另外,在控制器中使用协同径向基函数神经网络RBFNN,动力学信息将在跟随者之间共享,加快神经网络对动力学不确定项的逼近速度。最后,使用自适应方法估计外部扰动的边界,并将其通过一种特定的方式引入控制器,以补偿外界扰动。

[0013] 步骤(1)中,系统的动力学模型如下:

$$[0014] \quad \dot{\eta}_i = J(\eta_i) v_i$$

$$[0015] \quad M \dot{v}_i = -C(v_i) v_i - D(v_i) v_i - \Delta(\eta_i, v_i) + \tau_{d,i} + \tau_i$$

[0016] 式中,下标*i*表示第*i*个智能体,  $i \in \mathcal{N} = [0, 1, \dots, N]$ , 其中0表示AUH编队的领航者,  $1, 2, \dots, N$ 代表AUH编队的跟随者;  $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \varphi_i, \theta_i, \psi_i]^T$ 表示在世界坐标系下的位移和航向偏角,  $v_i = [u_i, v_i, w_i, p_i, q_i, r_i]^T$ 表示在体坐标系下的线速度和角速度,  $M$ 表示包含附加质量的惯性矩阵,  $J(\eta_i)$ 表示世界坐标系和体坐标系之间的坐标转换矩阵,  $C(v_i)$ 表示具有不确定性的科氏力和向心力矩阵,  $D(v_i)$ 表示具有不确定性的水动力阻尼矩阵,  $\Delta(\eta_i, v_i)$ 表示系统的未建模动力学部分,  $\tau_{d,i}$ 表示外部时变扰动,  $\tau_i \in R^6$ 表示控制输入。

[0017] 跟随者之间的通信拓扑结构由无向图 $\mathcal{G}_1$ 描述,整个AUH编队的通信拓扑结构通过有向图 $\mathcal{G}_2$ 建立,领航者和跟随者之间的通信是单向的,信息传输只能由领航者发起。

[0018] 步骤(2)中,设计的有限时间分布式观测器如下:

$$[0019] \quad \begin{aligned} \dot{\hat{\eta}}_0^i = & -k_1 \text{sig}^{\beta_2} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \\ & -k_2 \text{sig} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \end{aligned}$$

[0020] 式中,  $\hat{\eta}_0^i$ 表示分布式观测器获得的第*i*个跟随者对 $\eta_0$ 的观测值,  $\hat{\eta}_0^j$ 表示第*j*个跟随者对 $\eta_0$ 的观测值,  $\beta_2 \in (0, 1)$ 为参数,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > \|\dot{\eta}_0\|_\infty$ 为观测器增益;  $a_{ij}$ 为跟随者之间的邻接系数,如果第*i*个跟随者能够获得*j*个跟随者的信息,则 $a_{ij}=1$ ,反之,  $a_{ij}=0$ ;  $c_i$ 为跟随者与领航者之间的邻接系数,如果第*i*个跟随者能够获得领航者的信息,则 $c_i=1$ ,反之,  $c_i=0$ 。

[0021] 步骤(3)中,跟随者的编队构型保持控制率设计为

$$[0022] \quad \tau_i = M \left[ -K_{2,i} z_{2,i} - J^T(\eta_i) z_{1,i} + \hat{W}_i^T S(\Upsilon_i) + \dot{\alpha}_i - \tau_{c,i} \right]$$

[0023] 式中,  $K_{2,i}$ 为增益对角矩阵,  $z_{1,i}$ 为跟踪误差,  $z_{2,i}$ 为误差变量,  $\dot{\alpha}_i$ 为虚拟控制率 $\alpha_i$ 的一阶时间导数,  $\tau_i$ 为跟随者的编队构型保持控制率,  $\hat{W}_i^T$ 是 $W_i^{*T}$ 的估计值,

$$W_i^{*T} = \text{blockdiag} [W_{i1}^{*T}, \dots, W_{i6}^{*T}] \in R^{6 \times 6q}, S(\Upsilon_i) = [S_1^T(\Upsilon_i), \dots, S_6^T(\Upsilon_i)]^T \in R^{6q}; \tau_{c,i} = [\tau_{c,i1}, \dots, \tau_{c,i6}]^T$$

为扰动补偿项,其中 $\tau_{c,i,j}$ 设计为

$$[0024] \quad \tau_{c,ij} = \hat{\tau}_{d,ij}^* \tanh\left(\frac{z_{2,ij} \hat{\tau}_{d,ij}^*}{s}\right)$$

[0025] 式中,  $s > 0$  为设计参数,  $\hat{\tau}_{d,ij}^*$  为  $\tau_{d,ij}^*$  的估计值, 其更新率设计为

$$[0026] \quad \dot{\hat{\tau}}_{d,ij}^* = \gamma_d |z_{2,ij}|$$

[0027] 式中,  $\gamma_d > 0$  为设计参数。

[0028] 跟踪误差  $z_{1,i}$  表示为:

$$[0029] \quad z_{1,i} = \eta_i - \hat{\eta}_{r,i} = [z_{1,i1}, \dots, z_{1,i6}]^T$$

[0030] 式中,  $\hat{\eta}_{r,i}$  为第  $i$  个 AUH 的参考跟踪轨迹, 公式为:

$$[0031] \quad \hat{\eta}_{r,i} = \hat{\eta}_0^i + \eta_i^*$$

[0032] 式中,  $\hat{\eta}_0^i$  为由分布式观测器获得的观测值,  $\eta_i^*$  为决定编队构型的相对位置向量。

[0033] 虚拟控制率  $\alpha_i$  表示为:

$$[0034] \quad \alpha_i = J^T(\eta_i) (-z_{1,i} + \dot{\hat{\eta}}_{r,i})$$

[0035] 式中,  $\dot{\hat{\eta}}_{r,i}$  为  $\hat{\eta}_{r,i}$  的一阶时间导数。

[0036] 误差变量  $z_{2,i}$  定义为:

$$[0037] \quad z_{2,i} = v_i - \alpha_i$$

[0038] 式中,  $v_i$  为虚拟控制变量, 误差变量  $z_{2,i}$  的导数计算为:

$$[0039] \quad \dot{z}_{2,i} = -M^{-1} [C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] + \tau_{M,i} + M^{-1}\tau_i - \dot{\alpha}_i$$

[0040] 式中,  $\tau_{M,i} = M^{-1}\tau_{d,i}$  代表扰动项, 假设外部时变扰动是有界的, 扰动项未知上界  $\tau_{d,i}^*$ , 即满足关系

$$[0041] \quad |\tau_{M,i}| \leq \tau_{d,i}^*$$

[0042] 式中,  $\tau_{d,i}^* = [\tau_{d,i1}^*, \dots, \tau_{d,i6}^*]^T$  为未知常数向量;

[0043] 步骤 (3) 中, 在控制率中使用 RBFNN 逼近动力学集总不确定性包括:

