基于自结构动态递归模糊神经网络的无人机姿态控制 *

陈向坚, 白 越, 续志军, 李 迪
(中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 针对无人机非线性、强耦合等特点,提出了基于该自结构动态递归模糊神经网络的姿态控制系统,给出了基于 Lyapunov 函数的系统稳定性证明。对四层模糊神经网络进行了优化和改进,设计了自结构动态递归模糊神经网络,该网络可以根据系统状态在线更新权值、创建/删除节点、优化网络结构。仿真表明:该控制方法的突出优点是,在兼顾考虑了系统中的不确定性因素、非线性因素及外部干扰并存的情况下,保证系统的稳定性和跟踪性能;同时此网络结构比固定结构的模糊神经网络响应速度快,因此更具优越性。

关键词: 自结构动态递归模糊神经网络; 优化网络结构; 响应速度快
中图分类号: TP18; TP391 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2011)09-3387-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.052

Motion control for unmanned aircraft vehicle based on self-structuring recurrent fuzzy neural network

CHEN Xiang-jian, BAI Yue, XU Zhi-jun, LI Di
(*Changchun Institute of Optics Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

Abstract: This paper designed motion control system of micro aircraft vehicle based on self-organizing dynamic recurrent fuzzy neural network, and proved the stability of the motion control system based on Lyapunov function. It proposed a new self-organizing dynamic recurrent fuzzy neural network based on the fuzzy neural networks with four layers, the weights and nodes of the proposed network could be updated online for network structure optimization. Simulation results demonstrate that the proposed control scheme can effectively improve stability and tracking performance with strong uncertainty, nonlinear and extern disturbance. Compared with fixed structured fuzzy neural network, the proposed self-organizing dynamic recurrent fuzzy neural network has advantages in estimation speed.

Key words: self-organizing recurrent fuzzy neural network; optimization of network structure; fast response

0 引言

众所周知,由于无人机的强耦合和动力学方程的高度非线性,其控制[1,2]问题一直吸引着众多控制界学者和专家的关注。近年来,自适应模糊网络[36]、模糊神经网络方法开始被引入模糊控制器的设计,使模糊控制器的参数和规则能在线地被调整以适应情况的变化。递归神经网络能够很好地反映动态映射关系,并且能够存储网络的内部信息用于训练网络的权值。由于递归神经网络能够反映动态映射关系,它在处理参数漂移、强干扰、非线性、不确定性等问题时表现出了优异的性能。

随着无人机姿态控制精度的提高,递归神经网络体现出缺乏有效的构造方法来选择网络结构和确定神经元的参数。递归模糊神经网络[7,8]是一种改进的递归神经网络,它不仅可以很好地反映动态映射关系,还具有定性知识表达的能力。但是这类递归模糊神经网络控制器结构是固定不变的,于是有可能造成如下问题:不利于模糊控制规则的增减,有可能造成模糊规则的冗余或欠缺,影响控制量计算速度或控制精度。

鉴于以上问题,本文提出了自结构动态递归模糊神经网络[9,10]控制器。该控制器由神经控制器和补偿控制器组成,通过自结构动态递归模糊神经网络的结构及参数学习,在线调整模糊神经网络的结构、增减模糊控制规则、调整控制规则参数以改善控制性能。

1 自结构动态递归模糊神经网络

1.1 动态递归模糊神经网络

动态递归模糊神经网络结构如图 1 所示,网络由输入层、模糊化层、规则层、输出层组成。

第一层为输入层,该层的节点直接与输入量 x 连接,起着将输入值传送到下一层的作用,且每个输入的论域为[-1,1]。

第二层为模糊化层,每个节点代表一个语言变量值,其作用是计算输入量属于各语言变量值模糊集合的隶属度函数。

$$\mu_{ij}^2 = \exp[x_i^2 - m_{ij} - r_{ij} \cdot y_{ip}^3/(\sigma_{ij})^2] \tag{1}$$

其中:x_i^2 代表第二层第 i 节点的输入;m_{ij}、σ_{ij} 分别代表基隶属函数的中心和宽度;r_{ij} 代表模糊规则的反馈增益;y_{ij}^2、y_{ij}^3 分别代

收稿日期: 2011-01-05; **修回日期**: 2011-03-11 **基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(50905174)

作者简介:陈向坚(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为微型飞行器的智能控制(cxj831209@163.com);白越(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为微小型飞行器动力学及控制;续志军(1953-),男,研究员,博导,主要研究方向为电气自动化及智能控制;李迪(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为微型飞行器的数据传输及图像处理.

