

基于模糊逼近的非线性多时延系统的自适应跟踪控制

杜贞斌, 宋宜斌

(烟台大学计算机学院, 山东烟台 264005)

摘要: 针对一类多输入多输出非线性多时延系统, 提出了基于模糊逼近的自适应跟踪控制方案. 该方案构建了基于模糊 T-S 模型的自适应时延模糊逻辑系统, 用来逼近未知非线性时延函数. 从而实现了非线性系统的建模. 根据跟踪误差给出了时延模糊逻辑系统的参数自适应律. 设计了 H_∞ 补偿器来抵消模糊逼近误差和外部扰动. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 提出的控制方案保证了闭环系统的稳定性并获得了期望的 H_∞ 跟踪性能. 机械臂的仿真结果表明了该方案的有效性.

关键词: 多输入多输出; 非线性系统; 时延; 自适应模糊逻辑系统; 跟踪控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 05-0897-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.05.006

Fuzzy Approximation-Based Adaptive Tracking Control for Nonlinear Systems with Multiple Time Delays

DU Zhen-bin, SONG Yi-bin

(School of Computer Science and Technology, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: A fuzzy approximation-based adaptive tracking control scheme is proposed for a class of multiinput-multioutput (MIMO) nonlinear systems with multiple time delays. Fuzzy T-S model-based adaptive time-delay fuzzy logic systems are developed to approximate the unknown nonlinear time delay functions. Thus, the modeling to nonlinear systems is implemented. The update laws for parameters of the fuzzy logic systems are derived by the tracking error. H_∞ compensator is designed to eliminate fuzzy approximation errors and external disturbances. Based on Lyapunov stability theorem, the proposed control scheme can guarantee the stability of the closed loop systems and obtain anticipant H_∞ tracking performance as well. Simulation results of the manipulator demonstrate the effectiveness of the control scheme.

Key words: multiinput-multioutput (MIMO); nonlinear systems; time delays; fuzzy logic systems; tracking control

1 引言

模糊技术是对系统建模的有效工具^[1], 其中自适应模糊控制作为一种研究非线性控制的有效方法引起了人们的广泛关注. 其成功应用在于自适应模糊逻辑系统具有一致逼近的特性, 能够在任意精度上逼近一个定义在致密集上的连续非线性函数. 文献[2,3]给出了多输入多输出非线性系统的自适应模糊控制方案, 所设计的控制器可使非线性系统稳定并使系统输出跟踪期望信号. 在实际工程中存在着许多非线性系统, 都不可避免地存在着多种时延因素. 时延的存在使得控制器设计不同于对传统非线性控制器设计, 从而非线性时延系统的

稳定性问题备受关注. 文献[4~8]提出了多种行之有效的非线性时延系统的控制方案. 文献[4]提出了采用时延模糊 T-S 模型的建模方法. 该方法忽略了对非线性时延函数的建模误差, 但是建模误差的忽略会影响系统的稳定性. 文献[5]假定非线性时延函数满足匹配条件. 匹配条件实现了对误差的建模, 然而, 匹配条件是强假设条件, 不易寻求. 文献[6]考虑建模误差和非线性时延函数有上界. 上界比匹配条件降低了保守性, 可是, 上界同样会给控制器的设计增加约束. 文献[7]提出了基于神经网络的自适应控制方法. 该方法突破了对非线性时延函数做假设的不足, 由于神经网络层数多, 权值庞大, 从而实时性弱. 文献[8]提出的模糊控制方法约简了权值

数量,需要在假定非线性函数有界的基础上来证明系统的稳定性,而界估计过大或界不存在会给控制器的设计增加难度.

本文针对一类多输入多输出非线性多时延系统,给出了一种模糊自适应跟踪控制方案.文中构建了基于模糊 T-S 模型的自适应时延模糊逻辑系统用来逼近含多时延的未知非线性函数.在自适应算法中,采用跟踪误差来调节时延模糊逻辑系统中的参数.应用 H_∞ 补偿器来抵消模糊逼近误差和外部扰动.根据 Lyapunov 稳定性理论,证明闭环系统的稳定性并满足期望的 H_∞ 跟踪性能.机械臂的仿真结果表明该方案的可行性.

