

文章编号 1004-924X(2012)06-1334-08

## 四旋翼微型飞行器的区间二型模糊神经网络自适应控制

陈向坚<sup>1,2</sup>, 李迪<sup>1,2</sup>, 续志军<sup>1\*</sup>, 苏东风<sup>1</sup>

1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对四旋翼微型飞行器控制系统中存在不确定性、外界干扰等影响控制精度的问题,提出了基于区间二型模糊神经网络(IT\_IIFNN)的四旋翼微型飞行器自适应控制方案。首先,根据四旋翼微型飞行器的动力学模型,设计了基于IT\_IIFNN的四旋翼微型飞行器自适应控制器,该控制器由两部分构成,其中IT\_IIFNN用来在线逼近系统不确定性;鲁棒补偿器用来实时补偿IT\_IIFNN的逼近误差以及外界干扰。其次,利用Lyapunov稳定理论证明此飞行器控制系统闭环稳定性。最后,通过四旋翼微型飞行器样机来验证IT\_IIFNN自适应控制器的优越性。验证结果显示,在加入风速为1.5 m/s的外界干扰条件下,跟踪误差可近似达到 $10^{-2}$ 。结果表明,IT\_IIFNN自适应控制器具有良好的跟踪精度、稳定性及鲁棒性。

**关键词:**区间二型模糊神经网络(IT\_IIFNN);四旋翼微型飞行器;鲁棒补偿器;Lyapunov稳定理论;稳定性;鲁棒性  
**中图分类号:**V249.12;TP183 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1334

## Adaptive control of quadrotor MAV using interval type-II fuzzy neural network

CHEN Xiang-jian<sup>1,2</sup>, LI Di<sup>1,2</sup>, XU Zhi-jun<sup>1\*</sup>, SU Dong-feng<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)
- \* Corresponding author, E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The adaptive control scheme of a quadrotor Micro Aerial Vehicle (MAV) by using Interval Type-II Fuzzy Neural Network (IT\_IIFNN) was proposed to improve the control accuracy that was declined by the uncertainty, external disturbances, etc. Based on the quadrotor MAV dynamic modeling, an adaptive controller composing of two parts was designed by using the IT\_IIFNN, in which the IT\_IIFNN was developed to approximate the uncertainty function and a robust compensator was proposed to confront the approximate errors of IT\_IIFNN and external disturbances in real-time. Moreover, the Lyapunov stability theory was taken to prove the stability of the closed-loop control system in

收稿日期:2011-12-14;修订日期:2012-01-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905174);吉林省自然科学基金资助项目(No. 20101530)

the quadrotor MAV. Finally, the superiority of the adaptive controller was verified by a prototype of the quadrotor MAV, which is shown that the tracking error approximated is  $10^{-2}$  under the interference conditions of wind speed of 1.5 m/s. Experiments demonstrate that proposed control scheme can offer perfect tracking accuracy, stability and robustness.

**Key words:** Interval Type-II Fuzzy Neural Network (IT\_IIFNN); quadrotor Micro Aerial Vehicle (MAV); robust compensator; Lyapunov stability theory; stability; robustness

### 1 引言

模糊神经网络结合了模糊理论处理不确定的特性以及神经网络学习的能力,而且,能够逼近任意非线性和不确定性系统,因此,人们针对模糊神经网络进行大量研究来模拟复杂系统以及构建智能控制器等。Wu 提出了一种基于扩展径向基神经网络、在线自组织学习的广义动态模糊神经网络(GD-FNN)学习算法,其功能相当于 Takagi-Sugeno-Kang 模糊系统,该学习算法在开始时没有模糊规则,通过学习在线产生和修剪模糊规则<sup>[1-2]</sup>。Gao 利用 Wu 提出的这种广义动态模糊神经网络设计了机械手直接自适应运动控制方法<sup>[3]</sup>,仿真实验表明该控制方法具有较好的跟踪控制性能。Wang 研究了基于模糊神经网络的水下机器人自适应控制<sup>[4]</sup>,该控制方法要求离线训练水下机器人逆动力学模型。文献<sup>[5]</sup>设计了基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制方案,其采用了模糊神经网络在线学习机器人的逆模型。然而,所有的这些分析以及应用都是基于一型模糊神经网络。二型模糊集的概念是一型模糊集概念的扩展,是将模糊隶属函数值进行模糊化。与一型模糊逻辑系统类似,二型模糊逻辑系统包括模糊化,模糊规则,模糊推理机,输出处理器。