表第 i 节点当前时刻与前一时刻的输出。这里针对无人机姿态控制系统而言，对应每个输入预先设定三个模糊语言集合 $\{N,Z,P\}=\{$“负”，“零”，“正”$\}$，选择输入隶属度函数为高斯基函数，则 $\{N,Z,P\}$ 与对应的中心值初始值分别为 $\{-1,0,+1\}$，宽度初始值为 $\{0.5,0.5,0.5\}$。

第三层为规则层，每个节点代表一条模糊规则，起作用是匹配模糊规则的前进，计算出每条规则的激活度，由于在网络结构中引入递归层，第三层的输出反馈到第二层，使得网络具有短期记忆功能。由此可知，网络在 k 时刻每条规则的激活度不仅包括由当前输入计算得出的激活度值，而且包括前一时刻各个激活度值的贡献，因此加强了网络辨识的准确性，从而使静态网络具有了动态特性。

第四层为输出层，实现清晰化计算，即

$$y_j^4=\sum_k w_{jk}^4 x_k^4$$

其中：w_{jk}^4 为网络的权值，表示姿态角之间的耦合。

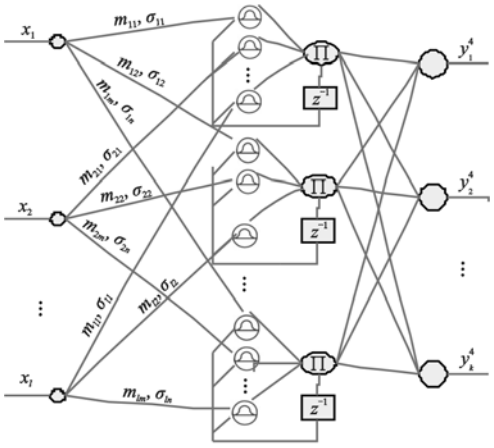


图1　自结构动态递归模糊神经网络结构

1.2　自结构学习算法

传统的模糊神经网络往往由于网络节点和规则固定，难以在规则数量和期望的网络逼近性能上得到均衡。为了解决这个问题，本文提出了动态递归模糊神经网络的自结构学习算法，实现网络节点的在线增补和删除，优化网络设计，提高网络结构的有效性。网络结构在线调节的主要步骤如下：

a）创建节点。取 $\beta_k=y_k^3$，$\beta_{\max}=\max\limits_{1<k<n}\beta_k$，$\beta_{\text{th}}\in(0,1)$ 为取定的阈值。在线计算过程中，如果 $\beta_{\max}\leqslant\beta_{\text{th}}$，则增加规则节点，对于动力学方程复杂的系统，设计更多的模糊规则，可取较大的 β_{th}。

b）调整节点。尽管增加节点可以有效地包含输入空间的系统信息，然而不适当的规则增加了整个网络的计算量，所以应删除不适度的节点以便优化网络结构。设置第 k 节点规则影响因子为

$$I_k(N+1)=I_k\exp\{\tau\cdot u_s(\rho,\beta_k)\}$$
$$u_s=\begin{cases}1 & \rho\geqslant\beta_k\\ 0 & \rho<\beta_k\end{cases}\tag{2}$$

I_{th} 为预先设定的删除模糊规则的阈值，可设置初始值为 1。

2　无人机姿态控制系统

无人机姿态控制问题是研究如何从已获得的夹杂有噪声的敏感期测值来确定无人机相对于某个基准的姿态参数的方法，以及使无人机由一个姿态过渡到另一个姿态的再定向过程，并且使其姿态保持在给定方向上。无人机的姿态角 θ、ψ、ϕ 分别表示无人机的俯仰角、偏航角和滚转角，通过设计姿态控制器使得无人机在不确定性因素、参数摄动及外部干扰并存的情况下，保证系统的稳定性和跟踪性能。

