



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108897334 A

(43)申请公布日 2018. 11. 27

(21)申请号 201810799545.1

(22)申请日 2018.07.19

(71)申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 张超 张各各 姚瑞文 张卫东

陆宇 曹刚

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 杨宏泰

(51) Int. Cl.

G05D 1/08(2006.01)

G05B 13/04(2006.01)

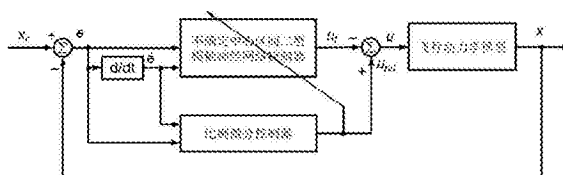
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于三角不确定中心区间二型模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,包括以下步骤:1)设定仿昆虫扑翼飞行器姿态控制模型中的比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数;2)采集扑翼飞行器姿态角信息,经滤波融合后获得实际量测的姿态角;3)对实际量测的姿态角和预设的姿态角作差,获得对应的姿态角误差和姿态角误差的一阶导数,将其作为比例微分控制器和模糊神经网络的输入量,获得控制器的输出,同时更新模糊神经网络的参数;4)仿昆虫扑翼飞行器机载飞行控制单元根据比例微分控制器和模糊神经网络的输出对姿态角进行调控。与现有技术相比,本发明具有抗干扰能力强、鲁棒性强、便捷性和实用性高等优点。



1. 一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 设定仿昆虫扑翼飞行器姿态控制模型中的比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数;

2) 采集扑翼无人机姿态角信息,经滤波融合后获得实际量测的姿态角;

3) 对实际量测的姿态角和预设的姿态角作差,获得对应的姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} ,将其作为比例微分控制器和模糊神经网络的输入量,并计算比例微分控制器的输出,同时更新模糊神经网络的参数;

4) 仿昆虫扑翼飞行器的机载飞行控制单元根据模糊神经网络的输出对姿态角进行调控。

2. 根据权利要求1所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,其特征在于,所述的步骤1)中,比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数包括:

比例微分控制器的控制参数向量 K_p 、 K_d ,模糊神经网络的区间二型三角隶属度函数参数 c_{1i} 、 \bar{c}_{1i} 、 d_{1i} 、 c_{2j} 、 \bar{c}_{2j} 、 d_{2j} 以及参数更新因子 β 、 α 、 q 、 η 。

3. 根据权利要求2所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,其特征在于,所述的步骤3)具体包括以下步骤:

31) 计算比例微分控制器输出 $u_{pd} = K_p e + K_d \dot{e}$;

32) 计算模糊神经网络的输出 u_f ;

33) 对模糊神经网络参数进行更新。

4. 根据权利要求3所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,其特征在于,所述的步骤32)中,模糊神经网络依次包括:

输入层:将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 输入到模糊神经网络当中;

模糊层:依据区间二型三角模糊隶属度函数将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 转化为相应区间的二型隶属度函数值 $\underline{u}_{1i}(e)$ 、 $\bar{u}_{1i}(e)$ 、 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 和 $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$;

推理层:根据模糊推理规则 R_{ij} 计算每条规则对应的后件数值 f_{ij} ;

规则层:通过乘积 t -范算子计算每条规则的点火强度;

输出层:根据每条规则对应的后件数值 f_{ij} 以及上、下点火水平强度 \underline{w}_{ij} 和 \bar{w}_{ij} 计算出模糊神经网络的输出 u_f 。

5. 根据权利要求4所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,其特征在于,所述的区间二型三角模糊隶属度函数的表达式为:

$$\bar{u}_{1i}(e) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{e - c_{1i}}{d_{1i}} \right|, & c_{1i} - d_{1i} < e < c_{1i} \\ 1, & c_{1i} \leq e \leq \bar{c}_{1i} \\ 1 - \left| \frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}} \right|, & \bar{c}_{1i} < e < \bar{c}_{1i} + d_{1i} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \underline{u}_{1i}(e) &= \begin{cases} 1 - \frac{|e - \bar{c}_{1i}|}{d_{1i}}, & \bar{c}_{1i} - d_{1i} < e < \frac{c_{1i} + \bar{c}_{1i}}{2} \\ 1 - \frac{|e - c_{1i}|}{d_{1i}}, & \frac{c_{1i} + \bar{c}_{1i}}{2} \leq e < c_{1i} + d_{1i} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \\
 \bar{u}_{2j}(\dot{e}) &= \begin{cases} 1 - \frac{|\dot{e} - c_{2j}|}{d_{2j}}, & c_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < c_{2j} \\ 1, & c_{2j} \leq \dot{e} \leq \bar{c}_{2j} \\ 1 - \frac{|\dot{e} - \bar{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \bar{c}_{2j} < \dot{e} < \bar{c}_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \\
 \underline{u}_{2j}(\dot{e}) &= \begin{cases} 1 - \frac{|\dot{e} - \bar{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \bar{c}_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < \frac{c_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \\ 1 - \frac{|\dot{e} - c_{2j}|}{d_{2j}}, & \frac{c_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \leq \dot{e} < c_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases}
 \end{aligned}$$