本文在前人研究的基础上,针对四旋翼微型飞行器<sup>[6-8]</sup>的欠驱动及非线性特性,以及四旋翼微型飞行器控制系统中存在不确定性、外界干扰等因素影响控制精度的问题,提出利用区间二型模糊神经网络(Interval type-II Fuzzy Neural Network, IT\_IIFNN)<sup>[9-12]</sup>在线逼近四旋翼微型飞行器模型中的不确定项,用于解决四旋翼微型飞行器的控制问题,以提高其控制系统的灵活性和鲁棒性。本文首先简要介绍区间二型模糊神经网络结构及学习方法,提出基于这种网络结构的四旋

翼微型飞行器直接自适应控制器;然后,基于 Lyapunov 理论对该控制系统的闭环稳定性进行分析;最后,将本文提出的控制方案输入到以 TMS320C32<sup>[13]</sup>为控制处理器的飞行控制系统中运行,从而验证了基于区间二型模糊神经网络四旋翼微型飞行器直接自适应控制的有效性。

### 2 区间二型模糊神经网络

区间二型高斯隶属函数由一型高斯隶属函数

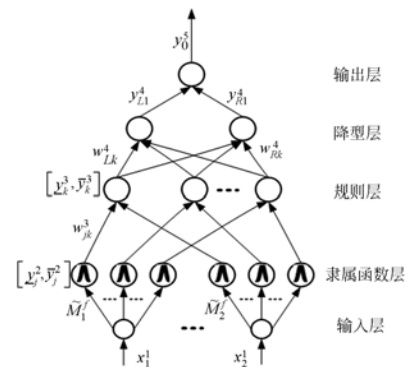


图 1 区间二型模糊神经网络结构图

Fig. 1 Structure of interval type-2 fuzzy neural networks

的不确定中心值与标准偏差值构成,带有不确定中心值 $[\underline{m}, \overline{m}]$ 和标准方差  $\sigma$ 的二型高斯隶属函数表示如下:

$$\lambda_{\overline{\lambda}}(x) = \exp \left\{ \frac{-(x - m)^2}{2\sigma^2} \right\}, m \in [\underline{m}, \overline{m}] .$$

区间二型模糊神经网络结构<sup>[9-12]</sup>如图 2 所示,if-then 规则可以表示为:

$$R_f: \text{if } x_1^1 \text{ is } \widetilde{M}_1^f, \text{ and } x_2^1 \text{ is } \widetilde{M}_2^f, \text{ then } y_1 \text{ is } [\omega_{k_f}^1, \omega_{l_f}^1], \tag{1}$$

其中,  $f=1, 2, \dots, n$  代表规则数;  $x_1^1, x_2^1$  分别代表区间二型模糊神经网络的输入;  $\widetilde{M}_1^f, \widetilde{M}_2^f$  分别代表前件的区间二型模糊集;  $[\omega_{k_f}^1, \omega_{l_f}^1]$  表示次隶属函数设置成集合时的重心,从后件的区间二型模糊集中获取,通常称为权区间;第一层为输入层,

第二层为模糊化层,第三层为规则层,第四层为降型层。

这里,IT\_IIFNN 参数的初始值都设置为 0,在运用 IT\_IIFNN 网络估计器对微型飞行器的不确定项进行在线估计的同时,下文中的 IT\_IIFNN 的参数自适应学习算法,即方程式(17)~(19)被用来进行在线调节。

### 3 基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制

#### 3.1 四旋翼微型飞行器建模

图 2 描述了惯性坐标系及机体坐标系下的四

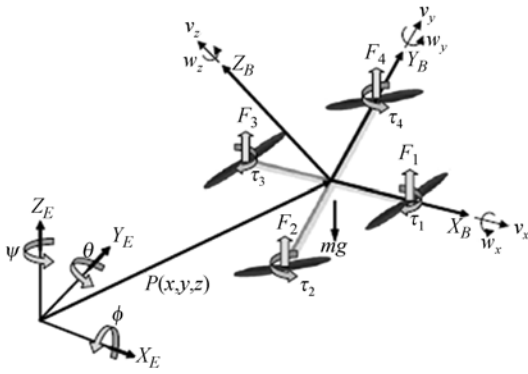


图 2 四旋翼微型飞行器的惯性坐标系及机体坐标系  
Fig.2 Coordinate systems of Quadrotor MAV

旋翼微型飞行器,其状态向量可描述如下:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= [\boldsymbol{\eta}^T, \boldsymbol{\eta}^T]^T; \boldsymbol{\eta}_1 = [x, y, z]^T; \boldsymbol{\eta}_2 = [\phi, \theta, \psi]^T; \\ \mathbf{v} &= [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T]^T; \mathbf{v}_1 = [v_x, v_y, v_z]^T; \mathbf{v}_2 = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T; \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $\boldsymbol{\eta}$  代表惯性坐标系下四旋翼微型飞行器的位置坐标及角度坐标;  $\mathbf{v}$  代表机体坐标系下四旋翼微型飞行器的线速度及角速度;  $x, y, z, \phi, \theta, \psi$  分别代表惯性坐标系下四旋翼微型飞行器的线位置坐标及滚转角,俯仰角,偏航角。惯性坐标系及机体坐标系下的转换矩阵定义如下:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_1) &= \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