2 问题描述

考虑如下的多输入多输出多时延非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ &\dots \\ \dot{x}_{(\beta_1-1)} &= x_{\beta_1}, \\ \dot{x}_{\beta_1} &= f_1(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) \\ &\quad + \sum_{i=1}^m g_{1i}(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) u_i + d_1, \\ \dot{x}_{(\beta_1+1)} &= x_{(\beta_1+2)}, \\ &\dots \\ \dot{x}_n &= f_m(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) \\ &\quad + \sum_{i=1}^m g_{mi}(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) u_i + d_m, \\ y_1 &= x_1, \\ &\dots \\ y_m &= x_{(n-\beta_m+1)}, \\ x(t) &= \Xi(t), t \in [-\zeta, 0], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_1^{(\beta_1-1)}, \dots, x_{(n-\beta_m+1)}, \dots, x_{(n-\beta_m+1)}^{(\beta_m-1)}]^T \in R^n$, $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_m]^T$ 和 $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_m]^T$ 分别是系统的状态、输入和输出向量,状态是可量测的, $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_m = n$, $f_i, g_{ij} (i, j = 1, \dots, m)$ 为充分光滑连续函数, $d_i (i = 1, \dots, m)$ 是外部扰动, $\Xi(t)$ 连续,表示系统的初始状态, $\tau_i (i = 1, \dots, r)$ 表示时延, $\zeta = \max\{\tau_i | 1 \leq i \leq r\}$.

引进时延算子 $\sigma_i: \sigma_i x(t) = x(t - \tau_i) (i = 0, 1, \dots, r)$, 其中 $\tau_0 = 0, \tau_i > 0 (i = 1, \dots, r)$. 令 $\sigma = [\sigma_0 \ \sigma_1 \ \dots \ \sigma_r]$, 于是,非线性时延向量函数和时延矩阵函数可表示为如下形式

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_\sigma(x) &\triangleq F(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) \\ &= [(f_i(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)))] \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, m), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_\sigma(x) &\triangleq G(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)) \\ &= [(g_{ij}(x, x(t-\tau_1), \dots, x(t-\tau_r)))] \\ &\quad (i, j = 1, 2, \dots, m), \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{F}_{\sigma(t)}(x)$ 是 m 维的列向量, $\mathbf{G}_{\sigma(t)}(x)$ 是 m 阶的方阵.从而,非线性系统(1)可改写为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B[\mathbf{F}_\sigma(x) + \mathbf{G}_\sigma(x)u + d], \\ y &= Cx, \\ x &= \Xi(t), t \in [-\zeta, 0], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $A = \text{diag}[A_1, \dots, A_m]$,

$$B = \text{diag}[B_1, \dots, B_m],$$

$$C = \text{diag}[C_1, \dots, C_m],$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & 1 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \vdots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \in R^{\beta_i \times \beta_i},$$

$$B_i = [0, \dots, 0, 1]^T \in R^{\beta_i \times 1},$$

$$C_i = [1, 0, \dots, 0] \in R^{1 \times \beta_i},$$

$$d = [d_1, \dots, d_m]^T,$$

$\mathbf{F}_\sigma(x)$ 和 $\mathbf{G}_\sigma(x)$ 是未知部分.假定 $\forall x \in U_x, U_x$ 是致密集, $\mathbf{G}_\sigma(x)$ 是非奇异的.

对给定的参考信号 y_{r1}, \dots, y_{rm} , 定义跟踪误差为

$$\begin{aligned} e_1 &= y_{r1} - y_1, \dots, e_m = y_{rm} - y_m \\ \text{令 } \mathbf{y}_r &= [y_{r1}, \dots, y_{rm}], \mathbf{y}_r^{(\beta)} = [y_{r1}^{(\beta_1)}, \dots, y_{rm}^{(\beta_m)}], \\ \mathbf{Y}_m &= [y_{1r}, \dots, y_{1r}^{(\beta_1-1)}, \dots, y_{mr}, \dots, y_{mr}^{(\beta_m-1)}]^T, \\ \mathbf{e} &= [e_1, \dots, e_{1r}^{(\beta_1-1)}, \dots, e_m, \dots, e_{mr}^{(\beta_m-1)}]^T. \end{aligned}$$

控制任务: 基于模糊系统设计一个反馈控制器 $u = u_\sigma(x | \Theta_1, \Theta_2, \alpha, \delta)$ 和调整参数 $\Theta_1, \Theta_2, \alpha$ 和 δ 的自适应律,使得系统输出跟踪理想输出.