其中, $\bar{u}_{1i}(e)$ 、 $\underline{u}_{1i}(e)$ 分别为姿态角误差 e 的第 i ($i=1, 2, \dots, I$) 个上、下隶属度函数, $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$ 、 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 分别为姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 的第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个上、下隶属度函数。

6. 根据权利要求5所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法, 其特征在于, 为了维持区间二型三角模糊隶属度函数的性质, 须满足以下条件:

$$(\bar{c}_{1i} - c_{1i})/2 < d_{1i}, \quad (\bar{c}_{2j} - c_{2j})/2 < d_{2j}.$$

7. 根据权利要求4所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法, 其特征在于, 所述的模糊推理规则 R_{ij} 表示为:

$$R_{ij}: \text{if } e \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } \dot{e} \text{ is } \tilde{B}_{2j}, \quad f_{ij} = \tilde{C}_{ij}$$

其中, \tilde{A}_{1i} 为姿态角误差 e 在 \tilde{A}_1 集合中第 i ($i=1, 2, \dots, I$) 个区间二型隶属度函数, \tilde{B}_{2j} 为姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 在 \tilde{B}_2 集合中的第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个区间二型隶属度函数, \tilde{C}_{ij} 为 \tilde{C} 集合中第 ij 个清晰数, \tilde{A}_1 和 \tilde{B}_2 分别为 e 和 \dot{e} 的区间二型隶属度函数的集合, \tilde{C} 为后件清晰数的集合, 即 $\tilde{A}_{1i} \in \tilde{A}_1$, $\tilde{B}_{2j} \in \tilde{B}_2$, $\tilde{C}_{ij} \in \tilde{C}$ 。

8. 根据权利要求5所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法, 其特征在于, 所述的点火强度的表达式为:

$$\bar{W}_{ij} = \bar{u}_{1i}(e) \bar{u}_{2j}(\dot{e})$$

$$\underline{W}_{ij} = \underline{u}_{1i}(e) \underline{u}_{2j}(\dot{e})$$

其中, \bar{W}_{ij} 、 \underline{W}_{ij} 分别为上、下点火强度。

9. 根据权利要求8所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法, 其特征在于, 所述的模糊神经网络输出 u_f 的表达式为:

$$u_f = q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{W}_{ij} + (1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{\bar{W}}_{ij}$$

$$\tilde{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}}$$

$$\tilde{\bar{W}}_{ij} = \frac{\bar{W}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{W}_{ij} = 1$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{\bar{W}}_{ij} = 1$$

其中, \tilde{W}_{ij} 和 $\tilde{\bar{W}}_{ij}$ 分别为第 ij 个神经元归一化的低、高的点火水平强度, q 为表示网络输出中的上限值和下限值所占的比例, 且 $0 \leq q \leq 1$ 。

10. 根据权利要求9所述的一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法, 其特征在于, 采用比例微分控制器的输出控制来调控模糊控制器, 其参数更新规则如下:

$$\dot{\underline{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \underline{c}_{1i}}{d_{1i}}\right), \quad \dot{\underline{c}}_{2j} = \ddot{e} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \underline{c}_{2j}}{d_{2j}}\right),$$

$$\dot{\bar{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}}\right), \quad \dot{\bar{c}}_{2j} = \ddot{e} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \bar{c}_{2j}}{d_{2j}}\right),$$

$$\dot{d}_{1i} = \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}), \quad \dot{d}_{2j} = \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}),$$

$$\dot{f}_{ij} = \frac{-[q \tilde{W}_{ij} + (1-q) \tilde{\bar{W}}_{ij}] \beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{[q \tilde{W} + (1-q) \tilde{\bar{W}}]^T [q \tilde{W} + (1-q) \tilde{\bar{W}}]}, \quad \dot{q} = \frac{-\beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{F(\tilde{W} - \tilde{\bar{W}})}, \quad \dot{\beta} = \frac{1}{2} \alpha |u_{pd}|$$