上式中,  $c(\cdot), s(\cdot), t(\cdot)$  分别代表  $\cos(\cdot), \sin(\cdot), \tan(\cdot)$ 。为便于实现控制四旋翼微型飞行器,使用惯性坐标系下的动力学方程,其表示如下:

$$\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}), \quad (4)$$

其中有如下关系式:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}; \ddot{\boldsymbol{\eta}} = \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} + \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \dot{\mathbf{v}};$$

系统矩阵定义如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{M}}_\eta(\boldsymbol{\eta}), \\ \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \\ \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\tau} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{M}$  为非对角线元素为 0, 对角线元素不为零的六维矩阵,  $\mathbf{M}_\eta(\boldsymbol{\eta}), \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}), \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}), \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta})$  均为通过  $x, y, z, \phi, \theta, \psi$  6 个状态向量组成的六维方阵, 通过构造以上 4 个方阵来确定方程式(4), 即六维微型飞行器动态方程。

#### 3.2 控制器设计

假设四旋翼微型飞行器期望运动状态有界, 即:

$$\| [\boldsymbol{\eta}_d^T, \dot{\boldsymbol{\eta}}_d^T, \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d^T] \| \leq \boldsymbol{\eta}_B,$$

其中,  $\boldsymbol{\eta}_d$  为惯性坐标系下的期望位置向量;  $\dot{\boldsymbol{\eta}}_d$  为惯性坐标系下的期望速度向量;  $\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d$  为惯性坐标系下的期望加速度向量;  $\boldsymbol{\eta}_B$  为正常数。假若系统参数不变动, 无外界干扰的情况下, 四旋翼微型飞行器的动力学方程表示为:

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}} &= -\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) - \\ &\quad \mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{A}_n \dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{B}_n [\boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta})], \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{A}_n = -\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta}); \mathbf{B}_n = \mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta})$ 。

当考虑系统参数变动及外界干扰等因素时, 则上述方程可重写为:

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}} &= (\mathbf{A}_n + \Delta \mathbf{A}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + (\mathbf{B}_n + \Delta \mathbf{B}) [\boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{g}_\eta(\boldsymbol{\eta})] + \\ &\quad (\mathbf{C}_n + \Delta \mathbf{C}) [\boldsymbol{\tau}_d + f(\dot{\boldsymbol{\eta}})], \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{C}_n = -\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta})$ ;  $\Delta \mathbf{A}, \Delta \mathbf{B}, \Delta \mathbf{C}$  分别代表参数矩阵  $\mathbf{M}_\eta^{-1}(\boldsymbol{\eta}), \mathbf{C}_\eta(\mathbf{v}, \boldsymbol{\eta})$  引起的不确定性, 然而控制器设计的目的便是设计一款控制律, 使状态向量  $\boldsymbol{\eta}$  能够跟踪给定期望命令状态  $\boldsymbol{\eta}_m$ , 为了达到这个目标, 定义跟踪误差  $\mathbf{e}(t) = \boldsymbol{\eta}_m - \boldsymbol{\eta}$ ; 则误差函数

为  $\mathbf{E}(t) = \mathbf{e}(t) + \rho \dot{\mathbf{e}}(t)$ ; 对误差函数取导数得到:

$$\mathbf{B}_n \dot{\mathbf{E}}(t) = \mathbf{B}_n \mathbf{A}_n \mathbf{E}(t) - \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{H}, \quad (8)$$

其中,未知非线性函数  $\mathbf{H}$  为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_n \{ \Delta \mathbf{A} \dot{\boldsymbol{\eta}} + \Delta \mathbf{B} \boldsymbol{\tau}_\eta(\boldsymbol{\eta}) + (\mathbf{C}_n + \Delta \mathbf{C}) [\boldsymbol{\tau}_d + f(\dot{\boldsymbol{\eta}})] + [\ddot{\boldsymbol{\eta}}_m + \rho \dot{\mathbf{e}}(t)] \} - \mathbf{B}_n \mathbf{A}_n [\dot{\boldsymbol{\eta}}_m + \rho \mathbf{e}(t)], \quad (9)$$