图 2 所示为基于自结构动态递归模糊神经网络的无人机姿态控制系统，θ_0、ψ_0、ϕ_0 为无人机期望姿态角，θ_1、ψ_1、ϕ_1 为无人机的实测姿态角，e_1、e_2、e_3 为三个姿态角的位置误差，$\dot{e}_1$、$\dot{e}_2$、$\dot{e}_3$ 为位置误差的变化率。

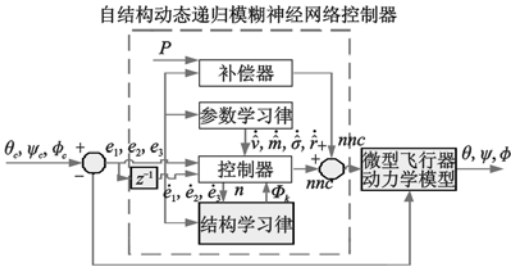


图2　无人机姿态控制系统

3　稳定性分析

已知姿态角的估计偏差为

$$\dot{E}=\Lambda E+a(w^{\mathrm{T}}\hat{\Phi}+m^{\mathrm{T}}A\hat{w}+\sigma^{\mathrm{T}}B\hat{w}+r^{\mathrm{T}}C\hat{w})+\varepsilon-nnc$$

其中：nnc 为采用动态递归模糊神经网络控制器的输出量，E、$\dot{E}$ 分别表示姿态角的误差及误差变化率。

$$\begin{cases}\Phi=[x_1^4,x_2^4,\cdots,x_n^4]^{\mathrm{T}}\\ r=[r_{11}\cdots r_{l1}r_{12}\cdots r_{l2}r_{1n}\cdots r_{ln}]^{\mathrm{T}}\\ w=[w_{11}\cdots w_{l1}w_{12}\cdots w_{l2}w_{1n}\cdots w_{ln}]^{\mathrm{T}}\\ \sigma=[\sigma_{11}\cdots\sigma_{l1}\sigma_{12}\cdots\sigma_{l2}\sigma_{1n}\cdots\sigma_{ln}]^{\mathrm{T}}\\ m=[m_{11}\cdots m_{l1}m_{12}\cdots m_{l2}m_{1n}\cdots m_{ln}]^{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{3}$$

为了减小边界误差估计的计算量，这里采用自适应边界估计，定义 Lyapunov 函数：

$$V(w,m,\sigma,r,\Omega)=\frac{1}{2}E^{\mathrm{T}}QE+\left(\frac{w^{\mathrm{T}}w}{2\eta_w}+\frac{m^{\mathrm{T}}m}{2\eta_m}+\frac{\sigma^{\mathrm{T}}\sigma}{2\eta_\sigma}+\frac{r^{\mathrm{T}}r}{2\eta_r}+\frac{\Omega^2}{2\eta_\Omega}\right)\tag{4}$$

其中：$\Omega=\Omega-\hat{\Omega}$ 表示优化差值边界与估计差值边界的差异；η_w、η_r、η_σ、η_m、η_Ω 分别表示各变量的学习速率；Q 为正定矩阵，且满足 $\Lambda^{\mathrm{T}}Q+Q\Lambda=I$。对式(4)取微分得