[0044] 令  $F_i(\gamma_i) = M^{-1} [C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] = [f_{i1}(\gamma_i), \dots, f_{i6}(\gamma_i)]^T$  为动力学集总不确定项, 使用 RBFNN 对其逼近

$$[0045] \quad f_{ij}(\gamma_i) = W_{ij}^{*T} S_j(\gamma_i) + \varepsilon_{ij}$$

[0046] 式中,  $\gamma_i = [\eta_i^T, v_i^T]^T \in R^{12}$ ;

[0047] RBFNN 权重系数的更新率设计为

$$[0048] \quad \dot{\hat{W}}_{ij} = -\Lambda_{1,ij} S_j(\gamma_i) z_{2,ij} - k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$$

[0049] 式中,  $\Lambda_{1,ij} > 0$  为待设计增益矩阵,  $k_{W,ij}$  为正常数,  $-\Lambda_{1,ij} S_j(\gamma_i) z_{2,ij}$  为自适应项,

$k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$  为协同项。

[0050] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0051] 1、本发明充分考虑了水下环境的复杂性可能会限制AUH之间的信息交换,提出了基于一致性原理的分布式观测器,使跟随者能够协同观测和获取领航者的状态信息。

[0052] 2、本发明在设计控制率时考虑了外部时变扰动。使用自适应方法估计扰动的边界,并将估计值以一种特定的方式应用于控制率,以补偿外界扰动。另外,相比于使用神经网络逼近扰动的方法,本发明提出的策略将实现更精确的逼近。

[0053] 3、本发明中,在RBFNN中引入协同项  $k_{w,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{w}_{ij} - \hat{w}_{kj})$ ,能够将每个AUH通过自适应方法对动力学不确定性的估计值,基于一致性原理以协同的方式共享给它的邻点AUH。因此加入协同项的RBFNN具有更好的泛化能力,更适用于编队控制问题。

## 附图说明

[0054] 图1为本发明一种考虑通信受限的AUH协同编队控制方法流程图;

[0055] 图2为本发明中AUH通信拓扑结构示意图;

[0056] 图3为本发明实施例中有限时间分布式观测器的观测值;

[0057] 图4为本发明实施例中基于自适应的控制算法作用下的跟踪误差;

[0058] 图5为本发明实施例中径向基函数神经网络逼近误差;

[0059] 图6为本发明实施例中AUH系统的控制输入示意图;

[0060] 图7为本发明实施例中AUH编队路径跟踪示意图。

## 具体实施方式

[0061] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步详细描述,需要指出的是,以下所述实施例旨在便于对本发明的理解,而对其不起任何限定作用。

[0062] 本发明的核心内容分两步实现,首先,充分考虑水下环境通信距离受限的问题,设计基于一致性原理的有限时间分布式观测器,协同观测领航者的位置信息。其次,设计跟随者的编队构型保持控制率,实现跟随者对领航者的精确跟踪,控制器在自适应控制框架下搭建,主要技术包括基于一致性原理的有限时间分布式观测器设计、外部扰动的自适应补偿方法、径向基函数神经网络协同逼近动力学不确定项。

[0063] 本发明的研究对象为一个由N+1个AUH组成的具有非线性不确定动力学和外部时变扰动的多智能体系统,系统的动力学模型表示为

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i &= J(\eta_i) v_i \\ M \dot{v}_i &= -C(v_i) v_i - D(v_i) v_i - \Delta(\eta_i, v_i) + \tau_{d,i} + \tau_i \end{aligned} \quad (1)$$

[0065] 式中,下标i表示第i个智能体,  $i \in \mathcal{N} = [0, 1, \dots, N]$ , 其中0表示领航者-AUH, 1, 2, ..., N代表跟随者-AUHs。  $\eta_i = [x_i, y_i, z_i, \varphi_i, \theta_i, \psi_i]^T$  表示在世界坐标系下的位移和航向偏角,  $v_i = [u_i, v_i, w_i, p_i, q_i, r_i]^T$  表示在体坐标系下的线速度和角速度, M表示包含附加质量的惯性矩阵,  $J(\eta_i)$  表示世界坐标系和体坐标系之间的坐标转换矩阵,  $C(v_i)$  表示具有不确定性的科氏力和向心力矩阵,  $D(v_i)$  表示具有不确定性的水动力阻尼矩阵,  $\Delta(\eta_i, v_i)$  表示系统的未建模动力学部分,  $\tau_{d,i}$  表示外部时变扰动,  $\tau_i \in \mathbb{R}^6$  表示控制输入。



[0066] AUH编队之间的通信拓扑结构用图论来描述,领航者-AUH用0表示,跟随者-AUH用 $1, \dots, n$ 表示。

[0067] 定义图 $\mathcal{G}=(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A}, \mathcal{L})$ , 式中, $\mathcal{V}=\{b_1, \dots, b_n\}$ 表示顶点集合, $\mathcal{E} \subseteq \{(b_i, b_k) | b_i, b_k \in \mathcal{V}, b_i \neq b_k\}$ 表示邻边集合(the edge set), 顶点 $b_i$ 的邻居集(The neighbor set of node  $b_i$ ) 定义为 $\mathcal{N}_i = \{b_k \in \mathcal{V}, (b_k, b_i) \in \mathcal{E}\}$ 。 $\mathcal{A}=[a_{ik}] \in R^{n \times n}$ 表示加权邻接矩阵(the weighted adjacency matrix of  $\mathcal{G}$ ), 如果 $(b_i, b_k) \in \mathcal{E}$ , 那么 $a_{ik} > 0$ , 反之 $a_{ik} = 0$ 。拉普拉斯算子矩阵(The Laplacian matrix)  $\mathcal{L}=[l_{ik}] \in R^{n \times n}$  定义为 $l_{ii} = \sum_{k \in \mathcal{N}_i} a_{ik}$ ,  $l_{ik} = -a_{ik}$ 。此外, 如果 $(b_i, b_k) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (b_k, b_i) \in \mathcal{E}$ , 则定义 $\mathcal{G}$ 为无向图, 反之 $\mathcal{G}$ 为有向图。在有向图中, 如果存在 $(b_1, b_2), \dots, (b_{k-1}, b_k)$ 形式的边序列, 那么称其为由顶点 $b_1$ 到顶点 $b_k$ 的有向路径, 同时, 顶点 $b_k$ 对于顶点 $b_1$ 是可抵达的(reachable)。在无向图中,  $(b_1, b_2), \dots, (b_{k-1}, b_k)$ 形式的边序列表示由顶点 $b_1$ 到顶点 $b_k$ 的无向路径, 此外, 如果每个顶点对(node pair)之间有一条无向路径, 则无向图是连接的(connected)。在有向图中, 一条有向边表示为 $(b_i, b_k) \in \mathcal{E}$ , 其中 $b_i$ 称为父顶点,  $b_k$ 称为子顶点。有向树是一个有向图, 其中每个节点只有一个父节点, 只有一个称为根节点的节点没有父节点, 并且其他节点对于根节点都是可抵达的。定义有向图中包含有向生成树当且仅当有向图中至少有一个节点可以到达每个其他节点。