从式(9)可见,  $\mathbf{H}$  不仅是非线性函数,而且也是时变函数,由于  $\mathbf{H}$  在实际应用之前是很难定量的,所以这里采用 IT\_IIFNN 来在线估计  $\mathbf{H}$ ,且考虑由 IT\_IIFNN 估计的  $\hat{\mathbf{H}}$  与实际的  $\mathbf{H}$  有一定的误差,进而采用鲁棒补偿器  $\boldsymbol{\tau}_r$  来降低 IT\_IIFNN 估计误差的同时增强外界干扰的鲁棒性。因此控制律可定义如下:

$$\boldsymbol{\tau}_\eta(t, \boldsymbol{\eta}) = \mathbf{K}_c \mathbf{E}(t) + \hat{\mathbf{H}} + \boldsymbol{\tau}_r. \quad (10)$$

应用控制律(8)与(10),则闭环动力学误差方程表示如下:

$$\mathbf{B}_n \dot{\mathbf{E}}(t) = (\mathbf{B}_n \mathbf{A}_n - \mathbf{K}_c) \mathbf{E}(t) + \tilde{\mathbf{H}} + \boldsymbol{\tau}_r, \quad (11)$$

其中,逼近误差  $\tilde{\mathbf{H}}$  表示如下:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}}$$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{2} [\mathbf{W}^{*T} \mathbf{Y}(x^1, m^*, \sigma^*) - \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{Y}(x^1, \hat{m}, \hat{\sigma})] + \boldsymbol{\varepsilon}_H. \quad (12)$$

令  $\mathbf{Y}^* = \mathbf{Y}(x^1, m^*, \sigma^*)$ ;  $\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}(x^1, \hat{m}, \hat{\sigma})$ , 则方程式(12)可重写为:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \frac{1}{2} \mathbf{W}^{*T} \tilde{\mathbf{Y}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T \hat{\mathbf{Y}} + \boldsymbol{\varepsilon}_H, \quad (13)$$

其中:  $\tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{W}^* - \hat{\mathbf{W}}$ ;  $\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}^* - \hat{\mathbf{Y}}$ ; 为了能够在线更新 IT\_IIFNN 的网络权值,使其输出能够准确地逼近  $\mathbf{H}$ ,这里使用线性化技术将 IT\_IIFNN 的输出进行部分线性化处理以便于应用 Lyapunov 扩展理论,则  $\tilde{\mathbf{Y}}$  以泰勒展开式扩展得到:

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Y}}_R \\ \tilde{\mathbf{Y}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{Y}_R}{\partial m} \\ \frac{\partial \mathbf{Y}_L}{\partial m} \end{bmatrix} \Big|_{m=\hat{m}} (m^* - \hat{m}) + \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{Y}_R}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial \mathbf{Y}_L}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \Big|_{\sigma=\hat{\sigma}} (\sigma^* - \hat{\sigma}) + \mathbf{N}, \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y}_m^T \tilde{m} + \mathbf{Y}_\sigma^T \tilde{\sigma}$$

将方程式(14)带入到方程式(13)中,得到:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}} &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{Y}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T \hat{\mathbf{Y}} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}} \hat{\mathbf{Y}} + \boldsymbol{\varepsilon}_H = \\ &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_m^T \hat{m} - \mathbf{Y}_\sigma^T \hat{\sigma}) + \\ &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T (\mathbf{Y}_m^T \tilde{m} + \mathbf{Y}_\sigma^T \tilde{\sigma}) + \mathbf{T}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{T}$  为集中不确定性,可定义为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= 1/2 \mathbf{W}^{*T} (\mathbf{Y}_m^T m^* + \mathbf{Y}_\sigma^T \sigma^* + \mathbf{N}) - \\ &= 1/2 \hat{\mathbf{W}}^T (\mathbf{Y}_m^T m^* + \mathbf{Y}_\sigma^T \sigma^*) + \boldsymbol{\varepsilon}_H. \end{aligned}$$

将上式带入到方程式(11)中,可得到闭环系统动力学方程表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_n \dot{\mathbf{E}}(t) &= (\mathbf{B}_n \mathbf{A}_n - \mathbf{K}_c) \mathbf{E}(t) + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_m^T \hat{m} - \\ &= \mathbf{Y}_\sigma^T \hat{\sigma}) + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{W}}^T (\mathbf{Y}_m^T \tilde{m} + \mathbf{Y}_\sigma^T \tilde{\sigma}) + \mathbf{T} - \boldsymbol{\tau}_r. \end{aligned} \quad (16)$$

