

文章编号: 1001-0920(2006)03-0297-03

基于跟踪误差调节的非线性自适应模糊预测控制

师五喜

(天津工业大学 计算机技术与自动化学院, 天津 300160)

摘要: 将模糊逻辑系统引入预测控制, 对一类非线性离散系统提出了直接自适应模糊预测控制的方法。此方法首先建立被控对象的预测模型; 然后基于此模型直接利用模糊逻辑系统设计预测控制器, 并基于跟踪误差对控制器参数中的未知向量进行自适应调整; 最后证明了此方法可使跟踪误差收敛到原点的一个小邻域内。

关键词: 非线性离散系统; 预测控制; 模糊控制; 稳定性分析

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Nonlinear Adaptive Fuzzy Predictive Control Based on Tracking Error Adjustment

SHI Wuxi

(School of Computer Technology and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China. E-mail: shiwuxi@163.com)

Abstract: A direct adaptive fuzzy predictive control method for a class of nonlinear discrete systems is presented by introducing fuzzy logic system into predictive control strategy. The control plant is represented by a predictive model. A fuzzy logic system is used to design predictive controller directly. And the controller parameters are adjusted adaptively based on the tracking error. It is proved that the proposed method can make the tracking error converge to a small neighborhood of the origin.

Key words: Nonlinear discrete systems; Predictive control; Fuzzy control; Stability analysis

1 引言

模糊逻辑系统可以任意精度逼近定义在紧集上的连续函数, 所以可将其应用于非线性系统预测控制。但这些算法大都采用模糊逻辑系统对非线性系统进行辨识后, 或其线性化^[1], 所采用的仍是线性预测方法; 或采用非线性优化方法在线求取控制量^[2], 使得控制的实时性变差。文献[3]首先对一类仿射非线性系统提出了基于神经网络的近似预测模型; 然后对权值进行在线调整, 通过计算矩阵的逆得到控制量。但由于建立预测模型的神经网络数目较多, 且每一步都要计算矩阵的逆, 在线计算量较大。文献[4]对一类非线性离散系统提出了直接自适应模糊预测控制方法, 该方法中的控制器参数是基于广义误差估计值进行调节的, 所以需要

差估计值中的未知向量设计自适应律, 计算量较大。

本文对一类非线性离散系统提出了直接自适应模糊预测控制方法。此方法首先对被控对象提出了线性时变子模型加非线性子模型的预测模型; 然后直接利用模糊逻辑系统设计预测控制器, 并基于跟踪误差对控制器参数中的未知向量进行自适应调整; 最后证明了此方法可使跟踪误差收敛到原点的一个小邻域内。

2 预测模型及预测控制律推导

考虑如下非线性离散系统:

$$\begin{aligned} y(t) = & f(y(t-1), \dots, y(t-n), \\ & u(t-1), \dots, u(t-m)), \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $u(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示被控对象的输入和输出; $f(\cdot)$ 为未知的连续可微函数; n 和 m 表示输出和

收稿日期: 2005-01-27; 修回日期: 2005-08-01

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金项目(20051206)

作者简介: 师五喜(1964—), 男, 甘肃秦安人, 副教授, 博士, 从事智能控制及预测控制等研究

输入的阶数,并假设其已知 对于系统(1),作如下假设:

假设1 系统(1)满足广义Lipshitz条件,即对任意t和Δu(t) = 0有|Δy(t+1)| ≤ L|Δu(t)|,其中L是常数;

假设2 ∂y(t+1)/∂u(t) = g₀是未知常数且0 < g₀ < a,其中a是已知常数

下面推导系统(1)的预测模型 当j > 2时,可得到j步超前预测输出为

$$y(t+j) = g_0\Delta u(t+j-1) + \sum_{i=2}^{j-1} g_{i-1}(t+j-i)\Delta u(t+j-i) + f_{j-1}(y(t), \dots, y(t-n+1), u(t), u(t-1), \dots, u(t-m+1)).$$

利用微分中值定理可得

$$y(t+j) = g_0\Delta u(t+j-1) + \sum_{i=2}^j g_{i-1}(t+j-i)\Delta u(t+j-i) + F_j(X(t)). \tag{2}$$

其中: X(t) = [y(t), ..., y(t-n+1), u(t-1), ..., u(t-m+1)]^T, g_{j-1}(t) 是 f_{j-1}(•) 对于 u(t) 的偏导数 ∂f_{j-1}/∂u(t) 在 u(t-1) 与 u(t) 之间的某一点值, F_j(X(t)) = f_{j-1}(y(t), ..., y(t-n+1), u(t-1), u(t-1), ..., u(t-m+1)).