其中, $F = [f_{11}, \dots, f_{ij}, \dots, f_{IJ}]$ 是模糊推理规则的输出向量, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 上标 $\dot{\cdot}$ 为求导。

一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及航空工程飞行器领域,尤其是涉及一种基于三角不确定中心区间二型模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法。

背景技术

[0002] 在过去的几年里,仿昆虫扑翼微飞行器因其体积小、重量轻、结构紧凑、飞行安静、机动性高等特点而成为仿生工程领域的研究热点。这些优势让其适用于许多实际的工程领域。例如,在建筑物内或在塌陷结构里搜索和救援;感知化学药品的泄漏;对核电站进行辐射监测以及在军事行动中监视和侦察。随着微型电机、机载电源和传感器以及刚性和柔性传动机构的进步,仿昆虫扑翼微型飞行器的制造成为可能。然而,要真正实现这些用途,其相关的飞行控制将变得非常复杂。

[0003] 当前,大多数的飞行控制都是将扑翼飞行器的动力学模型线性化,再用线性控制器将其稳定在某个平衡状态,如悬停状态。但是,这种线性化的近似也带来了一定的弊端。例如,很难实现飞行模态的高、低频切换;对系统不确定性和外界干扰适应性较低。同时,由于自身重量的限制,机载驱动器的数目较少。这就容易使飞行动力系统处于欠驱动状态,进而就要求控制器设计的时候必须考虑系统的非线性。另外,考虑到该类无人机飞行环境的复杂性、空气动力学的不稳定性以及其自身建模的不确定性,基于三角不确定中心区间二型模糊神经网络的飞行控制方法在这种情况下更有优势,因为它不仅能用模糊系统补偿系统中的有界不确定项,而且还能利用神经网络增强控制器的学习能力。相对于传统的控制器,模糊神经网络有较强的适应性和鲁棒性。目前,模糊神经网络已经在一些工程领域得到应用,如控制加热炉温度,电池状态估计和交通流量预测等,但其在扑翼飞行器飞行控制方面的研究工作还比较少。

发明内容

[0004] 本发明的目的就是为了克服上述现有技术存在的缺陷而提供一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法。

[0005] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0006] 一种基于模糊神经网络的仿昆虫扑翼飞行器姿态控制方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 设定仿昆虫扑翼飞行器姿态控制模型中的比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数;

[0008] 2) 采集扑翼无人机姿态角信息,经滤波融合后获得实际量测的姿态角;

[0009] 3) 对实际量测的姿态角和预设的姿态角作差,获得对应的姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} ,将其作为比例微分控制器和模糊神经网络的输入量,并计算比例微分控制器的输出,同时更新模糊神经网络的参数;

[0010] 4) 仿昆虫扑翼飞行器的机载飞行控制单元根据模糊神经网络的输出对姿态角进行调控。

[0011] 所述的步骤1)中,比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数包括:

[0012] 比例微分控制器的控制参数向量 K_p 、 K_d ,模糊神经网络的区间二型三角隶属度函数参数 c_{1i} 、 \bar{c}_{1i} 、 d_{1i} 、 c_{2j} 、 \bar{c}_{2j} 、 d_{2j} 以及参数更新因子 β 、 α 、 q 、 η 。

[0013] 所述的步骤3)具体包括以下步骤:

[0014] 31) 计算比例微分控制器输出 $u_{pd} = K_p e + K_d \dot{e}$;

[0015] 32) 计算模糊神经网络的输出 u_f ;

[0016] 33) 对模糊神经网络参数进行更新。

[0017] 所述的步骤32)中,模糊神经网络依次包括:

[0018] 输入层:将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 输入到模糊神经网络当中;

[0019] 模糊层:依据区间二型三角模糊隶属度函数将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 转化为相应区间的二型隶属度函数值 $u_{1i}(e)$ 、 $\bar{u}_{1i}(e)$ 、 $u_{2j}(\dot{e})$ 和 $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$;

[0020] 推理层:根据模糊推理规则 R_{ij} 计算每条规则对应的后件数值 f_{ij} ;

[0021] 规则层:通过乘积t-范算子计算每条规则的点火强度;

[0022] 输出层:根据每条规则对应的后件数值 f_{ij} 以及上、下点火水平强度 \bar{W}_{ij} 和 \underline{W}_{ij} 计算出模糊神经网络的输出 u_f 。