图 3 为基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制系统原理图,从图中可以看出,该控制器由 IT\_IIFNN 逼近器及鲁棒补偿器  $\boldsymbol{\tau}_r$  构成。

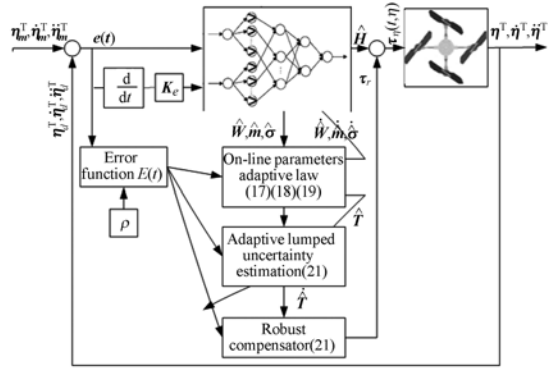


图 3 基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制系统原理图

Fig. 3 Principle scheme of adaptive control system of quadrotor MAV based on IT\_IIFNN

### 3.3 稳定性分析

定理:如果四旋翼微型飞行器控制系统采用控制律(10),IT\_IIFNN 网络估计器的在线自适应学习算法(17)~(19),以及估计集中不确定性(21)的鲁棒补偿器(20),那么,基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制系统一定稳定。

$$\dot{\mathbf{W}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_1 (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}_m^T \hat{m} - \mathbf{Y}_\sigma^T \hat{\sigma}) \mathbf{E}(t), \quad (17)$$

$$\dot{\hat{m}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_2 \hat{\mathbf{W}} \mathbf{Y}_m \mathbf{E}(t), \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\sigma}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}_3 \hat{\mathbf{W}} \mathbf{Y}_\sigma \mathbf{E}(t), \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\tau}_r = \hat{\mathbf{T}}(t), \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{T}}}(t) = \boldsymbol{\eta}_4 \mathbf{E}(t), \quad (21)$$

证明:满足假设条件,为了使最终趋向于零,并得出  $\mathbf{W}, m, \sigma, \mathbf{T}$  的自适应律,则定义 Lyapunov 函数为:

$$V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t)) = \frac{B_n}{2} E^2(t) + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{1}{2\eta_2} \tilde{m}^T \tilde{m} + \frac{1}{2\eta_3} \tilde{\sigma}^T \tilde{\sigma} + \frac{1}{2\eta_4} \tilde{T}^2(t), \quad (22)$$

其中,估计误差  $\tilde{T}(T) = T - \hat{T}(t)$ ,将方程式(22)进行差分运算,同时调用闭环动力学方程(16)及鲁棒补偿器(20),则可得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= B_n E(t) \dot{E}(t) - \frac{1}{\eta_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{m}^T \dot{\tilde{m}} + \frac{1}{\eta_3} \tilde{\sigma}^T \dot{\tilde{\sigma}} + \frac{1}{\eta_4} \tilde{T}(t) \dot{\tilde{T}}(t) \\ \dot{V}_L &= E(t) \{ (B_n A_n - K_e) E(t) + \frac{1}{2} \tilde{W}^T (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) + \frac{1}{2} \hat{W}^T (Y_m^T \tilde{m} + Y_\sigma^T \tilde{\sigma}) \} - \frac{1}{\eta_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\eta_2} \tilde{m}^T \dot{\tilde{m}} + \frac{1}{\eta_3} \tilde{\sigma}^T \dot{\tilde{\sigma}} + \frac{1}{\eta_4} \tilde{T}(T) \dot{\tilde{T}}(t), \quad (23) \end{aligned}$$

如果将 IT\_IIFNN 网络估计器的在线自适应学习算法(17)~(19),以及估计集中不确定性(21)的鲁棒补偿器(20)带入方程式(23)可得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= E(t) \{ (B_n A_n - K_e) E(t) + \frac{1}{2} \tilde{W}^T (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) + \frac{1}{2} \hat{W}^T (Y_m^T \tilde{m} + Y_\sigma^T \tilde{\sigma}) \} - \frac{1}{2} \tilde{W}_m^T (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) E(t) - \frac{1}{2} \tilde{m} \hat{W} Y_m^T E(t) - \frac{1}{2} \tilde{\sigma} \hat{W} Y_\sigma^T E(t) - \tilde{T}(t) E(t) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(t)W(B_n A_n - K_e) E(t) + E(t)(T - \tau_r) - \tilde{T}(t) E(t) &= \\ E(t)(B_n A_n - K_e) E(t) + E(t)(T - \hat{T}(t)) - \tilde{T}(t) E(t) &= \\ E(t)(B_n A_n - K_e) E(t) + E(t)\tilde{T}(t) - E(t)\tilde{T}(t) &= \\ E(t)(B_n A_n - K_e) E(t) \leq 0, \quad (24) \end{aligned}$$

