



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117369267 A

(43) 申请公布日 2024. 01. 09

(21) 申请号 202311439552.8

(22) 申请日 2023.10.31

(71) 申请人 东海实验室

地址 316000 浙江省舟山市定海区浙大路1号

(72) 发明人 宋子龙 黄豪彩 吴哲远 王卿  
路小璐(74) 专利代理机构 浙江侨悦专利代理有限公司  
33470

专利代理师 胡国平

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

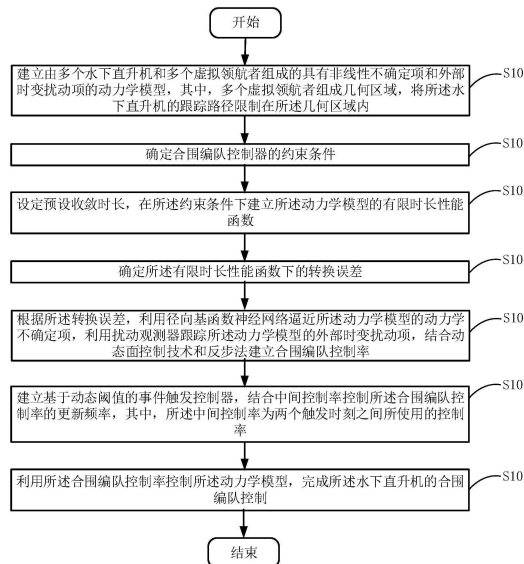
权利要求书4页 说明书10页 附图2页

## (54) 发明名称

一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法和系统

## (57) 摘要

本发明公开了一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法和系统,属于机械控制技术领域,方法包括:建立具有非线性不确定项和外部时变扰动项的动力学模型;确定合围编队控制器的约束条件;建立动力学模型的有限时长性能函数;确定有限时长性能函数下的转换误差;根据转换误差,利用径向基函数神经网络逼近动力学模型的动力学不确定项,利用扰动观测器跟踪动力学模型的外部时变扰动项,结合动态面控制技术和反步法建立合围编队控制率;建立基于动态阈值的事件触发控制器,结合中间控制率控制所述合围编队控制率的更新频率;利用合围编队控制率控制动力学模型,完成水下直升机的合围编队控制。保证跟踪误差有限时间内收敛,减少控制器的更新频率。



1. 一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,包括:

S101:建立由多个水下直升机和多个虚拟领航者组成的具有非线性不确定项和外部时变扰动项的动力学模型,其中,多个虚拟领航者组成几何区域,将所述水下直升机的跟踪路径限制在所述几何区域内;

S102:确定合围编队控制器的约束条件;

S103:设定预设收敛时长,在所述约束条件下建立所述动力学模型的有限时长性能函数;

S104:确定所述有限时长性能函数下的转换误差;

S105:根据所述转换误差,利用径向基函数神经网络逼近所述动力学模型的动力学不确定项,利用扰动观测器跟踪所述动力学模型的外部时变扰动项,结合动态面控制技术和反步法建立合围编队控制率;

S106:建立基于动态阈值的事件触发控制器,结合中间控制率控制所述合围编队控制率的更新频率,其中,所述中间控制率为两个触发时刻之间所使用的控制率;

S107:利用所述合围编队控制率控制所述动力学模型,完成所述水下直升机的合围编队控制。

2. 根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,所述动力学模型为:

$$\dot{\eta}_i = R(\psi_i)v_i$$

$$M\dot{v}_i = -C(v_i)v_i - D(v_i)v_i + \tau_{di} + \tau_i,$$

其中,  $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$  表示第*i*个水下直升机在世界坐标系下的位移和航向偏角,  $i = 1, \dots, m$ ,  $v_i = [u_i, v_i, r]^T$  表示第*i*个水下直升机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,  $R(\psi_i)$  表示世界坐标系和体坐标系之间的坐标转换矩阵,所述非线性不确定项包括  $C(v_i)$  和  $D(v_i)$ , 其中,  $C(v_i)$  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,  $\tau_{di}$  表示所述外部时变扰动项,  $\tau_i \in \mathbb{R}^3$  表示控制输入。

3. 根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,所述约束条件包括对于所有水下直升机均存在一个以虚拟领航者为根节点的有向生成树、所述虚拟领航者的轨迹及轨迹导数有界、所述外部时变扰动有界。

4. 根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,所述有限时长性能函数具体为:

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \left( p_{ij}(0) - \frac{t}{T_p} \right) \exp \left( 1 - \frac{T_p}{T_p - t} \right) + p_{ij}(\infty), & 0 \leq t < T_p, \\ p_{ij}(\infty), & t \geq T_p, \end{cases}$$

其中,  $t$  表示时间,  $T_p$  表示所述预设收敛时长,  $p_{ij}(0)$  和  $p_{ij}(\infty)$  分别表示用于限制合围编队系统动态过程和稳态过程的设计参数。

5. 根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,所述S104具体包括:

S1041:定义合围控制误差,所述合围控制误差  $e_i$  和所述合围控制误差对时间的一阶导

数 $\dot{e}_i$ 具体为:

$$e_i = R_i^T \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} (\eta_i - \eta_j) + \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} (\eta_i - \eta_k) \right)$$

$$\dot{e}_i = -r_i \mathcal{M} e_i + \xi_i \nu_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j \nu_j - \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k$$

其中, $R_i^T$ 表示第*i*个水下直升机的坐标转换矩阵的转置, $r_i$ 表示水下直升机在体坐标系下的角速度, $R_j$ 表示第*j*个水下直升机的坐标转换矩阵, $a_{ij}=1$ 表示第*i*个水下直升机能够获得第*j*个水下直升机的状态信息,否则, $a_{ij}=0$ ,同样, $a_{ik}=1$ 表示第*i*个水下直升机能够获得第*k*个虚拟领航者的状态信息,否则, $a_{ik}=0$ ,其中, $m+1 \leq k \leq m+n$ 表示所述虚拟领航者的数

量, $\mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ , $\xi_i = \sum_{j=1}^{m+n} a_{ij}$ ,其中, $\mathcal{M}$ 和 $\xi_i$ 均表示中间变量;

S1042:结合所述有限时长性能函数和误差转换函数定义误差变换:

$$e_i = [e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}]^T, e_{ij} = p_{ij}(t) C_{ij}(z_{1,ij}), j=1,2,3$$

$$C_{ij}(z_{1,ij}) = \frac{\exp(z_{1,ij}) - \exp(-z_{1,ij})}{\exp(z_{1,ij}) + \exp(-z_{1,ij})}$$

其中, $C_{ij}(z_{1,ij})$ 表示所述误差转换函数, $z_{1,i} = [z_{1,i1}, z_{1,i2}, z_{1,i3}]^T$ 表示所述转换误差, $j$ 表示误差维度;