[0068] 跟随者之间的通信拓扑结构由无向图 $\mathcal{G}_1=(\mathcal{V}_1, \mathcal{E}_1, \mathcal{A}_1, \mathcal{L}_1)$ 描述。整个AUHs编队的通信拓扑结构可以通过有向图 $\mathcal{G}_2=(\mathcal{V}_2, \mathcal{E}_2, \mathcal{A}_2, \mathcal{L}_2)$ 建立, 其中, $\mathcal{V}_2 = \mathcal{V}_1 \cup \{0\}$ 。领航者和跟随者之间的通信是单向的, 这意味着信息传输只能由领航者发起。 $\mathcal{C}=\text{diag}[c_1, \dots, c_n]$  定义为领航者的加权邻接矩阵, 其中, 下标 $i \in \mathcal{V}_1$ ,  $c_i > 0$ 表示第 $i$ 个跟随者与领航者相连, 否则,  $c_i = 0$ 。

[0069] 在本发明中, RBFNN将被用逼近未知非线性函数 $f(x): R^m \rightarrow R$ 。

$$[0070] \quad f(x) = W^{*T} S(x) + \varepsilon \quad (2)$$

[0071] 式中,  $W^* = [W_1^*, \dots, W_q^*]^T \in R^q$  为最优权重系数向量,  $\varepsilon$  为固有逼近误差, 满足 $|\varepsilon| \leq \bar{\varepsilon}$ , 其中,  $\bar{\varepsilon}$  为未知小常数,  $S(x) = [s_1(x), \dots, s_q(x)]^T \in R^q$  为基函数向量, 其中 $q$ 为神经网络的节点个数,  $s_i(x)$  为高斯激活函数。

$$[0072] \quad s_i(x) = \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^T (x - \mu_i)}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

[0073] 式中,  $\mu_i$  和 $\sigma$ 分别表示第 $i$ 个节点的中心和基宽。

[0074] 本发明中, 关于有限时间收敛定理, 一个系统的表达如下

$$[0075] \quad \dot{x} = f(x), f(0) = 0, x \in R^n \quad (4)$$

[0076] 对于公式(4)表示的系统, 如果存在连续正定函数 $V(x)$ 满足 $\dot{V}(x) \leq -kV(x)^m$ , 式中,  $k > 0$ ,  $0 < m < 1$ ,  $x \in R^n \wedge x \neq 0$ , 则系统将在有限时间 $T$ 收敛至0, 有限时间 $T$ 计算为

$$T \leq \frac{V^{1-m}(x(0))}{k(1-m)}。$$

[0077] 本发明的必要假设如下：

[0078] 假设一：无向图  $\mathcal{G}_1 = (\mathcal{V}_1, \mathcal{E}_1, \mathcal{A}_1, \mathcal{L}_1)$  是连通的。

[0079] 假设二：领航者的邻接权重矩阵  $\mathcal{C} \neq \text{diag}[1, \dots, 1]$ ,  $\mathcal{C} \neq 0$ 。

[0080] 假设三：虚拟领航者的轨迹  $\eta_0$  及其导数  $\dot{\eta}_0$ 、 $\ddot{\eta}_0$  是有界的，

[0081] 假设四：外部时变扰动  $\tau_{d,i}$  是有界的。

[0082] 如图1所示，一种考虑通信受限的AUH协同编队控制方法，包括：

[0083] 步骤一：将AUH编队组成具有非线性不确定动力学和外部时变扰动的多智能体系统，并构建系统的动力学模型。

[0084] 步骤二：设计基于一致性原理的有限时间分布式观测器，使跟随者协同估计领航者的位置信息。

[0085] 由假设二可知，并不是所有的跟随者都能接收到领航者的信息，即有一部分跟随者无法获得领航者的状态信息，本发明中提出基于一致性原理的有限时间分布式观测器，使跟随者能够协同估计领航者的状态信息。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\eta}}_0^i = & -k_1 \text{sig}^{\beta_2} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \\ & -k_2 \text{sig} \left[ \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{\eta}_0^i - \hat{\eta}_0^j) + c_i (\hat{\eta}_0^i - \eta_0) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

[0087] 式中， $\hat{\eta}_0^i$  表示第  $i$  个跟随者对  $\eta_0$  的估计值， $\beta_2 \in (0, 1)$  为参数， $k_1 > 0$ ,  $k_2 > \|\dot{\eta}_0\|_\infty$  为观测器增益。

[0088] 在假设1成立和  $\dot{\eta}_0$  有界的前提下，观测器对应公式 (5) 的估计误差在有限时间内收敛。

[0089] 本步骤的证明过程如下：

[0090] 估计误差和误差向量分别表示为  $\tilde{\eta}_0^i = \hat{\eta}_0^i - \eta_0$ 、 $\tilde{\eta}_0 = [\tilde{\eta}_0^{1T}, \dots, \tilde{\eta}_0^{nT}]^T$ ，选择Lyapunov 函数为

$$V_{ob} = \frac{1}{2} \tilde{\eta}_0^T ((\mathcal{L}_1 + \mathcal{C}) \otimes I_6) \tilde{\eta}_0 \quad (6)$$

[0092] 通过定义  $\zeta = [\zeta_1, \dots, \zeta_{6n}]^T = ((\mathcal{L}_1 + \mathcal{C}) \otimes I_6) \tilde{\eta}_0$ ，式 (6) 可重写为

$$V_{ob} = \frac{1}{2} \tilde{\eta}_0^T \zeta \quad (7)$$

[0094] 根据假设1， $\mathcal{L}_1 + \mathcal{C} > 0$ ，由此可知

$$V_{ob} \leq \lambda_{\max}(\mathcal{L}_1 + \mathcal{C}) \|\tilde{\eta}_0\|_2^2 / 2 \quad (8)$$

[0096] 对 (7) 求导可得到  $\dot{V}_{ob}$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ob} &= \zeta^T [-k_1 \text{sig}^{\beta_2}(\zeta) - k_2 \text{sig}(\zeta) - \dot{\eta}_{0L}] \\ &= -k_1 \zeta^T \text{sig}^{\beta_2}(\zeta) - k_2 \|\zeta\|_1 - \zeta^T \dot{\eta}_{0L} \end{aligned} \quad (9)$$