由于  $V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t)) \leq 0$ ,即  $V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t)) \leq V_L(E(0), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(0))$ ,则说明 IT\_IIFNN 网络参数  $E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(T)$  都是有界收敛的,定义函数  $L_a(t)$  并对其取函数时间  $t$  积分得到:

$$\begin{aligned} L_a &= -E(t)(B_n A_n - K_e) E(t) = \\ &= -\dot{V}_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t)) \int_0^t L_a(\gamma) d\gamma = \\ &= V_L(E(0), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(0)) - \\ &= V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t)), \quad (25) \end{aligned}$$

由于  $V_L(E(0), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(0))$  是有界的,同时  $V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \tilde{T}(t))$  是有界非递增函数,所以得到如下结论:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t L_a(\gamma) d\gamma < \infty. \quad (26)$$

而且,  $\dot{L}_a(t)$  是有界  $\lim_{t \rightarrow \infty} L_a(t) = 0$  的,这说明当时间趋于无穷大时,误差也趋近于 0。因此,保证了基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制系统的稳定性。

### 4 实验分析

将基于 IT\_IIFNN 的四旋翼微型飞行器自适应控制方案用 C 语言并下载到飞行控制芯片中,这里采用的飞行控制计算机选用 TI 的 TMS320F28335 DSP<sup>[13]</sup>,为了验证控制方案的可行性、实时性以及鲁棒性,这里进行了一系列实验。实验可以分为三部分:第一部分是无外界干扰的情况下,测试采用基于 IT\_IIFNN 逼近不确定项的四旋翼微型飞行器自适应控制器的轨迹跟踪能力;第二部分是通过加入风扰动情况下测试采用基于 IT\_IIFNN 逼近不确定项的四旋翼微型飞行器自适应控制器的鲁棒性;第三部分将采用基于 IT\_IIFNN 逼近不确定项的四旋翼微型飞行器自适应控制器同一型模糊神经网络(Type I Fuzzy Neural Network, T\_IFNN)进行比较,验证 IT\_IIFNN 的优越性。

#### 4.1 无扰动情况下的实验结果

图 5 显示无外界干扰情况下,四旋翼微型飞行器轨迹跟踪的整个运动过程。开始时将参考轨迹输入控制系统,然后从监控平台观察四旋翼微型飞行器轨迹跟踪情况,轨迹选择在给定 40 s 时间内,从初始位置(0,0,0)到达终点位置(20,5,10),在 MAV 飞行的初始时刻,其姿态角可设为 0°,即  $\theta_0 = 0, \phi_0 = 0, \psi_0 = 0$ ,同时保持俯仰角不发生变化;

图 4 给出了轨迹跟踪过程中,应用 IT\_IIFNN 估计器来逼近不确定项 H 所产生的模糊

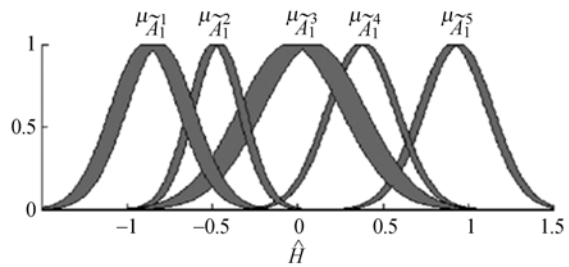


图 4 估计过程中产生的隶属函数

Fig.4 MFs of IT-IIFNN during the identification process

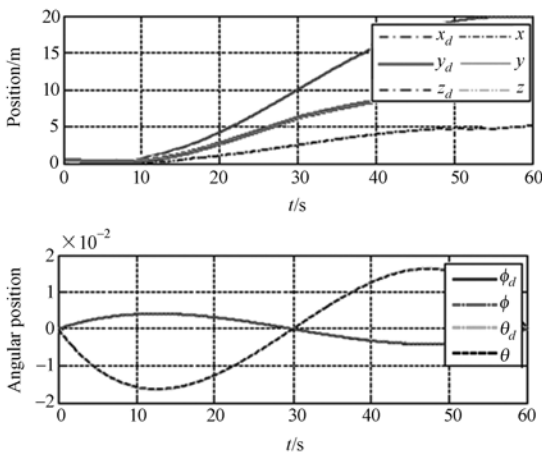


图 5 无干扰条件下,位置及姿态角跟踪曲线

Fig. 5 Tracking responses of positions and angles without external disturbance

隶属函数。

从图 4 中显然可见,采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制器的轨迹能够紧密地跟踪期望的轨迹。