S1043:计算所述转换误差和所述转换误差对时间的一阶导数:

$$z_{1,ij} = \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{e_{ij}}{p_{ij}(t)} \right) - \frac{1}{2} \ln \left( 1 - \frac{e_{ij}}{p_{ij}(t)} \right)$$

$$\dot{z}_{1,ij} = b_{ij} \dot{e}_{ij} - d_{ij} e_{ij}.$$

$$\text{其中, } b_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{p_{ij}(t) + e_{ij}} + \frac{1}{p_{ij}(t) - e_{ij}} \right), \quad d_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{p}_{ij}(t)}{p_{ij}(t)(p_{ij}(t) + e_{ij})} + \frac{\dot{p}_{ij}(t)}{p_{ij}(t)(p_{ij}(t) - e_{ij})} \right);$$

所述转换误差对时间的一阶导数具体为:

$$\dot{z}_{1,i} = \Gamma_i \left( -r_i \mathcal{M} e_i + \xi_i \nu_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j \nu_j - \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k \right) - \Xi_i e_i$$

其中, $\Gamma_i = \text{diag}[b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}]$ , $\Xi_i = \text{diag}[d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}]$ 。

6.根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,其特征在于,所述S105具体包括:

S1051:根据所述转换误差,利用反步法确定所述合围编队的虚拟控制率 $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \xi_i^{-1} \left( r_i \mathcal{M} e_i + \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j \nu_j + \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k - \Gamma_i^{-1} K_{li} z_{1,i} + \Gamma_i^{-1} \Xi_i e_i \right).$$

其中, $K_{li}$ 表示增益对角矩阵, $\dot{\eta}_k$ 表示第*k*个虚拟领航者的轨迹相对于时间的导数;

S1052:使用动态面控制技术计算所述虚拟控制率相对于时间的导数,以降低计算消

耗:

$$\alpha_i = T_i \dot{\chi}_i + \chi_i,$$

其中,  $T_i$  表示时间常数,  $\chi_i$  表示动态面控制辅助变量;

S1053: 定义动态面控制误差  $\varsigma_i$ , 定义动态面转换误差  $z_{2,i}$ , 并计算所述动态面转换误差相对于时间的一阶导数  $\dot{z}_{2,i}$ :

$$\varsigma_i = \chi_i - \alpha_i$$

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

$$\dot{z}_{2,i} = \dot{v}_i - \dot{\chi}_i$$

$$= H_i + \tau_{Di} + M_i^{-1} \tau_i + \varsigma_i / T_i$$

$$\text{其中, } \tau_{Di} = M_i^{-1} \tau_{di};$$

S1054: 建立所述动力学不确定项, 利用所述径向基函数神经网络逼近所述动力学不确定项:

$$H_i(\theta_i) = M_i^{-1} (-C(v_i) v_i - D(v_i) v_i) = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$$

$$h_{ij}(\mathcal{G}_i) = W_{ij}^{*T} \Theta_j(\mathcal{G}) + \varepsilon_{ij}$$

$$\mathcal{G}_i = [\eta_i^T, v_i^T]^T$$

其中,  $W^* = [W_1^*, \dots, W_q^*]^T \in \mathbb{R}^q$  表示最优权重系数向量,  $\varepsilon$  表示固有逼近误差, 满足

$|\varepsilon| \leq \bar{\varepsilon}$ , 其中,  $\bar{\varepsilon}$  表示未知小常数,  $\Theta(\mathcal{G}) = [s_1(\mathcal{G}), \dots, s_q(\mathcal{G})]^T \in \mathbb{R}^q$  表示基函数向量, 其中,  $q$  表

示神经网络的节点个数,  $s_i(\mathcal{G}) = \exp\left(-\frac{(\mathcal{G} - \mu_i)^T (\mathcal{G} - \mu_i)}{\sigma^2}\right)$  表示高斯激活函数, 其中,  $\mu_i$  和  $\sigma$  分

别表示第  $i$  个节点的中心和基宽。

S1055: 结合所述动态面转换误差, 建立所述合围编队控制率  $\tau_i$ :

$$\tau_i = M \left( -K_{2i} z_{2,i} - \Gamma \xi_i z_{1,i} - \hat{W}_i^T \Theta(\mathcal{G}_i) - \hat{\tau}_{Di} \tanh\left(\frac{\hat{\tau}_{Di} z_{2,i}}{s_1}\right) - \frac{\varsigma_i}{T_i} \right)$$

其中,  $K_{2i} > 0$  表示增益对角矩阵,  $s_1 > 0$  表示设计参数,  $\hat{W}_i^T$  表示  $W_i^{*T} = \text{blockdiag}[W_{i1}^{*T}, W_{i2}^{*T}, W_{i3}^{*T}]$  的自适应估计值,  $\Theta(\mathcal{G}_i) = [\Theta_1^T(\mathcal{G}_i), \Theta_2^T(\mathcal{G}_i), \Theta_3^T(\mathcal{G}_i)]^T$ ,  $\hat{\tau}_{Di} = \text{diag}[\hat{\tau}_{d,i1}, \hat{\tau}_{d,i2}, \hat{\tau}_{d,i3}]$ ,  $\tanh$  表示双曲正切函数, 其中,  $\hat{\tau}_{d,ij}$  表示  $\bar{\tau}_{d,ij}$  的自适应估计值。

7. 根据权利要求6所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法, 其特征在于, 所述S105还包括:

S1056: 定义所述自适应估计值的自适应更新率:

$\hat{W}_i^T$  的自适应更新率为:

$$\dot{\hat{W}}_{ij} = \Pi_{ij} \left( -\Theta_j z_{2,ij} + \delta_{W,ij} \hat{W}_{ij} \right)$$

其中,  $\Pi_{ij}$  为正定增益矩阵,  $\delta_{W,ij} > 0$  为设计参数。

$\hat{\tau}_{d,ij}$  的自适应更新率为:

$$\dot{\hat{\tau}}_{d,ij} = \sigma_{ij} \left( \delta_{d,ij} \bar{\tau}_{d,ij} + |z_{2,ij}| \right),$$

其中,  $\sigma_{ij} > 0, \delta_{d,ij} > 0$  为设计参数。

8. 根据权利要求1所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法, 其特征在于, 所述S106具体包括:

S1061: 定义所述合围编队控制率的更新函数:

$$\bar{\tau}_i(t) = \lambda_i(t_k), \quad t_k \leq t < t_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots$$

$$\lambda_i(t) = -(1 + \delta) \left[ \tau_i \tanh \left( \frac{z_{2i}^T \tau_i}{s_2} \right) + \sigma_2 \tanh \left( \frac{z_{2i}^T \sigma_2}{s_2} \right) \right], \quad s_2 > 0, \quad \sigma_2 > \sigma_1 / (1 - \delta)$$