[0023] 所述的区间二型三角模糊隶属度函数的表达式为:

$$[0024] \quad \bar{u}_{1i}(e) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{e - c_{1i}}{d_{1i}} \right|, & c_{1i} - d_{1i} < e < c_{1i} \\ 1, & c_{1i} \leq e \leq \bar{c}_{1i} \\ 1 - \left| \frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}} \right|, & \bar{c}_{1i} < e < \bar{c}_{1i} + d_{1i} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$[0025] \quad \underline{u}_{1i}(e) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}} \right|, & \bar{c}_{1i} - d_{1i} < e < \frac{c_{1i} + \bar{c}_{1i}}{2} \\ 1 - \left| \frac{e - c_{1i}}{d_{1i}} \right|, & \frac{c_{1i} + \bar{c}_{1i}}{2} \leq e < c_{1i} + d_{1i} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$[0026] \quad \bar{u}_{2j}(\dot{e}) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{\dot{e} - c_{2j}}{d_{2j}} \right|, & c_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < c_{2j} \\ 1, & c_{2j} \leq \dot{e} \leq \bar{c}_{2j} \\ 1 - \left| \frac{\dot{e} - \bar{c}_{2j}}{d_{2j}} \right|, & \bar{c}_{2j} < \dot{e} < \bar{c}_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

$$[0027] \quad \underline{u}_{2j}(\dot{e}) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{\dot{e} - \bar{c}_{2j}}{d_{2j}} \right|, & \bar{c}_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < \frac{c_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \\ 1 - \left| \frac{\dot{e} - c_{2j}}{d_{2j}} \right|, & \frac{c_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \leq \dot{e} < c_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

[0028] 其中, $\bar{u}_{1i}(e)$ 、 $\underline{u}_{1i}(e)$ 分别为姿态角误差 e 的第 i ($i=1, 2, \dots, I$) 个上、下隶属度函数, $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$ 、 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 分别为姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 的第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个上、下隶属度函数。

[0029] 为了维持区间二型三角模糊隶属度函数的性质, 须满足以下条件:

$$[0030] \quad (\bar{c}_{1i} - c_{1i})/2 < d_{1i}, \quad (\bar{c}_{2j} - c_{2j})/2 < d_{2j}。$$

[0031] 所述的模糊推理规则 R_{ij} 表示为:

$$[0032] \quad R_{ij}: \text{if } e \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } \dot{e} \text{ is } \tilde{B}_{2j}, \quad f_{ij} = \tilde{C}_{ij}$$

[0033] 其中, \tilde{A}_{1i} 为姿态角误差 e 在 \tilde{A}_1 集合中第 i ($i=1, 2, \dots, I$) 个区间二型隶属度函数, \tilde{B}_{2j} 为姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 在 \tilde{B}_2 集合中的第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个区间二型隶属度函数, \tilde{C}_{ij} 为 \tilde{C} 集合中第 ij 个清晰数, \tilde{A}_1 和 \tilde{B}_2 分别为 e 和 \dot{e} 的区间二型隶属度函数的集合, \tilde{C} 为后件清晰数的集合, 即 $\tilde{A}_{1i} \in \tilde{A}_1, \tilde{B}_{2j} \in \tilde{B}_2, \tilde{C}_{ij} \in \tilde{C}$ 。

[0034] 所述的点火强度的表达式为:

$$[0035] \quad \bar{W}_{ij} = \bar{u}_{1i}(e) \bar{u}_{2j}(\dot{e})$$

$$[0036] \quad \underline{W}_{ij} = \underline{u}_{1i}(e) \underline{u}_{2j}(\dot{e})$$

[0037] 其中, \bar{W}_{ij} 、 \underline{W}_{ij} 分别为上、下点火强度。

[0038] 所述的模糊神经网络输出 u_f 的表达式为:

$$[0039] \quad u_f = q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{W}_{ij} + (1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{\bar{W}}_{ij}$$

$$[0040] \quad \tilde{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}}$$

$$[0041] \quad \tilde{\bar{W}}_{ij} = \frac{\bar{W}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}}$$

$$[0042] \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{W}_{ij} = 1$$

$$[0043] \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{W}_{ij} = 1$$

[0044] 其中, \tilde{W}_{ij} 和 $\tilde{\bar{W}}_{ij}$ 分别为第 i, j 个神经元归一化的低、高的点火水平强度, q 为表示网络输出中的上限值和下限值所占的比例, 且 $0 \leq q \leq 1$ 。