$$\begin{aligned}\dot{V}=&\frac{1}{2}E^{\mathrm{T}}Q\dot{E}+\frac{1}{2}\dot{E}^{\mathrm{T}}QE+\left(\frac{w^{\mathrm{T}}w}{\eta_w}+\frac{m^{\mathrm{T}}m}{\eta_m}+\frac{\sigma^{\mathrm{T}}\sigma}{\eta_\sigma}+\frac{r^{\mathrm{T}}r}{\eta_r}+\frac{\Omega\dot{\Omega}}{\eta_\Omega}\right)=\\&-\frac{1}{2}E^{\mathrm{T}}IE+w^{\mathrm{T}}\left(E^{\mathrm{T}}Qb\hat{\Phi}-\frac{\dot{\hat{w}}}{\eta_w}\right)+m^{\mathrm{T}}\left(E^{\mathrm{T}}QbA\hat{w}-\frac{\dot{\hat{m}}}{\eta_m}\right)+\\&\sigma^{\mathrm{T}}\left(E^{\mathrm{T}}QbB\hat{w}-\frac{\dot{\hat{\sigma}}}{\eta_\sigma}\right)+r^{\mathrm{T}}\left(E^{\mathrm{T}}QbC\hat{w}-\frac{\dot{\hat{r}}}{\eta_r}\right)+E^{\mathrm{T}}Qb(\varepsilon-nnc)-\frac{\Omega\dot{\Omega}}{\eta_\Omega}\end{aligned}\tag{5}$$

为达到 $\dot{V}\leqslant0$，学习律可以取：

$$\dot{\hat{w}}=\eta_w E^{\mathrm{T}}Qb\hat{\Phi},\ \dot{\hat{m}}=\eta_m E^{\mathrm{T}}QbA\hat{w}$$
$$\dot{\hat{\sigma}}=\eta_\sigma E^{\mathrm{T}}QbB\hat{w},\ \dot{\hat{r}}=\eta_r E^{\mathrm{T}}QbC\hat{w}\tag{6}$$

取神经网络控制器的补偿控制器以及边界估计律分别为

$$ncc=\hat{\Omega}\,\mathrm{sgn}(E^{\mathrm{T}}Qb),\ \dot{\hat{\Omega}}=\eta_\Omega|E^{\mathrm{T}}Qb|\tag{7}$$

这时，$\dot{V}$ 可以改写为如下表达式：

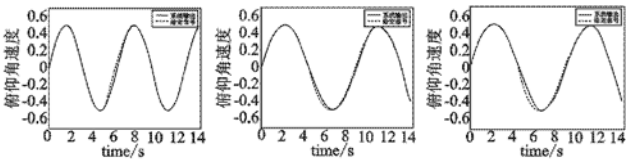
$$\begin{aligned}\dot{V}=&\frac{1}{2}E^{\mathrm{T}}IE+\varepsilon E^{\mathrm{T}}Qb-\hat{\Omega}|E^{\mathrm{T}}Qb|-(\Omega-\hat{\Omega})|E^{\mathrm{T}}Qb|\leqslant\\&-\frac{1}{2}E^{\mathrm{T}}IE-(\Omega-|\varepsilon|)|E^{\mathrm{T}}Qb|\leqslant0\end{aligned}\tag{8}$$

当 $E \to 0, t \to \infty$ 时,系统是稳定的,此系统稳定性证毕。

4　仿真实验

为了验证采用自结构动态递归模糊神经网络的无人机姿态控制系统的跟踪性能,且比固定结构的模糊神经网络响应速度快,在实验过程中作了对比。实验对比过程如下:

检验自结构动态递归模糊神经网络控制器抑制不确定因素、非线性及外部干扰的能力,控制器取指令信号为 $\eta_w = \eta_r = \eta_\sigma = \eta_m = \eta_\Omega = 1, r(t) = 0.5\sin(\pi t)$。为了证明此控制器相对于经典 PID 控制器以及一般固定结构模糊神经网络的优越性。系统进入稳态后 1 s 处在控制端加入阶跃干扰信号,在同一条件下对三种控制方案进行仿真。图 3(a)为使用经典 PID 控制器的系统跟踪曲线;(b)使用固定结构模糊神经网络姿态跟踪曲线;(c)使用自结构动态递归模糊神经网络控制器的系统跟踪曲线。



(a)经典PID姿态跟踪曲线　(b)固定结构模糊神经网络姿态跟踪曲线　(c)自结构动态递归模糊神经网络姿态跟踪曲线

图3　系统跟踪曲线

从上面的实验曲线可以看出,使用自结构动态递归模糊神经网络控制器很好地抑制了非线性、不确定性因素及外部干扰,且无人机姿态跟踪精度相对于采用经典 PID 控制器的姿态跟踪效果更高。采用自结构动态递归模糊神经网络比一般结构模糊神经网络的姿态角度跟踪速度快,精度更高,更具优越性。