其中,  $t_k$  表示第k次更新触发时刻,  $s_2$  表示控制器设计参数,  $\lambda_i(t)$  表示中间控制率;

S1062: 定义所述更新函数的辅助测量误差  $\xi_i(t)$  :

$$\xi_i(t) = \lambda_i(t) - \bar{\tau}_i(t);$$

S1063: 结合所述辅助测量误差定义所述更新函数的更新触发时刻:

$$t_{k+1} = \inf \left\{ t > t_k \mid |\xi_i(t)| \geq \delta |\bar{\tau}_i(t)| + \sigma_1 \right\}, \quad 0 < \delta < 1, \quad \sigma_1 > 0$$

其中, 符号“inf”表示下确界。

9. 一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制系统, 其特征在于, 包括处理器和用于存储处理器可执行指令的存储器; 所述处理器被配置为调用所述存储器存储的指令, 以执行权利要求1至8中任意一项所述的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法。

## 一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法和系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于机械控制技术领域,具体涉及一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法和系统。

### 背景技术

[0002] 自主水下航行器(Autonomous underwater vehicle,AUV)的协同编队在军事防御、资源勘探和环境监测等各种应用中具有独特优势,因此近年来一直是一个研究热点。一种称为水下直升机(Autonomous underwater helicopter,AUH)的新型水下航行器在抵近观测、定点悬停等方面具有突出优势,与水下停机坪的配合使用能进一步地增加其续航能力和探测范围,更加适合上述特种水下作业任务,同时,在某些情况下,我们希望水下航行器进入由几个领航者组成的几何区域内,并保持这种编队模式跟踪给定路径,这被称为合围控制任务。水下直升机合围控制的复杂性来自多个方面,包括水下直升机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等。

[0003] 目前,针对水下直升机的控制局限于设计控制器保证控制系统的稳定,并未对水下直升机合围控制时追踪误差的收敛过程进行控制,不能在有限时间内完成水下直升机合围控制,控制性能不足,另外,由于控制输入的连续变化,导致水下直升机推进器推力时刻发生变化,这加速了水下直升机推进器的机械磨损。

### 发明内容

[0004] 为了解决现有技术存在的针对水下直升机的控制局限于设计控制器保证控制系统的稳定,并未对水下直升机合围控制时追踪误差的收敛过程进行控制,不能在有限时间内完成水下直升机合围控制,控制性能不足,另外,由于控制输入的连续变化,导致水下直升机推进器推力时刻发生变化,这加速了水下直升机推进器的机械磨损技术问题,本发明提供一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法和系统。

[0005] 第一方面

[0006] 本发明提供了一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,包括:

[0007] S101:建立由多个水下直升机和多个虚拟领航者组成的具有非线性不确定项和外部时变扰动项的动力学模型,其中,多个虚拟领航者组成几何区域,将水下直升机的跟踪路径限制在几何区域内;

[0008] S102:确定合围编队控制器的约束条件;

[0009] S103:设定预设收敛时长,在约束条件下建立动力学模型的有限时长性能函数;

[0010] S104:确定有限时长性能函数下的转换误差;

[0011] S105:根据转换误差,利用径向基函数神经网络逼近动力学模型的动力学不确定项,利用扰动观测器跟踪动力学模型的外部时变扰动项,结合动态面控制技术和反步法建立合围编队控制率;

[0012] S106:建立基于动态阈值的事件触发控制器,结合中间控制率控制合围编队控制

率的更新频率,其中,中间控制率为两个触发时刻之间所使用的控制率;

[0013] S107:利用合围编队控制率控制动力学模型,完成水下直升机的合围编队控制。

[0014] 第二方面

[0015] 本发明提供了一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制系统,包括处理器和用于存储处理器可执行指令的存储器;处理器被配置为调用存储器存储的指令,以执行第一方面中的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法。

[0016] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益技术效果:

[0017] (1)在本发明中,建立了包括水下直升机和虚拟领航者的动力学模型,确定了保证控制器控制性能的约束条件,在这个基础上重新建立了有限时长性能函数,进而重新定义合围控制的转换误差,利用反步法设计水下直升机的自适应合围编队控制率,通过径向基函数神经网络和扰动补偿器分别处理动力学模型的动力学不确定性和水下环境的外部时变扰动,使得设计出的合围编队控制器在满足符合控制器控制性能的同时,能够按预定目标在预设收敛时长内完成收敛过程,保证跟踪误差在有限时间内收敛,使得水下直升机合围编队高效率的完成合围任务,提升控制器控制性能。使得水下直升机合围编队能够按预期完成合围任务,增加控制可调整性和及时性。

[0018] (2)通过引入基于动态阈值的事件触发控制机制,这种时间触发机制在保证控制性能的前提下,使得控制器只有在接收到超出动态阈值范围的输入信号时才执行机械调整,减少控制器的更新频率,降低水下直升机机械磨损,提升水下直升机寿命,同时,动态阈值条件的引入,能够更好的平衡降低控制频率和保证控制性能的关系。

## 附图说明

[0019] 下面将以明确易懂的方式,结合附图说明优选实施方式,对本发明的上述特性、技术特征、优点及其实现方式予以进一步说明。

[0020] 图1是本发明提供的一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法的流程示意图;

[0021] 图2是本发明提供的一种水下直升机编队的通信拓扑结构示意图;

[0022] 图3是本发明提供的一种水下直升机合围控制移动路径效果图。

## 具体实施方式

[0023] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对照附图说明本发明的具体实施方式。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图,并获得其他的实施方式。

[0024] 为使图面简洁,各图中只示意性地表示出了与发明相关的部分,它们并不代表其作为产品的实际结构。另外,以使图面简洁便于理解,在有些图中具有相同结构或功能的部件,仅示意性地绘示了其中的一个,或仅标出了其中的一个。在本文中,“一个”不仅表示“仅此一个”,也可以表示“多于一个”的情形。

[0025] 还应当进一步理解,在本发明说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关联列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合。

[0026] 在本文中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0027] 另外,在本发明的描述中,术语“第一”、“第二”等仅用于区分描述,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0028] 实施例1

[0029] 在一个实施例中,参考说明书附图1,示出了本发明提供的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法的流程示意图。

[0030] 本发明提供的一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法,包括:

[0031] S101:建立由多个水下直升机和多个虚拟领航者组成的具有非线性不确定项和外部时变扰动项的动力学模型。

[0032] 其中,多个虚拟领航者组成几何区域,将水下直升机的跟踪路径限制在几何区域内。

[0033] 其中,动力学模型是一个数学模型,该模型描述了多个水下直升机和虚拟领航者的动力学特性,这个模型考虑了诸如水下直升机的位置、速度、方向、质量、非线性不确定性(如科氏力和向心力矩阵)以及外部时变扰动等因素,动力学模型是控制系统设计的基础,它允许研究人员理解和描述系统如何响应不同的输入、如何受到外部扰动的影响以及如何实现特定的控制目标。

[0034] 在一种可能的实施方式中,动力学模型为:

$$[0035] \quad \dot{\eta}_i = R(\psi_i)v_i$$

$$[0036] \quad M\dot{v}_i = -C(v_i)v_i - D(v_i)v_i + \tau_{di} + \tau_i,$$

[0037] 其中,  $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T$  表示第*i*个水下直升机在世界坐标系下的位移和航向偏角,  $i = 1, \dots, m$ ,  $v_i = [u_i, v_i, r]^T$  表示第*i*个水下直升机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,  $R(\psi_i)$  表示世界坐标系和体坐标系之间的坐标转换矩阵, 非线性不确定项包括  $C(v_i)$  和  $D(v_i)$ , 其中,  $C(v_i)$  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,  $\tau_{di}$  表示外部时变扰动项,  $\tau_i \in \mathbb{R}^3$  表示控制输入。

[0038] S102:确定合围编队控制器的约束条件。

[0039] 在一种可能的实施方式中,约束条件包括对于所有水下直升机均存在一个以虚拟领航者为根节点的有向生成树、虚拟领航者的轨迹及轨迹导数有界、外部时变扰动有界。

[0040] 需要说明的是,存在一个有向生成树以虚拟领航者为根节点,这个约束条件要求在合围编队中,所有水下直升机都应该能够通过有向路径与一个虚拟领航者相连,且这个虚拟领航者被视为根节点,这意味着所有水下直升机都有一个明确的路径到达虚拟领航者。这是一种合围编队控制的组织结构,其中虚拟领航者充当中央协调点,水下直升机通过与虚拟领航者的连接来实现编队。

[0041] 虚拟领航者的轨迹及轨迹导数有界这个约束条件要求虚拟领航者的轨迹和轨迹导数是有界的,这表示虚拟领航者的运动是受到限制的,不会有过大的加速度或速度变化,



通过确保虚拟领航者的轨迹有界,可以提高编队的稳定性,因为其他水下直升机需要跟随虚拟领航者的轨迹。

[0042] 外部时变扰动有界这个约束条件指出外部时变扰动的幅度是有界的,外部扰动可能来自水下环境,如水流或其他环境因素,它们对水下直升机的运动产生影响。通过将外部时变扰动限制在一个有界范围内,可以帮助合围编队控制系统更好地应对不确定性和外部环境的变化。约束条件的制定有助于确保合围编队控制系统在不同情况下能够保持稳定,有效地协调多个水下直升机的运动,并遵循特定的编队结构和轨迹,这种限制在控制系统设计中非常重要,因为它可以提高控制系统的鲁棒性,使其能够在不同的环境条件下正常运行。

[0043] 其中,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。举例来说,假设有一个有向生成树,根节点是A,它具有以下性质:从A出发,可以通过有向边到达图中的每一个其他节点,无论这些节点是什么。无论是从A开始,还是从A以外的其他节点开始,都可以通过有向边连接到图中的每一个节点,这意味着根节点A是这个有向生成树的起点,从A出发可以到达所有其他节点,而且从任何其他节点也都可以通过有向边连接到所有其他节点,形成了一个连通的有向生成树结构。这种性质确保了在有向生成树中,每个节点都是彼此可达的,无论从哪个节点出发,都可以到达其他节点,从而构成了一个连通的有向树结构。

[0044] 需要说明的是,水下直升机编队之间的通信拓扑结构用图论来描述, $m$ 个跟随者-AUH用 $1, \dots, m$ 表示, $n$ 个虚拟领航者标记为 $m+1, \dots, m+n$ 。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 $\mathcal{N}_i = \{b_k \in \mathcal{V}, (b_k, b_i) \in \mathcal{E}\}$ 。 $\mathcal{A}=[a_{ik}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 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)  $\mathcal{L}=[l_{ik}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$  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。

[0045] S103: 设定预设收敛时长, 在约束条件下建立动力学模型的有限时长性能函数。

[0046] 在一种可能的实施方式中, 有限时长性能函数具体为:

$$[0047] \quad p_{ij}(t) = \begin{cases} \left( p_{ij}(0) - \frac{t}{T_p} \right) \exp \left( 1 - \frac{T_p}{T_p - t} \right) + p_{ij}(\infty), & 0 \leq t < T_p, \\ p_{ij}(\infty), & t \geq T_p, \end{cases}$$

[0048] 其中,  $t$  表示时间,  $T_p$  表示预设收敛时长,  $p_{ij}(0)$  和  $p_{ij}(\infty)$  分别表示用于限制合围编队系统动态过程和稳态过程的设计参数。

[0049] 可以理解的是, 在合围编队控制中设定预设的收敛时长参与到建立动力学模型的有限时长性能函数的过程中, 以确保编队在一定时间内实现所需的稳定性和性能。通过建立有限时长性能函数, 合围编队控制系统的设计和分析可以更好地针对预设的时间范围来进行, 从而确保在合围编队任务中达到所需的性能和稳定性。

[0050] 需要说明的是, 本领域技术人员可以根据实际需要设置预设收敛时长的大小, 本发明在此不做限定。

[0051] S104: 确定有限时长性能函数下的转换误差。

[0052] 其中, 转换误差是一个通常在控制系统中的概念, 用于描述将一种性能度量或目标函数从一种形式转化为另一种形式时可能产生的误差。确定有限时长性能函数下的转换误差有助于在控制系统设计、性能分析和优化问题中维持一致性和准确性, 帮助更好地理解性能度量的不同形式之间的关系, 并采取适当的措施以最小化引入的误差, 从而更好地实现设计和分析的目标。

[0053] 在一种可能的实施方式中, S104具体包括:

[0054] S1041: 定义合围控制误差, 合围控制误差  $e_i$  和合围控制误差对时间的一阶导数  $\dot{e}_i$  具体为:

$$[0055] \quad e_i = R_i^T \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} (\eta_i - \eta_j) + \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} (\eta_i - \eta_k) \right)$$

$$[0056] \quad \dot{e}_i = -r_i \mathcal{M} e_i + \xi_i v_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j v_j - \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k,$$