[0098] 式中,  $\dot{\eta}_{0L} = \mathbf{1}_n \otimes \dot{\eta}_0$ 。由赫尔德不等式可知

$$\begin{aligned} [0099] \quad \|\zeta\|_1 &= \sum_{i=1}^{6n} (|\zeta_i| \times 1) \\ [0100] \quad &\leq \left( \sum_{i=1}^{6n} |\zeta_i|^{1+\beta_2} \right)^{\frac{1}{1+\beta_2}} \left( \sum_{i=1}^{6n} 1^{\frac{1+\beta_2}{\beta_2}} \right)^{\frac{\beta_2}{1+\beta_2}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$= \left[ \zeta^T \text{sig}^{\beta_2}(\zeta) \right]^{\frac{1}{1+\beta_2}} (6n)^{\frac{\beta_2}{1+\beta_2}}$$

[0101] 进一步推导可得

$$[0102] \quad \zeta^T \text{sig}^{\beta_2}(\zeta) \geq (6n)^{-\beta_2} \|\zeta\|_1^{1+\beta_2} \quad (11)$$

[0103] 再次使用赫尔德不等式可得

$$\begin{aligned} [0104] \quad |\zeta^T \dot{\eta}_{0L}| &= \left| \sum_{i=1}^{6n} \zeta_i \dot{\eta}_{0Li} \right| \\ &\leq \left( \sum_{i=1}^{6n} |\zeta_i| \right) \left( \sum_{i=1}^{6n} \dot{\eta}_{0Li}^{+\infty} \right)^{\frac{1}{+\infty}} = \|\zeta\|_1 \|\dot{\eta}_{0L}\|_{\infty} \end{aligned} \quad (12)$$

[0105] 由(9)、(11)和(12)可知

$$\begin{aligned} [0106] \quad \dot{V}_{ob} &\leq -k_1 (6n)^{-\beta_2} \|\zeta\|_1^{1+\beta_2} - (k_2 - \|\dot{\eta}_{0L}\|_{\infty}) \|\zeta\|_1 \\ &\leq -k_1 (6n)^{-\beta_2} \lambda_{\min}^{1+\beta_2}(\mathcal{L}_1 + \mathcal{C}) \|\tilde{\eta}_0\|_2^{1+\beta_2} - (k_2 - \|\dot{\eta}_{0L}\|_{\infty}) \lambda_{\min}(\mathcal{L}_1 + \mathcal{C}) \|\tilde{\eta}_0\|_2 \end{aligned} \quad (13)$$

[0107] 结合不等式(8),可以得到

$$\begin{aligned} [0108] \quad \dot{V}_{ob} &\leq -k_1 2^{(1+\beta_2)/2} (6n)^{-\beta_2} \underline{\lambda}^{1+\beta_2} (\mathcal{L}_1 + \mathcal{B}) \frac{V_{ob}^{(1+\beta_2)/2}}{\bar{\lambda}^{(1+\beta_2)/2} (\mathcal{L}_1 + \mathcal{B})} \\ &\quad - 2^{1/2} (k_2 - \|\dot{\eta}_{0L}\|_{\infty}) \underline{\lambda} (\mathcal{L}_1 + \mathcal{B}) \frac{V_{ob}^{1/2}}{\bar{\lambda}^{1/2} (\mathcal{L}_1 + \mathcal{B})} \end{aligned} \quad (14)$$

[0109] 因此,估计误差  $\tilde{\eta}_0^i$  将在有限时间  $T_1$  内收敛,其中  $T_1$  计算为

$$[0110] \quad T_1 = \min \left\{ \frac{2^{(1-\beta_2)/2} (6n)^{\beta_2} \bar{\lambda}^{(1+\beta_2)/2} (\mathcal{L} + \mathcal{C}) V_{ob}(0)^{(1-\beta_2)/2}}{(1-\beta_2) k_1 \underline{\lambda}^{1+\beta_2} (\mathcal{L} + \mathcal{C})}, \frac{2^{1/2} \bar{\lambda}^{1/2} (\mathcal{L} + \mathcal{C}) V_{ob}(0)^{1/2}}{(k_2 - \|\dot{\eta}_{0L}\|_{\infty}) \underline{\lambda} (\mathcal{L} + \mathcal{C})} \right\} \quad (15)$$

[0111] 证毕。

[0112] 步骤三:在控制器中,设计跟随者的编队构型保持控制率,并使用RBFNN逼近动力学集总不确定性,使用自适应方法估计外部扰动的边界,实现跟随者对领航者的精确跟踪。

[0113] 第  $i$  个AUH的参考跟踪轨迹表示为

$$[0114] \quad \hat{\eta}_{r,i} = \hat{\eta}_0^i + \eta_i^* \quad (16)$$

[0115] 式中,  $\hat{\eta}_0^i$  为分布式观测器获得的观测值,  $\eta_i^*$  为决定编队构型的相对位置向量。

[0116] 跟踪误差可以计算为

$$[0117] \quad z_{1,i} = \eta_i - \hat{\eta}_{r,i} = [z_{1,i1}, \dots, z_{1,i6}]^T \quad (17)$$

[0118] 根据式(1)和式(17),其导数计算为

[0119]  $\dot{z}_{1,i} = J(\eta_i)v_i - \dot{\hat{\eta}}_{r,i}$  (18)

[0120] 选取 $v_i$ 为虚拟控制变量,则虚拟控制率 $\alpha_i$ 设计为

[0121]  $\alpha_i = J^T(\eta_i)(-z_{1,i} + \dot{\hat{\eta}}_{r,i})$  (19)

[0122] 定义误差变量 $z_{2,i} = v_i - \alpha_i$ ,其导数计算为

[0123]  $\dot{z}_{2,i} = -M^{-1}[C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] + \tau_{M,i} + M^{-1}\tau_i - \dot{\alpha}_i$  (20)

[0124] 式中,  $\tau_{M,i} = M^{-1}\tau_{d,i}$ 代表扰动项,根据假设四,扰动项未知上界 $\tau_{d,i}^*$ ,即满足关系

[0125]  $|\tau_{M,i}| \leq \tau_{d,i}^*$  (21)

[0126] 式中,  $\tau_{d,i}^* = [\tau_{d,i1}^*, \dots, \tau_{d,i6}^*]^T$ 为未知常数向量。

[0127] 令 $F_i(\gamma_i) = M^{-1}[C(v_i)v_i + D(v_i)v_i + \Delta(\eta_i, v_i)] = [f_{i1}(\gamma_i), \dots, f_{i6}(\gamma_i)]^T$ 为动力学集总不确定项,使用RBFNN对其逼近。

[0128]  $f_{ij}(\Upsilon_i) = W_{ij}^{*T} S_j(\Upsilon_i) + \varepsilon_{ij}$  (22)

[0129] 式中,  $\Upsilon_i = [\eta_i^T, v_i^T]^T \in R^{12}$ 。

[0130] 跟随者的编队构型保持控制率 $\tau_i$ 设计为

[0131]  $\tau_i = M[-K_{2,i}z_{2,i} - J^T(\eta_i)z_{1,i} + \hat{W}_i^T S(\Upsilon_i) + \dot{\alpha}_i - \tau_{c,i}]$  (23)