3 自适应时延模糊逻辑系统

构建基于模糊 T-S 模型的自适应时延模糊逻辑系统来逼近 m 维非线性时延向量函数 $\mathbf{F}_{\sigma(t)}(x)$ 和 m 阶非线性时延矩阵函数 $\mathbf{G}_{\sigma(t)}(x)$, 逼近形式如下:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{F}}_\sigma(x) &= \Psi(x, \alpha, \delta) \Theta_1 \bar{X}, \\ \hat{\mathbf{G}}_\sigma(x) &= \Psi(x, \alpha, \delta) \Theta_2 \bar{X}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中自适应参数为权值 Θ_1 和 Θ_2 、中心 α 以及幅度 δ . $\bar{X} = \text{diag}[X, \dots, X]$, $X = (1 \ x_1 \ x_1(t-\tau_1) \ \dots \ x_1(t-\tau_r) \ \dots \ x_n \ x_n(t-\tau_1) \ \dots \ x_n(t-\tau_r))^T \in R^{(n(r+1)+1) \times 1}$.

定义参数误差 $\tilde{\Theta}_1 = \Theta_1 - \Theta_1^*, \tilde{\Theta}_2 = \Theta_2 - \Theta_2^*, \tilde{\alpha} = \alpha - \alpha^*$ 和 $\tilde{\delta} = \delta - \delta^*$, 则自适应时延模糊逻辑系统对非线性时延向量函数 $\mathbf{F}_\sigma(x)$ 和非线性时延矩阵函数 $\mathbf{G}_\sigma(x)$ 的逼近误差如下

$$\hat{\mathbf{F}}_\sigma(x | \Theta_1, \alpha, \delta) - \mathbf{F}_\sigma(x) = (\Psi(x) - \alpha \Psi_\alpha(x) - \delta \Psi_\delta(x)) \tilde{\Theta}_1 X$$

$$+ (\bar{\alpha}\Psi_{\alpha}(x) + \bar{\delta}\Psi_{\delta}(x))\Theta_1 X + w_1 \quad (4)$$

$$\hat{G}_{\sigma}(x|\Theta_2, \alpha, \delta) - G_{\sigma}(x) = (\Psi(x) - \alpha\Psi_{\alpha}(x) - \delta\Psi_{\delta}(x))\bar{\Theta}_2 \bar{X} + (\bar{\alpha}\Psi_{\alpha}(x) + \bar{\delta}\Psi_{\delta}(x))\Theta_2 \bar{X} + w_2 \quad (5)$$

4 控制器设计

采用模糊控制律

$$u = \hat{G}_{\sigma}(x|\Theta_2, \alpha, \delta)^{-1} \cdot [-\hat{F}_{\sigma}(x|\Theta_1, \alpha, \delta) + y_r^{(\beta)} + K^T e - u_{com}] \quad (6)$$

式中 $\hat{F}_{\sigma}(x|\Theta_1, \alpha, \delta)$ 和 $\hat{G}_{\sigma}(x|\Theta_2, \alpha, \delta)$ 分别是对未知函数 $F_{\sigma}(x)$ 和 $G_{\sigma}(x)$ 的近似, 由式(3)给出, K^T 是反馈增益阵, 使得 $A-BK^T$ 的特征多项式是 Hurwitz 的.