### 4.2 扰动存在情况下的实验结果

图 6 显示外界干扰存在情况下,四旋翼微型飞行器轨迹跟踪的误差情况。轨迹跟踪实验所用控制参数及理想轨迹与上节的设置相同。此外,这里的扰动加入方式是在试飞实验室加入风速为 1.5 m/s 的正北风。图 6 代表外界干扰存在情况下,四旋翼微型飞行器的位置跟踪误差和姿态角跟踪误差。

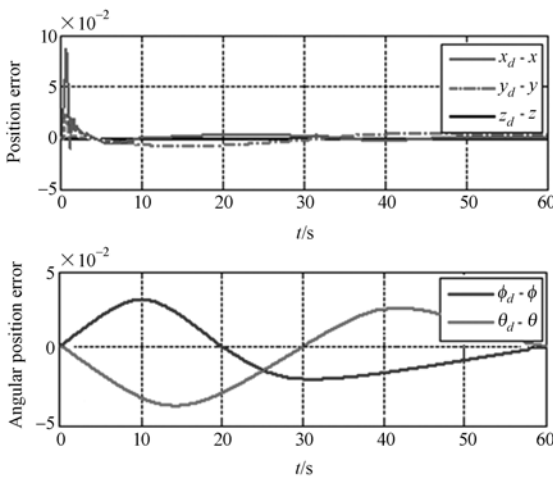


图 6 干扰条件下,位置及姿态角跟踪误差

Fig. 6 Tracking errors of position and angles under external disturbance

从图中得到的结果显示,即使有外界扰动,采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制器也能够减小轨迹误差到较低的水平,其跟踪误差近似约为  $10^{-2}$ ,即对外界干扰有抑制能力。

### 4.3 IT\_IIFNN 与 T\_IFNN 对比的实验结果

图 7 显示了采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制器与采用文献[14]控制器的实验结果对比情况,为清晰对比两种控制器的性能,这里分析四旋翼微型飞行器悬停控制。采用采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制器的响应曲线用 n 描述,采用文献[14]控制器的响应曲线用 o 描述。

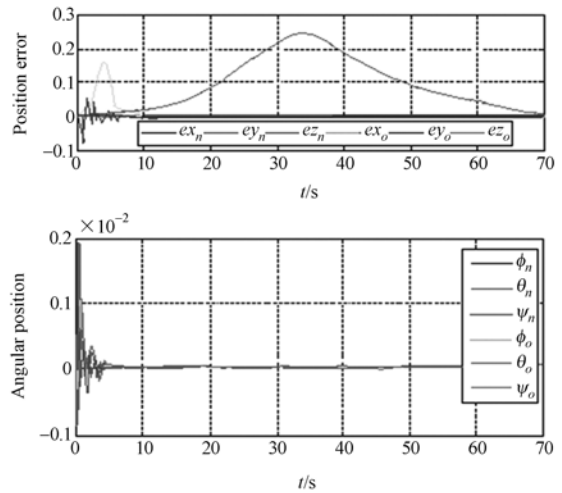


图 7 位置及姿态角响应误差结果对比

Fig. 7 Comparison results: position and angular errors

从误差响应曲线对比结果可看出,采用本文的控制器得到的跟踪轨迹相对于 T\_IFNN 控制器更精确,位置跟踪轨迹误差幅值小,且姿态角稳定也很快。

## 5 结 论

本文研究了采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制问题。根据四旋翼微型飞行器的动力学模型,提出了采用基于 IT\_IIFNN 逼近器的四旋翼微型飞行器自适应控制器。利用 Lyapunov 稳定理论证明了 IT\_IIFNN 自适应控制系统的稳定性。实验验证了这种控制策略在风速为 1.5 m/s 的外界干扰条件下,仍能够获得很好的跟踪效果,随着时间推移,能够有效地