[0057] 其中,  $R_i^T$  表示第  $i$  个水下直升机的坐标转换矩阵的转置,  $r_i$  表示水下直升机在体坐标系下的角速度,  $R_j$  表示第  $j$  个水下直升机的坐标转换矩阵,  $a_{ij}=1$  表示第  $i$  个水下直升机能够获得第  $j$  个水下直升机的状态信息, 否则,  $a_{ij}=0$ , 同样,  $a_{ik}=1$  表示第  $i$  个水下直升机能够获得第  $k$  个虚拟领航者的状态信息, 否则,  $a_{ik}=0$ , 其中,  $m+1 \leq k \leq m+n$  表示虚拟领航者的数量,  $\mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  $\xi_i = \sum_{j=1}^{m+n} a_{ij}$ , 其中,  $\mathcal{M}$  和  $\xi_i$  均表示中间变量。

[0058] S1042: 结合有限时长性能函数和误差转换函数定义 = 误差变换:

$$[0059] \quad e_i = [e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}]^T, e_{ij} = p_{ij}(t) C_{ij}(z_{1,ij}), j=1, 2, 3$$

$$[0060] \quad C_{ij}(z_{1,ij}) = \frac{\exp(z_{1,ij}) - \exp(-z_{1,ij})}{\exp(z_{1,ij}) + \exp(-z_{1,ij})}$$

[0061] 其中,  $C_{ij}(z_{1,ij})$  表示误差转换函数,  $z_{1,i} = [z_{1,i1}, z_{1,i2}, z_{1,i3}]^T$  表示转换误差,  $j$  表示误差维度。

[0062] 其中,误差变换定义了一个误差转换关系。

[0063] S1043:计算转换误差及转换误差对时间的一阶导数:

$$[0064] \quad z_{1,ij} = \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{e_{ij}}{p_{ij}(t)} \right) - \frac{1}{2} \ln \left( 1 - \frac{e_{ij}}{p_{ij}(t)} \right).$$

$$[0065] \quad \dot{z}_{1,ij} = b_{ij} \dot{e}_{ij} - d_{ij} e_{ij}.$$

[0066] 其中,

$$b_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{p_{ij}(t) + e_{ij}} + \frac{1}{p_{ij}(t) - e_{ij}} \right), \quad d_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{p}_{ij}(t)}{p_{ij}(t)(p_{ij}(t) + e_{ij})} + \frac{\dot{p}_{ij}(t)}{p_{ij}(t)(p_{ij}(t) - e_{ij})} \right);$$

[0067] 转换误差对时间的一阶导数具体为:

$$[0068] \quad \dot{z}_{1,i} = \Gamma_i \left( -r_i \mathcal{M} e_i + \xi_i v_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j v_j - \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k \right) - \Xi_i e_i$$

[0069] 其中,  $\Gamma_i = \text{diag}[b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}]$ ,  $\Xi_i = \text{diag}[d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}]$ 。

[0070] 需要说明的是,计算合围控制误差的转换误差,转换误差表示了在将合围控制误差从一种形式转化为另一种形式时引入的误差。这个转换误差是由误差转换函数引起的,它反映了转化过程中的误差变化,通过计算转换误差,可以了解在性能度量或控制设计中引入的误差,以便在系统设计和分析中加以考虑。

[0071] S105:根据转换误差,利用径向基函数神经网络逼近动力学模型的力学不确定项,利用扰动观测器跟踪动力学模型的外部时变扰动项,结合动态面控制技术和反步法建立合围编队控制率。

[0072] 其中,合围编队控制率是一种控制策略,用于协调多个水下直升机形成一定的编队结构,并执行特定的编队任务,这个控制率的主要目标是确保编队中的每个成员遵循预定的运动策略,以满足任务的要求,同时与其他成员协调工作,以避免碰撞或混乱。

[0073] 动态面控制技术是一种控制方法,它使用虚拟的控制面来引导系统状态达到期望的轨迹。反步法是一种非线性控制方法,通过逐步设计控制器,从系统的输出反推出控制输入,以实现期望的性能,常用于具有非线性动态的系统,并且可以应对不确定性。建立一个合围编队的控制率,以确保多个水下直升机按照预定的编队策略进行运动,同时抵消动力学不确定性和外部时变扰动的影响,这涉及使用神经网络逼近不确定项,使用扰动观测器跟踪外部扰动,以及结合动态面控制技术和反步法来设计控制器,以实现合围编队的目标,这种综合的控制方法有助于提高系统的鲁棒性和性能。

[0074] 其中,扰动观测器是一种控制系统中的技术,用于估计和跟踪系统受到的外部扰动或干扰,外部扰动可以是任何系统输入或状态变化,这些变化在正常操作条件下可能引起系统性能下降,扰动观测器的目标是通过估计扰动的大小和影响,以便控制系统可以对其进行补偿,从而维持系统的期望性能。径向基函数神经网络将被用于逼近未知非线性函数  $h(\mathcal{G}): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ 。  $h(\theta) = W^{*T} \Theta(\theta) + \varepsilon$ , 式中,  $W^* = [W_1^*, \dots, W_q^*]^T \in \mathbb{R}^q$  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,  $\Theta(\mathcal{G}) = [s_1(\mathcal{G}), \dots, s_q(\mathcal{G})]^T \in \mathbb{R}^q$  为基函数向量, 其中  $q$  为神经网络的节点个数,  $s_i(\theta)$  为高斯激活函数。

$s_i(\mathcal{G}) = \exp\left(-\frac{(\mathcal{G}-\mu_i)^T(\mathcal{G}-\mu_i)}{\sigma^2}\right)$ , 式中,  $\mu_i$  和  $\sigma$  分别表示第  $i$  个节点的中心和基宽。

[0075] 在一种可能的实施方式中, S105具体包括:

[0076] S1051: 根据转换误差, 利用反步法确定合围编队的虚拟控制率  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \xi_i^{-1} \left( r_i \mathcal{M} e_i + \sum_{j=1}^m a_{ij} R_i^T R_j v_j + \sum_{k=m+1}^{m+n} a_{ik} R_i^T \dot{\eta}_k - \Gamma_i^{-1} K_{1i} z_{1,i} + \Gamma_i^{-1} \Xi_i e_i \right).$$

[0078] 其中,  $K_{1i}$  表示增益对角矩阵,  $\dot{\eta}_k$  表示第  $k$  个虚拟领航者的轨迹相对于时间的导数。

[0079] S1052: 使用动态面控制技术计算虚拟控制率相对于时间的导数, 以降低计算消耗:

$$\alpha_i = T_i \dot{\chi}_i + \chi_i,$$

[0081] 其中,  $T_i$  表示时间常数,  $\chi_i$  表示动态面控制辅助变量。

[0082] S1053: 定义动态面控制误差  $\varsigma_i$ , 定义动态面转换误差  $z_{2,i}$ , 并计算动态面转换误差相对于时间的一阶导数  $\dot{z}_{2,i}$ :

$$\varsigma_i = \chi_i - \alpha_i$$

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

$$\dot{z}_{2,i} = \dot{v}_i - \dot{\chi}_i$$

$$= H_i + \tau_{Di} + M_i^{-1} \tau_i + \varsigma_i / T_i$$

[0086] 其中,  $\tau_{Di} = M^{-1} \tau_{di}$ 。

[0087] 可以理解是, 根据约束条件: 扰动存在未知边界, 即存在未知常数  $\bar{\tau}_{di}$  使  $|\tau_{Di}| \leq \bar{\tau}_{di}$  成立。