根据跟踪误差 e , 选择参数自适应律

$$\dot{\Theta}_1 = -\eta_1 (\Psi(x) - \alpha\Psi_{\alpha}(x) - \delta\Psi_{\delta}(x))^T (B^T P e) X^T, \quad (7)$$

$$\dot{\Theta}_2 = -\eta_2 (\Psi(x) - \alpha\Psi_{\alpha}(x) - \delta\Psi_{\delta}(x))^T (B^T P e) (\bar{X}u)^T, \quad (8)$$

$$\dot{\alpha} = -\eta_3 (B^T P e) (\Psi_{\alpha}(x) (\Theta_1 X + \Theta_2 \bar{X}u))^T, \quad (9)$$

$$\dot{\delta} = -\eta_4 (B^T P e) (\Psi_{\delta}(x) (\Theta_1 X + \Theta_2 \bar{X}u))^T, \quad (10)$$

其中 η_1, η_2, η_3 和 η_4 是正常数.

采用 H_{∞} 补偿器 u_{com} 来补偿外部扰动和逼近误差, H_{∞} 补偿器如下

$$u_{com} = -\left(\frac{1}{\gamma}\right) B^T P e \quad (11)$$

其中对称正定矩阵 P 由下面的 Riccati 方程给出

$$(A - BK^T)^T P + P(A - BK^T) + Q - \left(\frac{2}{\gamma} - \frac{1}{\rho^2}\right) P B B^T P = 0 \quad (12)$$

式中 $2\rho^2 \geq \gamma > 0$, Q 为对称正定矩阵.

定理 1 对于多输入多输出非线性多时延系统(1), 选择模糊控制律(6), 自适应时延模糊逻辑系统(3), 参数自适应律(7)、(8)、(9)和(10), H_{∞} 补偿器(12), 则由式(1)和(6)组成的闭环系统是有界稳定的并满足 H_{∞} 跟踪性能

$$\int_0^T e^T Q e dt \leq e^T(0) P e(0) + \sum_{i=1}^r \int_{-\tau_i}^0 \Xi^T(v) \Xi(v) dv + \frac{1}{\eta_1} tr(\bar{\Theta}_1^T(0) \bar{\Theta}_1(0)) + \frac{1}{\eta_2} tr(\bar{\Theta}_2^T(0) \bar{\Theta}_2(0)) + \frac{1}{\eta_3} tr(\bar{\alpha}^T(0) \bar{\alpha}(0)) + \frac{1}{\eta_4} tr(\bar{\delta}^T(0) \bar{\delta}(0)) + \rho^2 \int_0^T (\bar{w}^T \bar{w}) dt, \quad (13)$$

$$(\bar{Q} = Q - rI > 0)$$

5 仿真算例

设多输入多输出非线性多时延系统为两连杆机械

臂系统^[9]

$$\ddot{q}(t) + C(q, \dot{q})\dot{q}(t) + g(q) = B(q)\Gamma(t) + \sum_{i=1}^r \xi_i(t)q(t - \tau_i) + d'$$

其中 $C(q, \dot{q}) = H^{-1}(q) C'(q, \dot{q})$, $g(q) = H^{-1}(q) g'(q) B(q) = H^{-1}(q) d'$, $q = [q_1, q_2]^T$, $\xi_i(t)$ 不确定有界, $\tau_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 表示时延, d' 是外部扰动, $y_1 = x_1, y_2 = x_3$. 要求设计自适应模糊控制器, 以跟

踪信号 y_{r1} 与 y_{r2} . y_{r1} 与 y_{r2} 满足 $\ddot{y}_{r1} = -5y_{r1} - 4\dot{y}_{r1} + r_1(t)$, $\ddot{y}_{r2} = -5y_{r2} - 4\dot{y}_{r2} - r_2(t)$, 其中 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 均是幅值为 1, 周期为 2π 的方波信号, 仿真结果如图 1 和图 2 所示.