[0132] 式中,  $\hat{W}_i^T$ 是 $W_i^{*T}$ 的估计值,  $W_i^{*T} = \text{blockdiag}[W_{i1}^{*T}, \dots, W_{i6}^{*T}] \in R^{6 \times 6q}$ ,

$S(\Upsilon_i) = [S_1^T(\Upsilon_i), \dots, S_6^T(\Upsilon_i)]^T \in R^{6q}$ 。 $\tau_{c,i} = [\tau_{c,i1}, \dots, \tau_{c,i6}]^T$ 为扰动补偿项,其中 $\tau_{c,ij}$ 设计为

[0133]  $\tau_{c,ij} = \hat{\tau}_{d,ij}^* \tanh\left(\frac{z_{2,ij} \hat{\tau}_{d,ij}^*}{s}\right)$  (24)

[0134] 式中,  $s > 0$ 为设计参数,  $\hat{\tau}_{d,ij}^*$ 为 $\tau_{d,ij}^*$ 的估计值,其更新率设计为

[0135]  $\dot{\hat{\tau}}_{d,ij}^* = \gamma_d |z_{2,ij}|$  (25)

[0136] 式中,  $\gamma_d > 0$ 为设计参数。

[0137] RBFNN权重系数的更新率设计为

[0138]  $\dot{\hat{W}}_{ij} = -\Lambda_{1,ij} S_j(\Upsilon_i) z_{2,ij} - k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$  (26)

[0139] 式中,  $\Lambda_{1,ij} > 0$ 为待设计增益矩阵,  $k_{W,ij}$ 为正常数,  $-\Lambda_{1,ij} S_j(\Upsilon_i) z_{2,ij}$ 为自适应项,

$k_{W,ij} \sum_{k=1}^N a_{ik} (\hat{W}_{ij} - \hat{W}_{kj})$ 为协同项。

[0140] 对于AUHs编队系统中的跟随者,其动力学模型为(1),控制率设计为(23),自适应更新率设计为(25)和(26),有以下结论成立:则跟随者能够与领航者保持理想的编队构型,系统中的状态变量均最终一致有界。

[0141] 上述步骤的证明过程如下:

[0142] 设计如下Lyapunov函数

$$[0143] \quad V_{1,i} = \frac{1}{2} z_{1,i}^T z_{1,i} + \frac{1}{2} z_{2,i}^T z_{2,i} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^6 \tilde{W}_{ij}^T \Lambda_{1,ij}^{-1} \tilde{W}_{ij} + \frac{1}{2} \gamma_d^{-1} \sum_{j=1}^6 \tilde{\tau}_{d,ij}^{*2} \quad (27)$$

[0144] 式中,  $\tilde{W}_{ij} = W_{ij}^* - \hat{W}_{ij}$ ,  $\tilde{\tau}_{d,ij}^* = \tau_{d,ij}^* - \hat{\tau}_{d,ij}^*$ , 结合式(18)、(20)、(23)、(25)和(26), 其导数可计算为

$$[0145] \quad \begin{aligned} \dot{V}_{1,i} = & -z_{1,i}^T K_{1,i} z_{1,i} - z_{2,i}^T K_{2,i} z_{2,i} - z_{2,i}^T \mathcal{E}_i - \sum_{j=1}^6 \Lambda_{1,j}^{-1} k_{W,j} \tilde{W}_j^T (\mathcal{L}_1 \otimes I) \tilde{W}_j \\ & + \sum_{j=1}^6 \left( z_{2,ij}^T \tau_{M,ij} - |z_{2,ij}^T| \tau_{d,ij}^* + |z_{2,ij}^T| \hat{\tau}_{d,ij}^* - z_{2,ij}^T \hat{\tau}_{d,ij}^* \tanh \left( \frac{z_{2,ij}^T \hat{\tau}_{d,ij}^*}{s} \right) \right) \end{aligned} \quad (28)$$

[0146] 式中,  $k_{W,j} = \text{diag}[k_{W,1j}, \dots, k_{W,Nj}] > 0$ ,  $\Lambda_{1,j}^{-1} = \text{diag}[\Lambda_{1,1j}^{-1}, \dots, \Lambda_{1,Nj}^{-1}] > 0$ ,  $\tilde{W}_j = [\tilde{W}_{1j}^T, \dots, \tilde{W}_{Nj}^T]^T$ 。

根据假设一,  $\mathcal{L}_1$  为半正定矩阵, 因此  $\sum_{j=1}^6 \Lambda_{1,j}^{-1} k_{W,j} \tilde{W}_j^T (\mathcal{L}_1 \otimes I) \tilde{W}_j > 0$ 。分析可知

$$z_{2,ij} \tau_{M,ij} \leq |z_{2,ij}| \tau_{d,ij}^* \text{、} |z_{2,ij}| \hat{\tau}_{d,ij}^* \leq |z_{2,ij}| \tau_{d,ij}^*, \text{ 结合双曲正切函数的性质 } 0 \leq |m| - m \tanh \left( \frac{m}{s} \right) \leq 0.2785s$$

可知

$$[0147] \quad z_{2,ij} \tau_{M,ij} - |z_{2,ij}| \tau_{d,ij}^* + |z_{2,ij}| \hat{\tau}_{d,ij}^* - z_{2,ij}^T \hat{\tau}_{d,ij}^* \tanh \left( \frac{z_{2,ij}^T \hat{\tau}_{d,ij}^*}{s} \right) \leq 0.2785s \quad (29)$$

[0148] 由杨氏不等式可知

$$[0149] \quad -z_{2,i}^T \mathcal{E}_i \leq \frac{\|z_{2,i}\|^2}{2} + \frac{\|\mathcal{E}_i\|^2}{2} \quad (30)$$

[0150] 结合式(28)、(29)和(30)可知

$$[0151] \quad \begin{aligned} \dot{V}_{1,i} \leq & - \left( z_{1,i}^T K_{1,i} z_{1,i} + z_{2,i}^T K_{2,i} z_{2,i} - \frac{\|z_{2,i}\|^2}{2} + \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\|\tilde{W}_{ij}\|^2}{2} + \frac{\|\tilde{\tau}_{d,ij}^*\|^2}{2} \right) \right) \\ & + \left( \frac{\|\mathcal{E}_i\|^2}{2} + \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\|\tilde{W}_{ij}\|^2}{2} + \frac{\|\tilde{\tau}_{d,ij}^*\|^2}{2} \right) + 1.671s \right) \\ & \leq -\varsigma_1 V_{1,i} + \kappa_1 \end{aligned} \quad (31)$$

$$[0152] \quad \text{式中, } \varsigma_1 = \min \{ 2\lambda_{\min}(K_{1,i}), 2\lambda_{\min}(K_{2,i}) - 1, \lambda_{\min}(\Lambda_{1,ij}), \gamma_d \}, \kappa_1 = \left( \frac{\|\mathcal{E}_i\|^2}{2} + \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\|\tilde{W}_{ij}\|^2}{2} + \frac{\|\tilde{\tau}_{d,ij}^*\|^2}{2} \right) + 1.671s \right)。$$