[0088] S1054: 建立动力学不确定项, 利用径向基函数神经网络逼近动力学不确定项:

$$H_i(\theta_i) = M^{-1} (-C(v_i) v_i - D(v_i) v_i) = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$$

$$h_{ij}(\mathcal{G}_i) = W_{ij}^{*T} \Theta_j(\mathcal{G}) + \varepsilon_{ij}$$

$$\mathcal{G}_i = [\eta_i^T, v_i^T]^T$$

[0092] 其中,  $W^* = [W_1^*, \dots, W_q^*]^T \in \mathbb{R}^q$  表示最优权重系数向量,  $\varepsilon$  表示固有逼近误差, 满足

$|\varepsilon| \leq \bar{\varepsilon}$ , 其中,  $\bar{\varepsilon}$  表示未知小常数,  $\Theta(\mathcal{G}) = [s_1(\mathcal{G}), \dots, s_q(\mathcal{G})]^T \in \mathbb{R}^q$  表示基函数向量, 其中,  $q$  表示神经网络的节点个数,  $s_i(\mathcal{G}) = \exp\left(-\frac{(\mathcal{G}-\mu_i)^T(\mathcal{G}-\mu_i)}{\sigma^2}\right)$  表示高斯激活函数, 其中,  $\mu_i$  和  $\sigma$  分别表示第  $i$  个节点的中心和基宽;

[0093] S1055: 结合动态面转换误差, 建立合围编队控制率  $\tau_i$ :

$$\tau_i = M \left( -K_{2i} z_{2,i} - \Gamma_i \xi_i z_{1,i} - \hat{W}_i^T \Theta(\mathcal{G}_i) - \hat{\tau}_{Di} \tanh\left(\frac{\hat{\tau}_{Di} z_{2,i}}{s_1}\right) - \frac{\varsigma_i}{T_i} \right)$$

[0095] 其中,  $K_{2i} > 0$  表示增益对角矩阵,  $s_i > 0$  表示设计参数,  $\hat{W}_i^T$  表示  $W_i^{*T} = \text{blockdiag}[W_{i1}^{*T}, W_{i2}^{*T}, W_{i3}^{*T}]$  的自适应估计值,  $\Theta(\mathcal{G}_i) = [\Theta_1^T(\mathcal{G}_i), \Theta_2^T(\mathcal{G}_i), \Theta_3^T(\mathcal{G}_i)]^T$ ,  $\hat{\tau}_{Di} = \text{diag}[\hat{\tau}_{d,i1}, \hat{\tau}_{d,i2}, \hat{\tau}_{d,i3}]$ ,  $\tanh$  表示双曲正切函数, 其中,  $\hat{\tau}_{d,ij}$  表示  $\bar{\tau}_{d,ij}$  的自适应估计值。

[0096] 需要说明的是, 使用多种控制技术以应对不确定性和干扰, 充分考虑系统的动态性、不确定性和任务要求, 以确保编队的稳定性和性能。利用反步法确定虚拟控制率, 通过反步法的非线性控制设计, 使编队成员按照期望轨迹运动。增益矩阵允许对控制力的灵活调整, 以满足不同的任务需求。使用动态面控制技术来计算虚拟控制率的导数, 以引导系统状态达到预期轨迹, 同时减小计算复杂性, 时间常数允许平衡动态性和计算效率。定义和计算动态面控制误差和转换误差, 这些误差用于评估系统状态与期望轨迹之间的偏差, 并考虑扰动的未知边界, 以确保系统的鲁棒性。利用径向基函数神经网络逼近动力学不确定项, 这有助于处理系统模型不确定性, 提高系统的性能和鲁棒性。综合上述所有元素, 包括动态面控制误差、自适应估计值、设计参数和控制增益, 以建立合围编队的控制率, 这综合考虑了编队的动态响应、不确定性的补偿和轨迹的追踪。提供了一种鲁棒性的编队控制策略, 能够适应不同的环境和任务, 同时处理动力学不确定性和外部扰动, 这有助于确保编队在复杂的实际场景中能够稳定运行并满足任务要求。

[0097] 在一种可能的实施方式中, S105还包括:

[0098] S1056: 定义自适应估计值的自适应更新率:

[0099]  $\hat{W}_i^T$  的自适应更新率为:

$$[0100] \quad \dot{\hat{W}}_{ij} = \Pi_{ij} \left( -\Theta_j z_{2,ij} + \delta_{w,ij} \hat{W}_{ij} \right)$$

[0101] 其中,  $\Pi_{ij}$  为正定增益矩阵,  $\delta_{w,ij} > 0$  为设计参数。

[0102]  $\hat{\tau}_{d,ij}$  的自适应更新率为:

$$[0103] \quad \dot{\hat{\tau}}_{d,ij} = \sigma_{ij} \left( \delta_{d,ij} \bar{\tau}_{d,ij} + |z_{2,ij}| \right),$$

[0104] 其中,  $\sigma_{ij} > 0$ ,  $\delta_{d,ij} > 0$  为设计参数。

[0105] 需要说明的是, 自适应估计值的自适应更新率是一种控制策略, 用于动态地调整估计值的速度, 以更好地适应系统的变化, 这一策略允许自适应估计值快速逼近系统的真实状态, 特别是在面对不确定性和干扰时, 以确保编队控制在不同情况下的有效性。

[0106] S106: 建立基于动态阈值的事件触发控制器, 结合中间控制率控制合围编队控制率的更新频率。

[0107] 其中, 中间控制率为事件触发控制方法的特定表达, 中间控制率为两个触发时刻之间所使用的控制率。

[0108] 需要说明的是, 动态阈值与系统性能相关, 动态阈值的设定是基于满足系统控制性能的条件下设定的, 事件触发控制是一种控制策略, 其中控制器的更新是按与系统状态的变化或误差的大小相关的时间间隔进行, 基于动态阈值意味着触发控制的阈值是根据系统状态的动态性和需求来自适应地调整的。当系统状态变化较小或误差较小时, 触发控制不会进行更新, 从而减少计算负担和机械磨损。但当系统状态变化大或误差较大时即超出动态阈值, 触发控制会更频繁地进行更新, 以确保编队控制的精确性, 避免水下直升机接收