[0045] 采用比例微分控制器的输出控制来调控模糊控制器, 其参数更新规则如下:

$$[0046] \quad \dot{\underline{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \underline{c}_{1i}}{d_{1i}}\right), \quad \dot{\underline{c}}_{2j} = \dot{e} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \underline{c}_{2j}}{d_{2j}}\right),$$

$$[0047] \quad \dot{\bar{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}}\right), \quad \dot{\bar{c}}_{2j} = \dot{e} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \bar{c}_{2j}}{d_{2j}}\right),$$

$$[0048] \quad \dot{d}_{1i} = \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}), \quad \dot{d}_{2j} = \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}),$$

$$[0049] \quad \dot{f}_{ij} = \frac{-[q\tilde{W}_{ij} + (1-q)\tilde{\bar{W}}_{ij}] \beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{[q\tilde{W} + (1-q)\tilde{\bar{W}}]^T [q\tilde{W} + (1-q)\tilde{\bar{W}}]}, \quad \dot{q} = \frac{-\beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{F(\tilde{W} - \tilde{\bar{W}})}, \quad \dot{\beta} = \frac{1}{2} \alpha |u_{pd}|$$

[0050] 其中, $F = [f_{11}, \dots, f_{ij}, \dots, f_{IJ}]$ 是模糊推理规则的输出向量, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 上标 \cdot 为求导。

[0051] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0052] 1) 在干扰存在的条件下, 采用不确定中心区间二型三角模糊隶属度函数能够有效地对仿生扑翼无人机进行姿态控制, 具有更强的抗干扰能力;

[0053] 2) 能够实时在线学习并对参数进行更新, 具有更强的鲁棒性;

[0054] 3) 对比例微分控制器参数数值精度要求相对较低, 一定程度上可以降低调参难度, 具有更强的便捷性和实用性。

附图说明

[0055] 图1为不确定中心区间二型三角模糊隶属度函数示意图。

[0056] 图2为三角不确定中心区间二型模糊神经网络示意图。

[0057] 图3为仿昆虫扑翼无人飞行器的姿态控制流程图。

具体实施方式

[0058] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0059] 实施例

[0060] 本发明提出了一种基于三角不确定中心区间二型模糊神经网络的仿生扑翼飞行器姿态控制方法。具体的控制代码可以集成在机载的嵌入式飞行控制单元中。

[0061] 如图1所示, 本发明采用的不确定中心区间二型三角模糊隶属度函数介绍如下:

[0062] 区间二型三角模糊隶属度函数是传统的一型三角模糊隶属度函数的扩展。传统的一型三角模糊隶属度函数的数值是清晰数。而区间二型三角模糊隶属度函数的数值仍是一型模糊集。这就意味着其比一型三角模糊隶属度函数具有更强的表达不确定的能力。附图1是不确定中心区间二型三角模糊隶属度函数的示意图。其中, d 是隶属度函数的宽度, 而 c

和 \bar{c} 是该区间二型隶属度函数的左、右中心。 \bar{u} 和 \underline{u} 分别代表上、下隶属度函数。根据附图3中的流程图,可以发现,区间二型模糊神经网络有两个输入,即姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 。e的第 i ($i=1,2,\dots,I$) 个上、下隶属度函数分别表示为 $\bar{u}_{li}(e)$ 和 $\underline{u}_{li}(e)$ 。它们对应的数学表达式如下:

$$[0063] \quad \bar{u}_{li}(e) = \begin{cases} 1 - \frac{|e - \underline{c}_{li}|}{d_{li}}, & \underline{c}_{li} - d_{li} < e < \underline{c}_{li} \\ 1, & \underline{c}_{li} \leq e \leq \bar{c}_{li} \\ 1 - \frac{|e - \bar{c}_{li}|}{d_{li}}, & \bar{c}_{li} < e < \bar{c}_{li} + d_{li} \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad \underline{u}_{li}(e) = \begin{cases} 1 - \frac{|e - \bar{c}_{li}|}{d_{li}}, & \bar{c}_{li} - d_{li} < e < \frac{\underline{c}_{li} + \bar{c}_{li}}{2} \\ 1 - \frac{|e - \underline{c}_{li}|}{d_{li}}, & \frac{\underline{c}_{li} + \bar{c}_{li}}{2} \leq e < \underline{c}_{li} + d_{li} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