[0153] 根据式(31), 可以推导出

$$[0154] \quad V_{1,i} \leq V_{1,i}(0) e^{-\varsigma_1 t} + Q_1 \quad (32)$$

[0155] 因此以下关系成立

$$[0156] \quad \|z_{1,i}\| \leq \sqrt{2Q_1}, \quad \|z_{2,i}\| \leq \sqrt{2Q_1}, \quad \|\tilde{W}_{ij}\| \leq \sqrt{\frac{2Q_1}{\lambda_{\min}(\Lambda_{1,ij}^{-1})}}, \quad |\tilde{\tau}_{d,ij}^*| \leq \sqrt{2Q_1\gamma_d} \quad (33)$$

[0157] 式中,  $Q_1 = \frac{\kappa_1}{\varsigma_1}$  表示紧集, 其大小可由  $K_{1,i}$ 、 $K_{2,i}$ 、 $\Lambda_{1,ij}$  和  $\gamma_d$  调节。

[0158] 由此可知, 通过恰当地选择上述参数,  $z_{1,i}$ 、 $z_{2,i}$  和  $\tilde{W}_{ij}$  均为最终一致有界。根据式 (19) 和假设二,  $\alpha_i$  和  $\dot{\alpha}_i$  是有界的。进一步地, 由于动力学不确定性是有界的因此  $\dot{z}_{1,i}$  和  $\dot{z}_{2,i}$  是有界的。

[0159] 证毕。

[0160] 本发明实施例对由4个AUH和一个虚拟领航者组成的AUHs编队系统进行仿真实验, 以验证所提出的编队控制率的有效性。

[0161] 编队构型向量为  $\eta_1^* = [-1, 2, 0, 0, 0, 0]^T$ 、 $\eta_2^* = [-1, -2, 0, 0, 0, 0]^T$ 、

$\eta_3^* = [-5, 2, 0, 0, 0, 0]^T$ 、 $\eta_4^* = [-5, -2, 0, 0, 0, 0]^T$ , 未建模动力学为  $\Delta(\eta_i, v_i) = [\Delta_1, \dots, \Delta_6]^T$ ,

其中,  $\Delta_1 = \cos(u_i^2) + 1$ 、 $\Delta_2 = 0.05v_i^2 + 1$ 、 $\Delta_3 = \cos(0.1w_i^2) + 1$ 、 $\Delta_4 = 1 - \cos(p_i^2)$ 、

$\Delta_5 = 1 - \sin(q_i^2)$ 、 $\Delta_6 = 0.2 \sin(r_i^2)$ , AUH编队的通信拓扑结构描述如图2所示, 虚拟领航者移动路径和AUH初始状态见表1。

[0162] 表1跟踪路径及AUH初始状态

Items	Values
$\eta_0$	$[20 \sin(2\pi t/45) + 15 \cos(2\pi t/45),$ $15 \sin(2\pi t/45) - 20 \cos(2\pi t/45),$ $20 \sin(2\pi t/45) + 15 \cos(2\pi t/45),$ $0, 0, 2\pi t/45]^T$
[0163] $\eta_i(0)$	$\eta_1(0) = [17.5, -20, 16, 1, 1.5, -1]^T$ $\eta_2(0) = [15, -17.5, 17, 1, 1.3, -1]^T$ $\eta_3(0) = [15, -21, 16, 1, -0.5, -1]^T$ $\eta_4(0) = [16, -20, 13, 0.5, -0.5, -1]^T$
$v_i(0)$	$v_i(0) = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ $i = 0, \dots, 4$

[0164] 控制率的参数值设计如表2所示。

[0165] 表2观测器和控制率的参数值

参数	数值
基于一致性原理的 有限时间分布式观测器	$k_1 = 60, k_2 = 12, \beta_2 = 0.7$
[0166]	$K_{1,i} = \text{diag}[0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7],$ $K_{2,i} = \text{diag}[8, 8, 8, 8, 8, 8],$
跟随者的编队 构型保持控制率	$\Lambda_{1,ij} = \text{diag}[6, 6, 6, 6, 6, 6],$ $\mu_{w,ij} = 0.001, k_{w,ij} = 0.1,$ $\mu_{d,ij} = 0.001, s = 0.01, \gamma_d = 0.5$

[0167] 使用具有21个节点的径向基函数神经网络逼近动力学不确定项,节点被均布在区间 $[-1, 1]$ ,基宽设计为2。

[0168] 仿真结果如图3-7所示,图3展示了基于一致性原理的有限时间分布式观测器对领航者状态信息的观测,验证了分布式观测器的有效性。图4展示了在控制算法的作用下编队内AUH的跟踪误差为最终一致有界,图5展示了神经网络对动力学不确定项的逼近误差,验证了径向基函数神经网络协同逼近的有效性。图6展示了控制算法作用下的控制输入,验证了算法的可行性。图7展示了AUH编队能够有效的跟踪参考路径,验证了控制算法的有效性。

[0169] 以上所述的实施例对本发明的技术方案和有益效果进行了详细说明,应理解的是以上所述仅为本发明的具体实施例,并不用于限制本发明,凡在本发明的原则范围内所做的任何修改、补充和等同替换,均应包含在本发明的保护范围之内。