到输入数据就进行机械调整的情况,在满足控制性能的情况下减少机械磨损,增长水下直升机维护周期,提升水下直升机寿命。

[0109] 在一种可能的实施方式中,S106具体包括:

[0110] S1061:定义合围编队控制率的更新函数:

[0111]  $\bar{\tau}_i(t) = \lambda_i(t_k), t_k \leq t < t_{k+1}, k = 0, 1, \dots$

[0112]  $\lambda_i(t) = -(1+\delta) \left[ \tau_i \tanh\left(\frac{z_{2i}^T \tau_i}{s_2}\right) + \sigma_2 \tanh\left(\frac{z_{2i}^T \sigma_2}{s_2}\right) \right], s_2 > 0, \sigma_2 > \sigma_1/(1-\delta)$

[0113] 其中, $t_k$ 表示第k次更新触发时刻, $s_2$ 表示控制器设计参数, $\lambda_i(t)$ 表示中间控制率;

[0114] S1062:定义更新函数的辅助测量误差 $\xi_i(t)$ :

[0115]  $\xi_i(t) = \lambda_i(t) - \bar{\tau}_i(t)$ ;

[0116] S1063:结合辅助测量误差定义更新函数的更新触发时刻:

[0117]  $t_{k+1} = \inf \{t > t_k \mid |\xi_i(t)| \geq \delta |\bar{\tau}_i(t)| + \sigma_1\}, 0 < \delta < 1, \sigma_1 > 0$

[0118] 其中,符号“inf”表示下确界。

[0119] S107:利用合围编队控制率控制动力学模型,完成水下直升机的合围编队控制。

[0120] 需要说明的是,合围控制即设计适当的控制率,使所有的跟随者进入由虚拟领航者构成的几何凸面体中,也就是说, $\exists \alpha_k > 0, \sum_{k=M+1}^{M+N} \alpha_k = 1$ ,

$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\eta_i(t) - \sum_{k=m+1}^{m+n} \alpha_k \eta_k(t)\| = 0, i = 1, \dots, m$ , 其中, $\eta_i$ 为虚拟领航者的轨迹。

[0121] 参考说明书附图2,示出了本发明提供的一种水下直升机编队的通信拓扑结构示意图。参考说明书附图3,示出了本发明提供的一种水下直升机合围控制移动路径效果图。

[0122] 图2展示了在仿真实验过程中由4个跟随者水下直升机,编号分别为1、2、3和4和2个虚拟领航者分别编号为5和6组成,将其组成了通信拓扑结构示意图,图3展示了在1200s内最终的跟踪效果图,展示了跟随者水下直升机进入由2个虚拟领航者构成的凸多面体,并跟踪给定轨迹的移动路径,完成了跟踪任务。

[0123] 为了验证所提方法的有效性,通过对由4个跟随者AUH和2个虚拟领航者组成的多智能体系统进行仿真实验。虚拟领航者移动路径描述为 $\eta_5(t) = [80-40\sin(\pi t/800), 80-40\cos(\pi t/800), \pi t/800]^T, \eta_6(t) = [80-60\sin(\pi t/800), 80-60\cos(\pi t/800), \pi t/800]^T$ 。水下直升机的初始状态设定为 $\eta_1(0) = [85, 42, -\pi/2]^T, \eta_2(0) = [90, 37, \pi/2]^T, \eta_3(0) = [90, 23, -\pi/2]^T, \eta_4(0) = [85, 18, \pi/2]^T, v_i = [0, 0, 0]^T$ , 其中, $i = 1, \dots, 4$ 。外部时变扰动描述为 $\tau_d = [4+\sin(t+\pi/3), 3+0.8\cos(0.5t+\pi/6), 0.8+0.75\cos(0.5t+\pi/4)]^T$ 。控制率的参数值设计为 $K_{1i} = \text{diag}[0.3, 0.3, 1], K_{2i} = \text{diag}[3, 3, 10], T_i = 0.01, s_1 = 0.01, s_2 = 0.01, \delta = 0.1, \sigma_1 = 0.5$ 和 $\sigma_2 = 3$ 。有限时间性能函数的参数设计为 $T_p = 10, p_{ij}(0) = 10, p_{ij}(\infty) = 0.05$ 。自适应更新率的参数设计为 $\sigma_{ij} = 2, \Pi_{ij} = \text{diag}\{1\}, \delta_{d,ij} = 0.01, \delta_{w,ij} = 0.01$ 。径向基函数神经网络的节点设定为300个,均布于区间 $[-5, 5] \times [-5, 5] \times [-2, 2]$ ,基宽设定为1。最终的结果显示在本控制方法的作用下编队内水下直升机的跟踪误差收敛至0附近的紧集,并且在本控制方法的作用下得到了有界控制输入,验证了算法在实际应用中的可行性。

[0124] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益技术效果:

[0125] (1) 在本发明中,建立了包括水下直升机和虚拟领航者的动力学模型,确定了保证控制器控制性能的约束条件,在这个基础上重新建立了有限时长性能函数,进而重新定义合围控制的转换误差,利用反步法设计水下直升机的自适应合围编队控制率,通过径向基函数神经网络和扰动补偿器分别处理动力学模型的动力学不确定性和水下环境的外部时变扰动,使得设计出的合围编队控制器在满足符合控制器控制性能的同时,能够按预定目标在预设收敛时长内完成收敛过程,保证跟踪误差在有限时间内收敛,使得水下直升机合围编队高效率的完成合围任务,提升控制器控制性能。使得水下直升机合围编队能够按预期完成合围任务,增加控制可调整性和及时性。

[0126] (2) 通过引入基于动态阈值的事件触发控制机制,这种时间触发机制在保证控制性能的前提下,使得控制器只有在接收到超出动态阈值范围的输入信号时才执行机械调整,减少控制器的更新频率,降低水下直升机机械磨损,提升水下直升机寿命,同时,动态阈值条件的引入,能够更好的平衡降低控制频率和保证控制性能的关系。

[0127] 实施例2

[0128] 在一个实施例中,本发明提供的一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制系统,包括处理器和用于存储处理器可执行指令的存储器;处理器被配置为调用存储器存储的指令,用于执行实施例1中的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法。

[0129] 本发明提供的一种事件触发框架下水下直升机合围编队控制系统可以实现上述实施例1中的事件触发框架下水下直升机合围编队控制方法的步骤和效果,为避免重复,本发明不再赘述。

[0130] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益技术效果:

[0131] (1) 在本发明中,建立了包括水下直升机和虚拟领航者的动力学模型,确定了保证控制器控制性能的约束条件,在这个基础上重新建立了有限时长性能函数,进而重新定义合围控制的转换误差,利用反步法设计水下直升机的自适应合围编队控制率,通过径向基函数神经网络和扰动补偿器分别处理动力学模型的动力学不确定性和水下环境的外部时变扰动,使得设计出的合围编队控制器在满足符合控制器控制性能的同时,能够按预定目标在预设收敛时长内完成收敛过程,保证跟踪误差在有限时间内收敛,使得水下直升机合围编队高效率的完成合围任务,提升控制器控制性能。使得水下直升机合围编队能够按预期完成合围任务,增加控制可调整性和及时性。

[0132] (2) 通过引入基于动态阈值的事件触发控制机制,这种时间触发机制在保证控制性能的前提下,使得控制器只有在接收到超出动态阈值范围的输入信号时才执行机械调整,减少控制器的更新频率,降低水下直升机机械磨损,提升水下直升机寿命,同时,动态阈值条件的引入,能够更好的平衡降低控制频率和保证控制性能的关系。

[0133] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。

[0134] 以上实施例仅表达了本发明的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对发明专利范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本发明的保护范围。因此,本发明的保护范围应以所附权利要求为准。

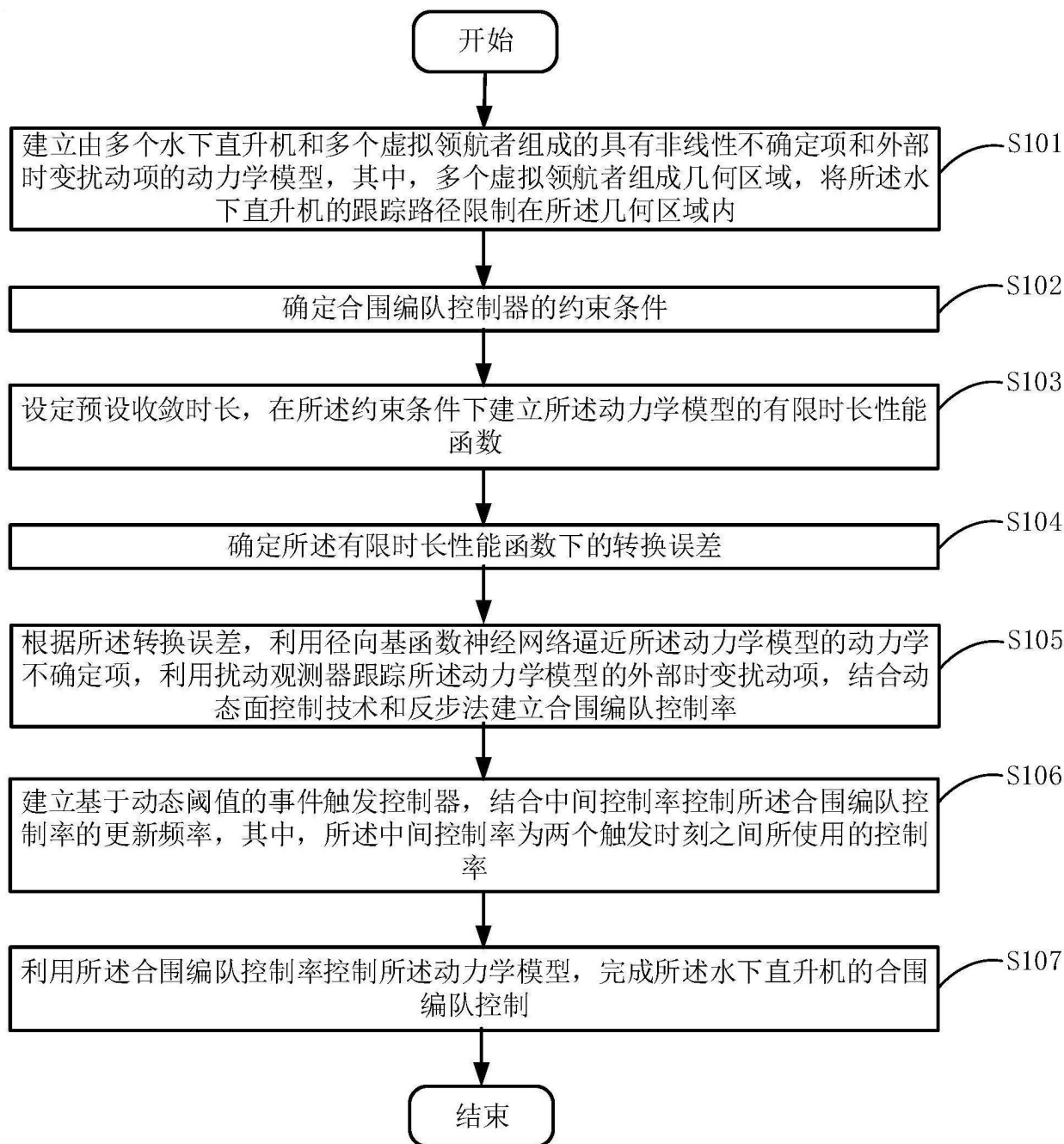


图1

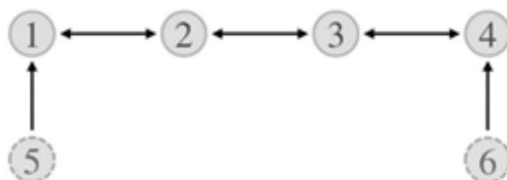


图2



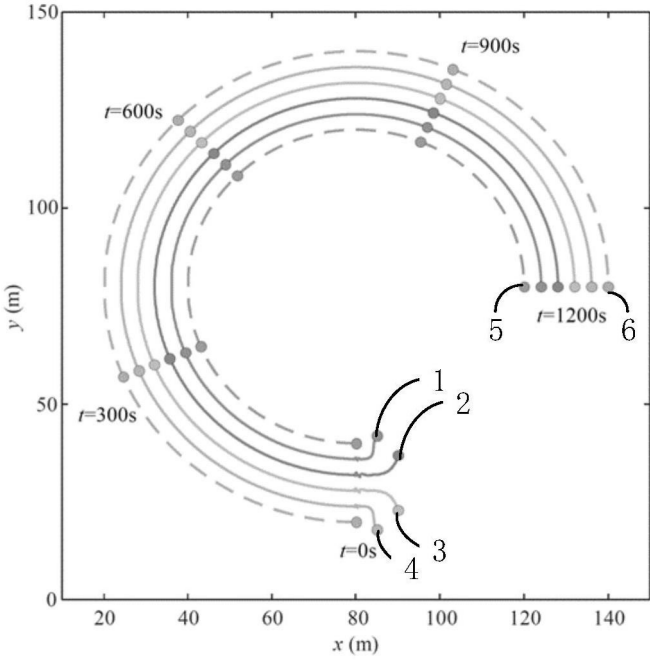


图3