5　结束语

本文提出了一种基于自结构动态递归模糊神经网络方法的无人机姿态控制方案。该自结构动态递归模糊神经网络可以根据系统状态在线调整权值和优化网络结构,从而节省了计算量,相对于固定结构的模糊神经网络而言,其具有跟踪速度快、精度高的特点,更具优越性。通过仿真比较得出,基于该自结构动态递归模糊神经网络的控制方案,针对飞行器的非线性、不确定性及外部干扰等因素有很好的抑制能力,且具有较强的鲁棒稳定性。

参考文献:

[1] CHIU S, CHAND S. A fuzzy logic for control of roll and moment for a flexible wing aircraft[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1991,22(16):77-93.

[2] CHUN H H, KANG C C. Applications of adaptive neural network control to an unmanned airship[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2009,7(6):911-917.

[3] 张友旺,桂卫华. 基于自适应模糊神经网络的摩擦力分部补偿算法[J]. 控制与决策, 2005,20(3):356-360.

[4] 张友旺,桂卫华. 基于动态递归模糊神经网络的自适应电液位置跟踪系统[J]. 控制理论与应用, 2005,22(3):551-556.

[5] 王艳秋. 自适应模糊神经控制器在 MIMO 系统中的应用研究[J]. 控制与决策, 2004,19(5):575-578.

[6] HUANG S N, TAN K K, LEE T H. Further results on adaptive control for a class of nonlinear systems using neural networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2003,14(3):719-722.

[7] JUANG C F. A TSK-type recurrent fuzzy network for dynamic systems processing by neural network and genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002,10(2):155-170.

[8] LEE C H, TENG C C. Identification and control of dynamic systems using recurrent fuzzy neural networks[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2000, 8(4):349-366.

[9] 程月华. 应用自结构模糊神经网络估计卫星姿态系统执行机构故障[J]. 应用科学学报, 2010,28(1):72-75.

[10] 徐春梅. 动态模糊神经网络及其快速自调整学习算法[J]. 控制与决策, 2004,20(2):226-229.

(上接第 3386 页)

4　结束语

本文针对水下机器人非线性特点和运行环境,采用滑模控制对确定模型进行控制;根据系统的不确定项设计了相应神经网络控制作为水下机器人控制器的补偿器,最终实现了系统的整体控制。实验结果验证了系统在滑模面上的抖动较小,神经网络输出权值参数能够根据系统误差变化在线学习自适应调整。最后通过对水下机器人定深运动控制的数字仿真验证了算法的有效性,通过在半物理仿真实验平台验证了算法具有较强的抗干扰性和鲁棒性。

参考文献:

[1] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. [S. l.]: John Wiley,1994.

[2] 肖会敏, 赵林, 王春花. 一类带有变时滞的广义切换系统的滑模控制[J]. 控制与决策, 2011,26(3):376-380.

[3] ZHENG Yan, DIMIRIVSKI G M, JING Yuan-wei, *et al*. Discrete-time sliding mode control of nonlinear systems[C]//Proc of the American Control Conference. 2007:3825-3830.

[4] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZE E. Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Robotics and Autonomous Systems,2008,56(8): 670-677.

[5] MASAHIRO I, NOBUTAKA T, TAKAYUKI K. Adaptive force control for unknown environment using sliding mode controller with variable hyperplane[J]. JSME International Journal Seres C,2003,46(3):967-972.

[6] 刘和平, 龚振邦, 李敏,等. 水下机器人浪涌中横摇角的模糊滑模控制[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(14): 122-125.

[7] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZER E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010,58(1): 16-26.

[8] Van De Ven PEPIJN W J, FLANAGAN C, TOAL D. Neural network control of underwater vehicles[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005,18(5): 533-547.

[9] ISHII K, URA T. An adaptive neural-net controller system for an underwater vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2000,8(2): 177-184.

[10] 俞建成,李强,张艾群,等. 水下机器人的神经网络自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2008,25(1): 9-13.

[11] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳:辽宁科技出版社, 2000.