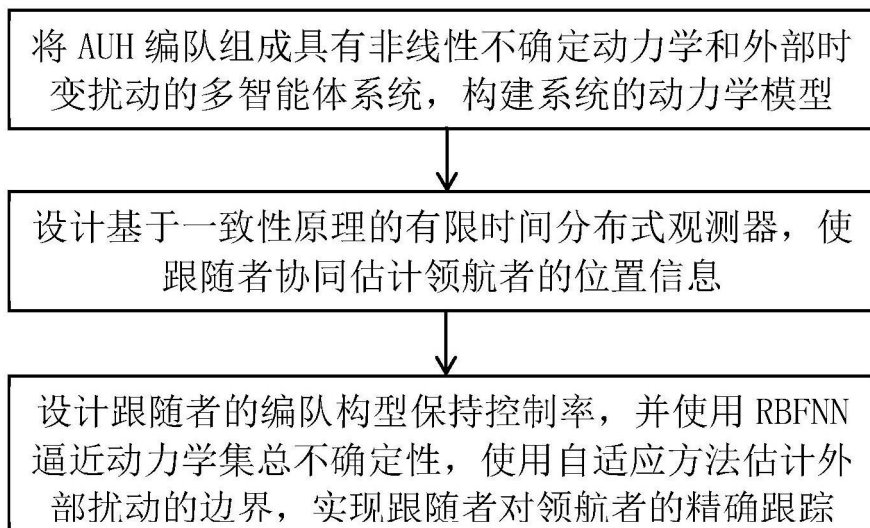


图1

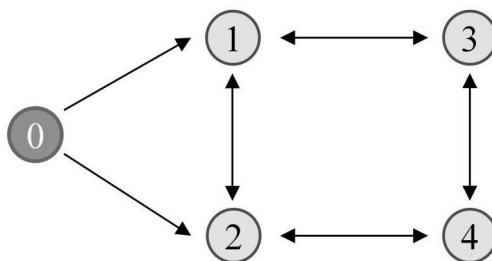


图2

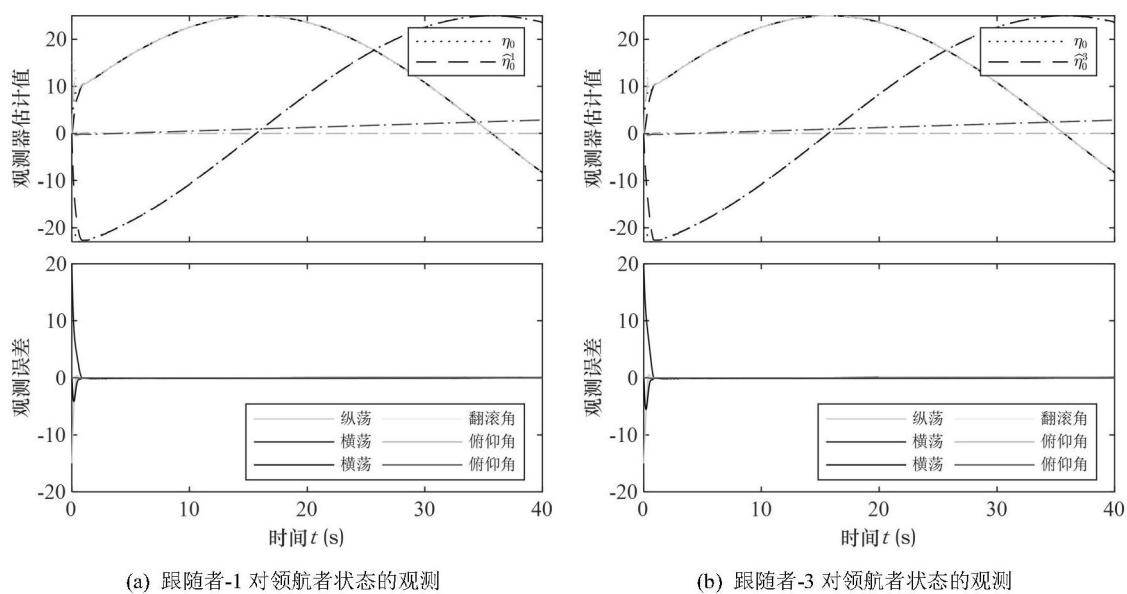


图3