[0064] 同样地, \dot{e} 的第 j ($j=1,2,\dots,J$) 个上、下隶属度函数分别表示为 $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$ 和 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 。它们对应的数学表达式如下:

$$[0065] \quad \bar{u}_{2j}(\dot{e}) = \begin{cases} 1 - \frac{|\dot{e} - \underline{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \underline{c}_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < \underline{c}_{2j} \\ 1, & \underline{c}_{2j} \leq \dot{e} \leq \bar{c}_{2j} \\ 1 - \frac{|\dot{e} - \bar{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \bar{c}_{2j} < \dot{e} < \bar{c}_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad \underline{u}_{2j}(\dot{e}) = \begin{cases} 1 - \frac{|\dot{e} - \bar{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \bar{c}_{2j} - d_{2j} < \dot{e} < \frac{\underline{c}_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \\ 1 - \frac{|\dot{e} - \underline{c}_{2j}|}{d_{2j}}, & \frac{\underline{c}_{2j} + \bar{c}_{2j}}{2} \leq \dot{e} < \underline{c}_{2j} + d_{2j} \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

[0066] 其中,当 $(\bar{c}_{li} - \underline{c}_{li})/2 = d_{li}$, $(\bar{c}_{2j} - \underline{c}_{2j})/2 = d_{2j}$ 时, $\underline{u}_{li}(e)$ 和 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 的隶属度函数值都变为零,而 $\bar{u}_{li}(e)$ 和 $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$ 都会退化成传统的一型梯形隶属度函数。因此,为了维持不确定中心区间二型三角模糊隶属函数的性质,必须使 $(\bar{c}_{li} - \underline{c}_{li})/2 < d_{li}$, $(\bar{c}_{2j} - \underline{c}_{2j})/2 < d_{2j}$

[0067] 本发明的具体实施过程包括以下步骤:

[0068] 步骤1:设定比例微分控制器和模糊神经网络的初始参数。此处,姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 各包括三个区间二型三角模糊隶属度函数。因此,需要初始化的参数包括: $K_p, K_d, \underline{c}_{1i}, \bar{c}_{1i}, d_{1i}, \underline{c}_{2j}, \bar{c}_{2j}, d_{2j}, f_{ij}, \beta, \alpha, q, \eta$ 。其中 K_p, K_d 是比例微分控制器的控制参数向量, $\underline{c}_{1i}, \bar{c}_{1i}, d_{1i}, \underline{c}_{2j}, \bar{c}_{2j}, d_{2j}, f_{ij}$ 是模糊神经网络的区间二型三角隶属度函数参数, β, α, q, η 是参数更新因子。

[0069] 步骤2:扑翼无人机姿态角信息的采集、滤波和融合。利用机载的惯性测量单元IMU(主要包括三轴陀螺仪、三轴加速度计以及三轴磁力计等传感器)对机体的姿态信号进行采集,进而进行滤波处理去除干扰信息和噪声。此处主要采用高通滤波器、低通滤波器来实现滤波。然后,将滤波后的来自不同传感器姿态信息进行融合,获取较为准确的姿态角。

[0070] 步骤3:控制器实时输出计算和参数更新。将实际量测的姿态角和预设的姿态角进行比较,获得相应的姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 。按照附图2的方式输入到控制模型当中进行控制器输出计算,具体为:

[0071] (1) 计算比例微分控制器输出 $u_{pd} = K_p e + K_d \dot{e}$;

[0072] (2) 按照模糊神经网络层1—5的步骤计算模糊神经网络的输出 u_f , 本例中的模糊神经网络采用TSK型区间二型模糊神经网络, TSK型区间二型模糊神经网络采用区间二型三角模糊隶属度函数来描述前件部分, 而采用零阶清晰数来表示后件部分, 具体结构和推导过程为:

[0073] 层1: 输入层。将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 输入到模糊神经网络当中;

[0074] 层2: 模糊层。依据上述介绍区间二型三角模糊隶属度函数的公式, 将姿态角误差 e 和姿态角误差的一阶导数 \dot{e} 转化成相应区间二型隶属度函数值 $\underline{u}_{1i}(e)$ 、 $\bar{u}_{1i}(e)$ 、 $\underline{u}_{2j}(\dot{e})$ 、 $\bar{u}_{2j}(\dot{e})$;

[0075] 层3: 推理层。根据模糊推理规则 R_{ij} 计算每条规则对应后件数值 f_{ij} , 模糊推理规则 R_{ij} 可以表示为如下形式:

[0076] R_{ij} : if e is \tilde{A}_{1i} and \dot{e} is \tilde{B}_{2j} , then $f_{ij} = \tilde{C}_{ij}$ 。