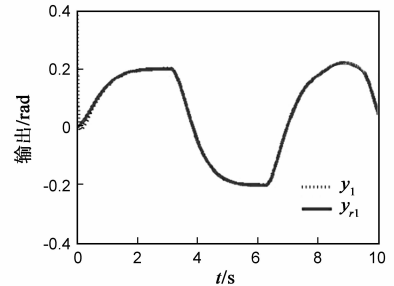


图1 输出 y_1 和期望值 y_{r1}

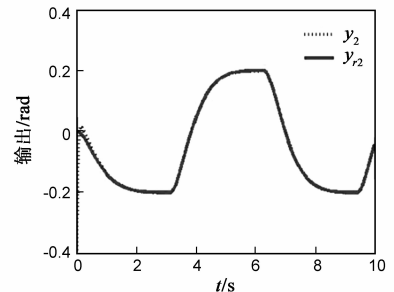


图2 输出 y_2 和期望值 y_{r2}

6 结论

本文的主要特点是构建了基于模糊 T-S 模型的自适应时延模糊逻辑系统来逼近未知非线性时延函数, 从而实现了非线性多时延系统的建模, 以此为基础设计了模糊控制器, 提出了一种自适应模糊跟踪控制方案.

参考文献

[1] 杜文吉, 谢维信, 刘源, 李隐峰. 基于局部线性度量的模糊建模[J]. 电子学报, 2000, 28(1): 64 - 66.
 Du Wen-ji, Xie Wei-xin, Liu yuan, Li Yin-feng. Fuzzy Model Identification Based on Local Linearity Measure[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(1): 64 - 66. (in Chinese)
 [2] 薛振框, 李少远. MIMO 非线性系统的多模型建模方法[J]. 电子学报, 2005, 33(1): 52 - 56.
 Xue Zhen-Kuang, Li Shao-yuan. A Multi-Model Modeling Ap-

- proach to MIMO Nonlinear Systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 52 - 56. (in Chinese)
- [3] Weisheng Chen, Zhengqiang Zhang. Globally stable adaptive backstepping fuzzy control for output-feedback systems with unknown high-frequency gain sign[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2010, 161(6): 821 - 836.
- [4] Nastaran Vasegh, Vahid Johari Majd. Fuzzy model-based adaptive synchronization of time-delayed chaotic systems [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 40(3): 1484 - 1492.
- [5] Chang-Hua Lien, Ker-Wei Yu. Robust control for Takagi-Sugeno fuzzy systems with time-varying state and input delays [J]. Chaos, Solitons, and Fractals, 2008, 35(5): 1003 - 1008.
- [6] Chang-Chun Hua, Qing-Guo Wang, and Xin-Ping Guan. Adaptive fuzzy output-feedback controller design for nonlinear time-delay systems with unknown control direction[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2009, 39(2): 363 - 374.
- [7] T P Zhang, S S Ge. Adaptive neural control of MIMO nonlinear state time-varying delay systems with unknown dead-zones and gain signs[J]. Automatica, 2007, 43(6): 1021 - 1033.
- [8] Bing Chen, Xiaoping Liu, Kefu Liu, Peng Shi, Chong Lin. Direct adaptive fuzzy control for nonlinear systems with time-varying delays[J]. Information Sciences, 2010, 180(5): 776 - 792.

- [9] Wen-Shyong Yu. Tracking-based adaptive fuzzy-neural control for MIMO uncertain robotic systems with time delays [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 146(3): 375 - 401.

作者简介



杜贞斌 男, 1978 年出生, 博士, 副教授. 2006 年于南京航空航天大学控制理论与控制工程专业获工学博士学位, 2003 年于江苏大学应用数学专业获理学硕士学位, 2000 年于曲阜师范大学应用数学专业获理学学士学位. 2006 年 7 月至今在烟台大学计算机学院从事教学和科研工作. 目前研究方向为模糊控制. 共发表(录用)科研论文近 30 篇, 主持课题两项, 科研获奖两项. E-mail: zhenbindu@yahoo.com.cn



宋宜斌 男, 1957 年出生, 硕士, 教授, 烟台大学计算机学院教师, 山东省自动化学会常务理事. 1982 年 7 月毕业于合肥工业大学, 获工学学士学位. 1988 年 7 月于合肥工业大学自动化专业获得工学硕士学位. 一直从事神经网络控制、智能控制工程研究方向研究. 近 5 年来, 发表论文十几篇, 主持省级课题 5 项.