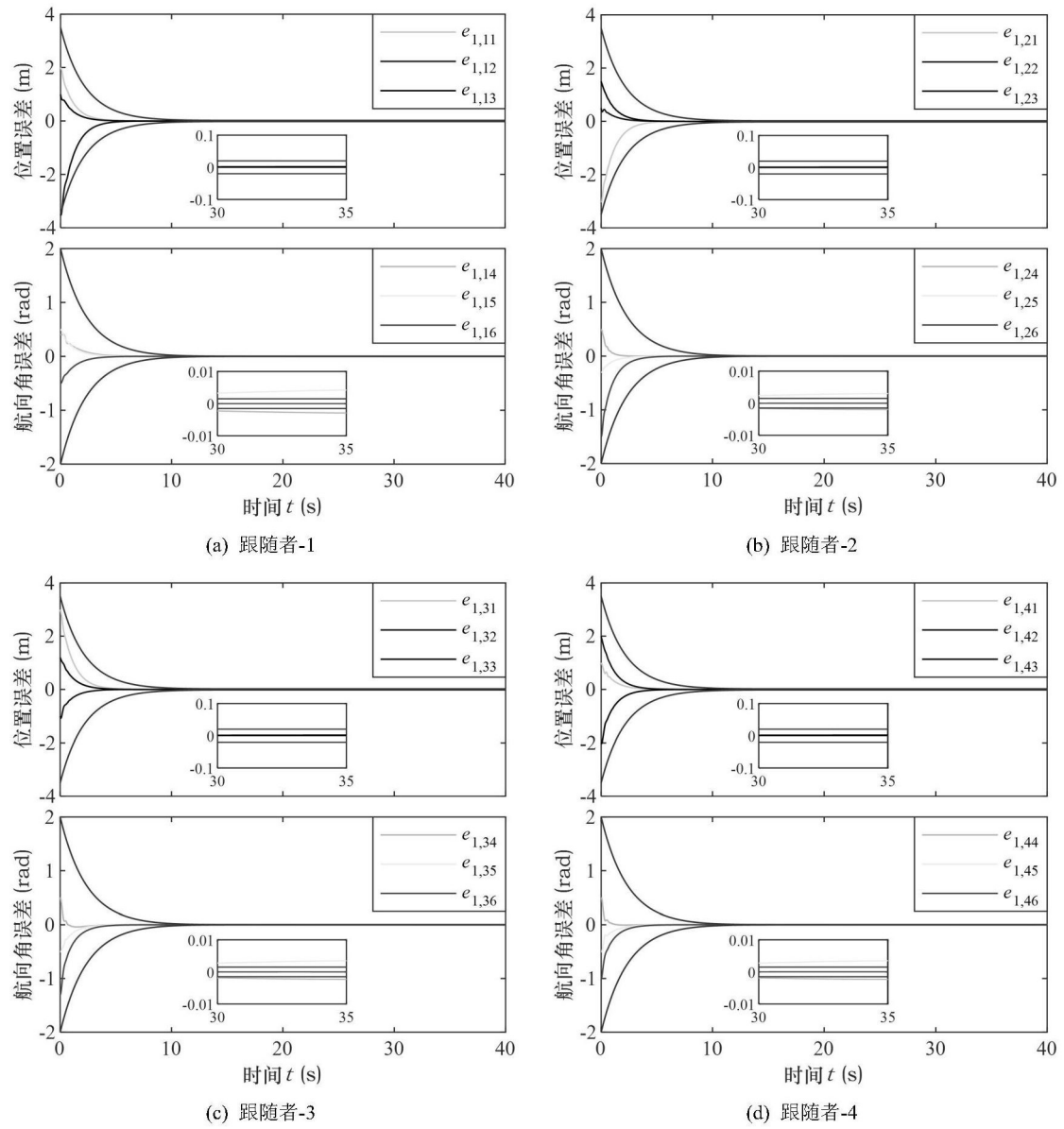


图4

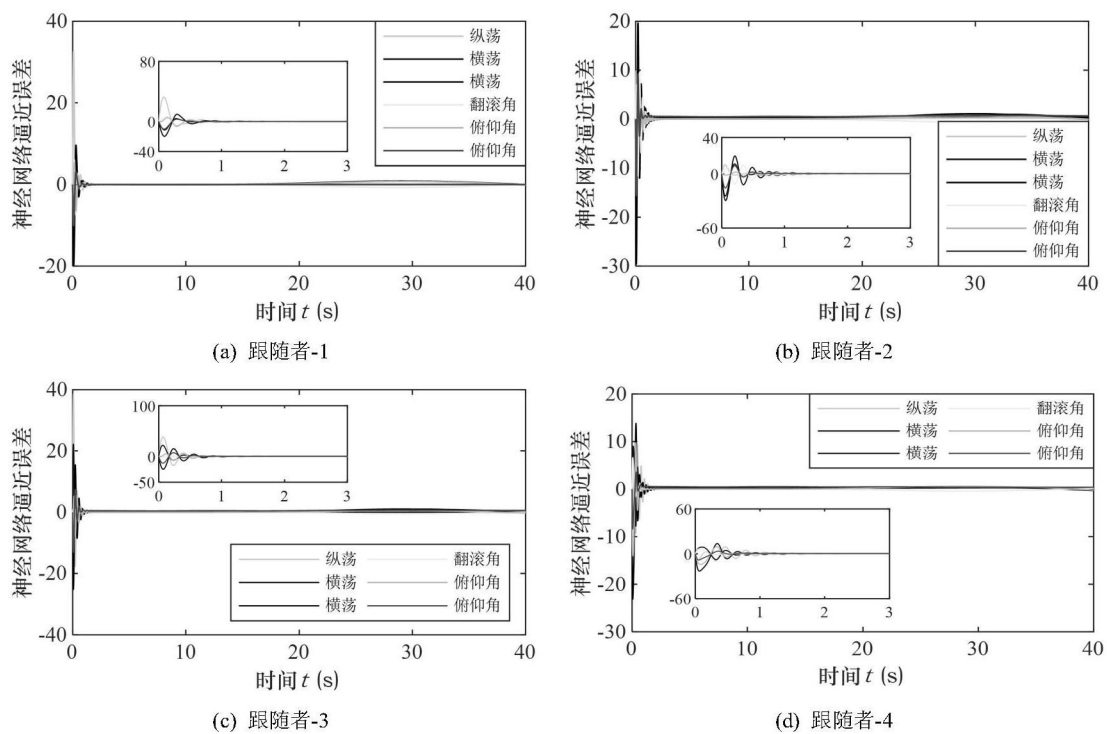


图5

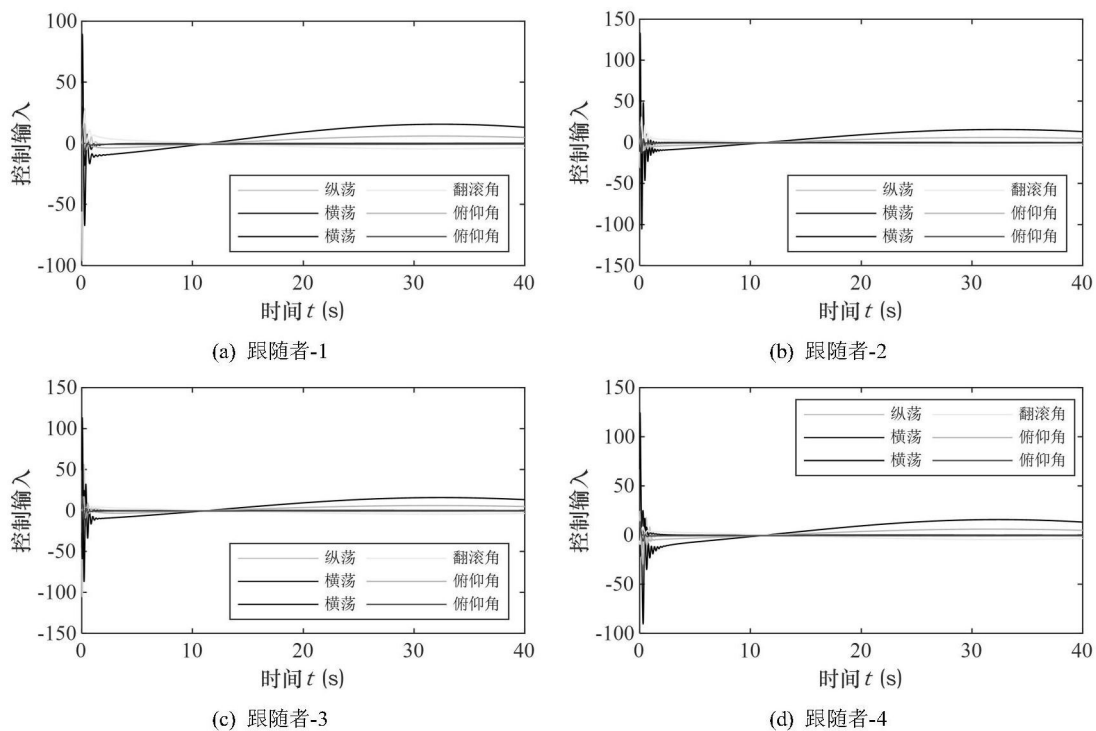


图6

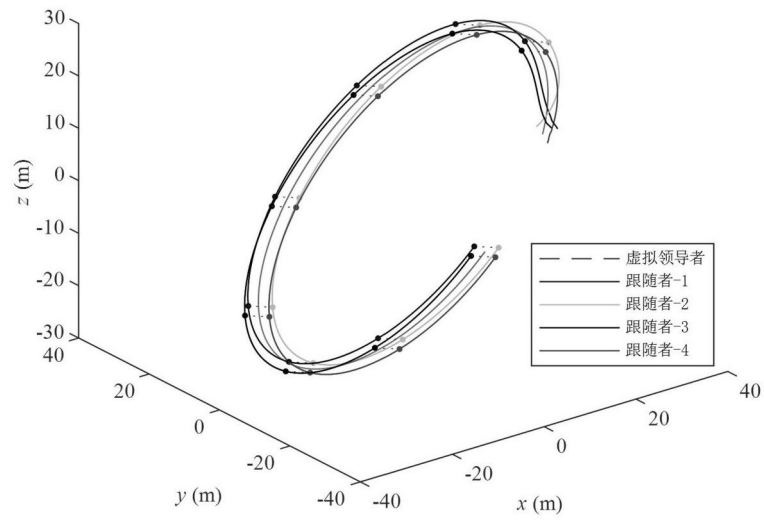


图7