[0077] 其中, e 和 \dot{e} 是在层1中的输入变量, \tilde{A}_{1i} 和 \tilde{B}_{2j} 分别是 e 和 \dot{e} 的第 i ($i=1, 2, \dots, I$)、 j ($j=1, 2, \dots, J$) 个区间二型隶属度函数, \tilde{C}_{ij} 是后件中第 ij 个清晰数;

[0078] 层4: 规则层。通过乘积 t -范算子计算每条规则的点火强度, 对应于上、下隶属度函数的上、下点火强度的数学表达式为:

[0079] $\bar{W}_{ij} = \bar{u}_{1i}(e) \bar{u}_{2j}(\dot{e})$, $\underline{W}_{ij} = \underline{u}_{1i}(e) \underline{u}_{2j}(\dot{e})$;

[0080] 层5: 输出层。利用层3中获得的规则后件数值 f_{ij} 以及层4中每条规则计算得出的上、下点火水平强度 \underline{W}_{ij} 、 \bar{W}_{ij} , 计算出模糊神经网络的最终输出。其表达式如下:

[0081] $u_f = q \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{W}_{ij} + (1-q) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{ij} \tilde{\bar{W}}_{ij}$;

[0082] 其中, q 是表示网络输出中的上限值和下限值所占的比例, $0 \leq q \leq 1$ 。 \tilde{W}_{ij} 和 $\tilde{\bar{W}}_{ij}$ 是来自该神经网络的第三层第 ij 个神经元归一化的低、高的点火水平强度。它们的数学表达式如下:

[0083] $\tilde{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J W_{ij}}$, $\tilde{\bar{W}}_{ij} = \frac{\bar{W}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \bar{W}_{ij}}$ 。其中, $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{W}_{ij} = 1$, $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tilde{\bar{W}}_{ij} = 1$ 。

[0084] (3) 对模糊神经网络参数 \underline{c}_{1i} 、 \bar{c}_{1i} 、 d_{1i} 、 \underline{c}_{2j} 、 \bar{c}_{2j} 、 d_{2j} 、 f_{ij} 、 β 、 α 、 q 进行更新, 其规则如下:

[0085] $\dot{\underline{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \underline{c}_{1i}}{d_{1i}}\right)$, $\dot{\underline{c}}_{2j} = \dot{\dot{e}} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \underline{c}_{2j}}{d_{2j}}\right)$,

[0086] $\dot{\bar{c}}_{1i} = \dot{e} - \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{e - \bar{c}_{1i}}{d_{1i}}\right)$, $\dot{\bar{c}}_{2j} = \dot{\dot{e}} - \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}) \operatorname{sgn}\left(\frac{\dot{e} - \bar{c}_{2j}}{d_{2j}}\right)$,

$$[0087] \quad \dot{d}_{1i} = \eta d_{1i} \operatorname{sgn}(u_{pd}), \quad \dot{d}_{2j} = \eta d_{2j} \operatorname{sgn}(u_{pd}), \quad \dot{f}_{ij} = \frac{-[q\tilde{W}_{ij} + (1-q)\tilde{\tilde{W}}_{ij}] \beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{[q\tilde{W} + (1-q)\tilde{\tilde{W}}]^T [q\tilde{W} + (1-q)\tilde{\tilde{W}}]},$$

$$[0088] \quad \dot{q} = \frac{-\beta \operatorname{sgn}(u_{pd})}{F(\tilde{W} - \tilde{\tilde{W}})}, \quad \dot{\beta} = \frac{1}{2} \alpha |u_{pd}|;$$

[0089] 步骤4:姿态角调控。计算总体控制信号 $u = u_{pd} - u_f$ 并将其输入到机载飞行控制单元当中,解算出翼形所对应的俯仰角和扑翼角。再通过数模转化模块驱动舵机实现翼形姿态的调整,进而从整体上调整扑翼飞行器的姿态角。