降低干扰对四旋翼微型飞行器运动的影响,其跟踪

误差可近似接近于  $10^{-2}$ ,具有较强的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] WU S Q, ER M J. Dynamic fuzzy neural networks-a novel approach to function approximation [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2000,30(2):358-364.
- [2] WU S Q, ER M J, GAO Y. A fast approach for automatic generation of fuzzy rules by generalized dynamic fuzzy neural networks [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2001,19(4):578-594.
- [3] GAO Y, ER M J, YANG S. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy neural networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001,48(6):1274-1278.
- [4] WANG J S, LEE C S G. Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004,19(2):283-295.
- [5] 孙强,程明. 基于模糊神经网络的双凸极永磁电机非线性建模[J]. *控制理论与应用*, 2007,27(4):601-605.
- SUN Q, CHENG M. Nonlinear modeling for doubly salient permanent magnetic motor based on fuzzy neural network [J]. *Control Theory & Applications*, 2007,27(4):601-605. (in Chinese)
- [6] JINHYUN. Accurate modeling and robust hovering control for a Quad-rotor VTOL aircraft [J]. *Intelligent Robot System*, 2004,57:9-26.
- [7] TAYEBI A, MCGILVRAY S. Attitude stabilization of a VIOL quadrotor aircraft [J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2006,14:562-571.
- [8] DAEWON L, JIN KIM H, SHANKAR S. Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2009, 3:418-428.
- [9] WANG C H, CHENG C S, LEE T T. Dynamical optimal training for interval type-2 fuzzy neural network (T2FNN) [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2004,34(3):1462-1477.
- [10] 李迪,陈向坚,续志军,等. 自组织递归区间二型模糊神经网络在动态时变系统辨识中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6):1406-1412.
- LI D, CHEN X J, XU ZH J, *et al.*. Type-II fuzzy neural network with self-organizing recurrent intervals for dynamic time-varying system identification[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(6):1406-1412. (in chinese)
- [11] 陈向坚,李迪,白越,等. 模糊神经网络在自适应双轴运动控制系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011,19(7):1644-1650.
- CHEN X J, LI D, BAI Y, *et al.*. Application of type-II fuzzy neural network to adaptive double axis motion control system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(7):1644-1650. (in Chinese)
- [12] FAA J L, PO H C, PO H S, *et al.*. Robust control of an LUSM-based x-y-tha motion control stage using an adaptive interval type-2 fuzzy neural network [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009,1(17):24-38.
- [13] 季宏丽,裘进浩. 基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制[J]. *光学精密工程*, 2009,17(1):126-131.
- JI H L, QIU J H. Semi-active control for structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):126-131. (in Chinese)
- [14] 于凤仙,连华,张力军. 模糊神经网络控制器在飞行器姿态控制中的应用[J]. *航天控制*, 1999,1:43-49.
- YU F X, LIAN H, ZHAGN L J. The application of the fuzzy neural network controller for the flighter pose control[J]. *Aeronautics Control*, 1999(1):43-49. (in Chinese)

## 作者简介:



陈向坚(1983—),女,吉林人,博士研究生,2006年、2009年在东北电力大学获得学士、硕士学位,主要从事微型飞行器自动控制、智能控制方面的研究。E-mail: cxj831209@163.com



李迪(1982—),男,吉林白山人,博士研究生,2005年、2009年在东北电力大学获得学士、硕士学位,主要从事嵌入式系统、微型飞行器的图像传输与自动控制方面的研究。E-mail: li-di19821111@163.com



苏东风(1978—),男,河南睢县人,博士研究生,2000年于西南交通大学获得学士学位,2006年于吉林大学获得硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空相机光机结构与光电传感技术的研究。E-mail: cc\_sdf@126.com

## 通讯作者:



续志军(1953—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事电子技术、自动控制方面的研究。E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn

## ●下期预告

## 纯金膜表面等离子增强的旋光效应

熊尚<sup>1,4</sup>,罗雪丰<sup>2</sup>,韩立<sup>3</sup>

- (1. 中国科学院半导体研究所,北京 100083; 2. 中航工业 602 所,江西 景德镇 333001;  
3. 中国科学院电工研究所,北京 100190; 4. 中国科学院研究生院,北京 100039)

在表面等离子增强磁光克尔效应的研究中,棱镜耦合型 Kretschmann 配置模式是常用的表面等离子共振激发结构。为了研究棱镜的磁光特性对系统光学响应的影响,测试了单个 BK7 棱镜在全内反射条件下的旋光角度谱以及 BK7 棱镜与金膜组合构成 Kretschmann 配置结构的旋光角度谱,并根据传统光学理论分析了光谱的成因。理论分析结果表明:在单个 BK7 棱镜构成的全内反射结构中,棱镜底部对 P 波和 S 波反射的差异是导致系统进入全内反射临界角之前产生较强旋光效应的主要原因。在 BK7 棱镜与金膜组合构成的 Kretschmann 结构中,棱镜的磁光特性使得光波到达金膜表面之前产生了较小的 S 光分量,金膜表面等离子共振激发削弱了 P 光振幅,两种因素结合产生了一种新的表面等离子共振增强磁光效应的物理机制。实验结果表明:Kretschmann 模式下 26 nm 厚度金膜表面旋光角最大为  $1.7^\circ$ ,克服了传统磁光克尔效应响应较弱的缺点。