[0090] 步骤5:重复步骤2—4中姿态调整过程,最终达到对扑翼飞行器姿态进行稳定控制的目的。

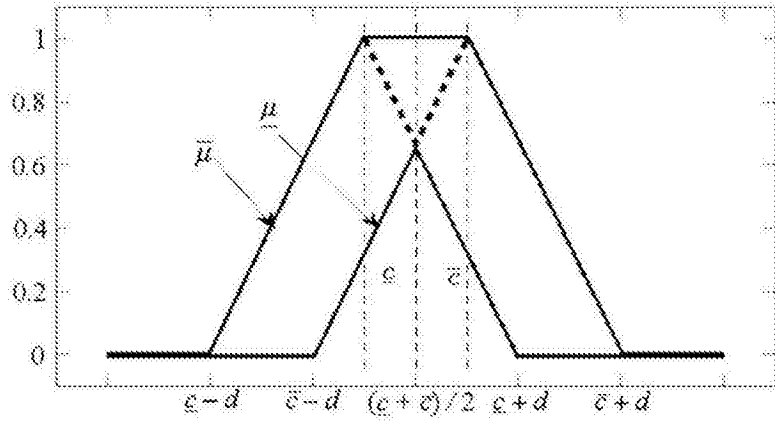


图1

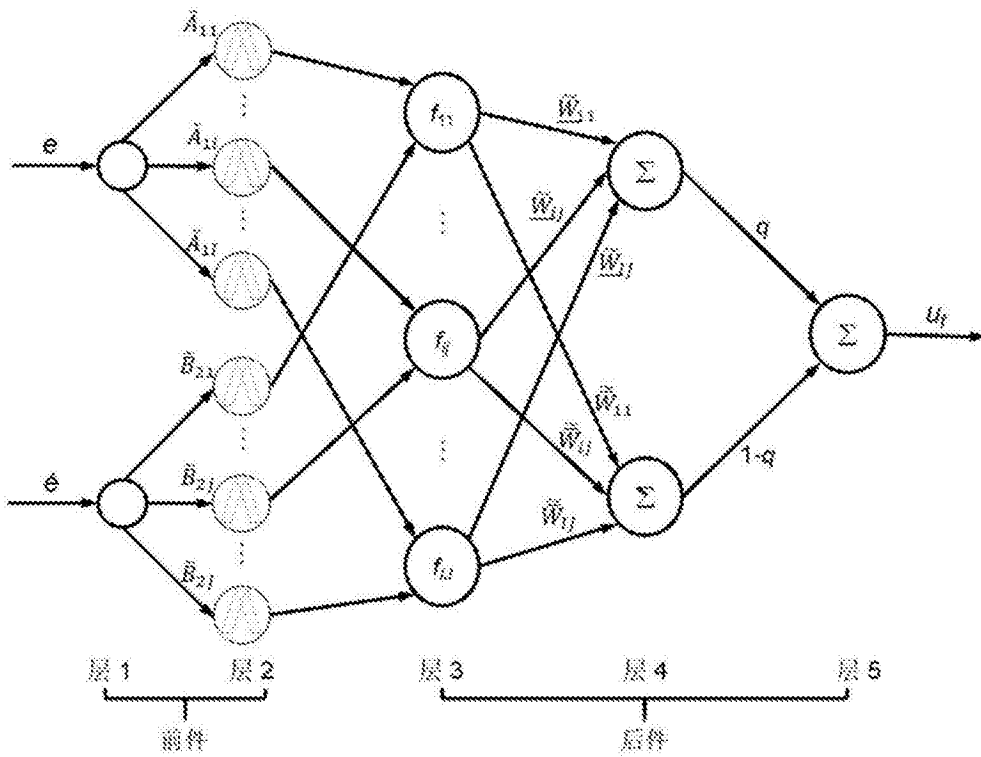


图2

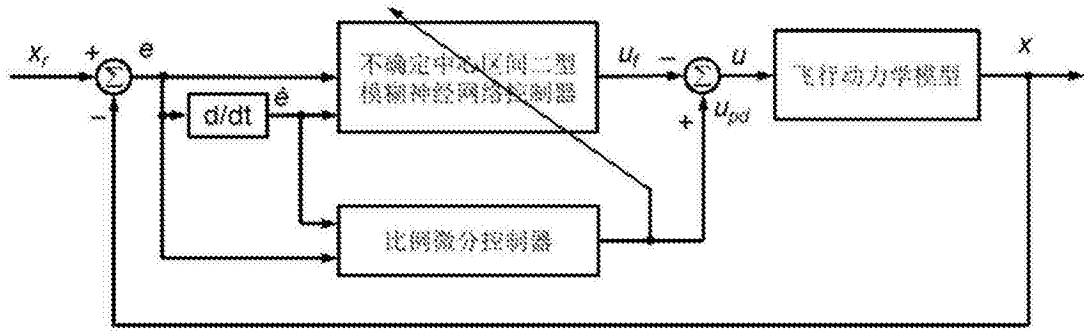


图3