预测控制的目的是使被控对象的输出 y(t+j) 跟踪参考序列 y_r(t+j), j = 1, 2, ... 取性能指标函数

$$J = \sum_{j=1}^N (y(t+j) - y_r(t+j))^2, \tag{3}$$

其中N为最大预测时域和控制时域 可将式(2)写成向量形式

$$Y = G(t)U + F. \tag{4}$$

其中

$$Y = [y(t+1), \dots, y(t+N)]^T, \\ U = [\Delta u(t), \dots, \Delta u(t+N-1)]^T, \\ F = [F_1(X(t)), \dots, F_N(X(t))]^T, \\ G(t) = \begin{bmatrix} g_0 & & & & \\ g_1(t) & g_0 & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ g_{N-1}(t) & g_{N-2}(t+1) & \dots & g_0 & \end{bmatrix}.$$

当m = 1时,式(4)中的X(t) = [y(t), ..., y(t-n+1), u(t-1)]^T. 定义 Y_r = [y_r(t+1), ..., y_r(t+N)]^T, 则性能指标函数(3)可写成

$$J = (Y - Y_r)^T (Y - Y_r). \tag{5}$$

由式(4)和(5),可得使J取最小值的控制律为 U = G(t)⁻¹[Y_r - F] 令 R_i^T(t) 表示 G⁻¹(t) 的第i(i

= 1, ..., N) 行, 则预测控制律可写成

$$\Delta u(t) = R_i^T(t) [Y_r - F], \tag{6}$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t). \tag{7}$$

3 自适应模糊预测控制器设计

当被控对象中的函数未知时,控制器(6)不能实现,所以本文直接利用文献[5]中与参数成线性关系的模糊逻辑系统 y = f(x|Θ) = Θ^Tξ(x) 逼近控制器(6),得到如下模糊预测控制器:

$$\Delta u(t) = \Theta_i^T \xi_i(X(t)), \tag{8}$$

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t). \tag{9}$$

记跟踪误差 e(t) = y(t-N+1) - y_r(t-N+1). 采用如下自适应律来调节参数向量 Θ_i(t):

$$\Theta_i(t) = \begin{cases} \Phi_i(t), & |\Phi_i(t)| \leq M_\theta \\ P\{\Phi_i(t)\}, & |\Phi_i(t)| > M_\theta \end{cases} \tag{10}$$

其中: Φ_i(t) = Θ_i(t-N) - sign(g₀)αξ_i(X(t-N))e(t); α为自适应学习率; M_θ为设计者取定的常数,且 |Θ_i(-N+1)| ≤ M_θ, ..., |Θ_i(0)| ≤ M_θ, 投影算子 P{Φ_i(t)} 定义为 P{Φ_i(t)} = M_θΦ_i(t) / |Φ_i(t)| 可得如下定理:

定理1 若被控对象(1)满足假设1和假设2,自适应模糊预测控制器为式(8),参数向量 Θ_i(t) 的自适应调节律为式(10),则当 0 < α < 1/a 时, e(t) 将收敛到原点的一个小邻域内

证明 由式(10)知,对于任意的 t > 0, 均有 |Θ_i(t)| ≤ M_θ 由于 |ξ_i(X(t))| < 1, 由式(8)知, Δu(t) 有界 因此,对所有的 t > 0, u(t) 有界 由假设1知, y(t) 有界, 所以 u(t) 和 y(t) 是有界序列 记

$$U = \begin{bmatrix} \Theta_i^T \xi_i(X(t)) \\ \Theta_{i-1}^T \xi_{i-1}(X(t)) \\ \vdots \\ \Theta_{N-i+1}^T \xi_{N-i+1}(X(t)) \end{bmatrix},$$

记跟踪误差向量为 E₀(t+N) = Y - Y_r, E(t+N) = G⁻¹E₀(t+N). 定义

$$\Theta_{i(i-1)} = \arg \min_{\Theta_{i(i-1)}} \{ \sup_{X(t) \in U_X} |f(X(t)|\Theta_{i(i-1)}) - R_i^T [Y_r - F]| \},$$

其中: Ω_i = {Θ_{i(i-1)}(t) | |Θ_{i(i-1)}(t)| ≤ M_{θ(i-1)}}, M_{θ(i-1)} 由设计者取定, U_X ⊂ R^{n+m-1}. 记 Φ_{i(i-1)} = Θ_{i(i-1)} - Θ_{i(i-1)}, 最佳逼近误差 ω_{i-1}(t) = f(X(t)|Θ_{i(i-1)}) - R_i^T[Y_r - F], 则

$$E(t+N) = \begin{bmatrix} \Phi_i^T \xi_i(X(t)) + \omega(t) \\ \Phi_{i-1}^T \xi_{i-1}(X(t)) + \omega(t) \\ \vdots \\ \Phi_{N-i+1}^T \xi_{N-i+1}(X(t)) + \omega_{i-1}(t) \end{bmatrix}.$$

又 $E_0(t+N) = G(t)E(t+N)$, 因此

$$e(t) = g_0(\Phi_i^T(t-N)\xi_r(X(t-N)) + \omega(t-N)). \quad (11)$$

取 $V(t) = \frac{1}{\alpha}\Phi_i^T(t)\Phi_i(t)$, 记 $V(t) - V(t-N) = \Delta V(t)$.

1) 如果式(10)的第 1 行成立, 则

$$\begin{aligned} \Delta V(t) = & -2\text{sign}(g_0)\Phi_i^T(t-N)\xi_r(X(t-N))e(t) + \alpha|\xi_r(X(t-N))|^2e^2(t). \end{aligned}$$

又由(11)成立, 有

$$\begin{aligned} \Delta V(t) = & (-\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0} + \alpha|\xi_r(X(t-N))|^2)[e(t) + \frac{g_0\text{sign}(g_0)\omega(t-N)}{\text{sign}(g_0) - \alpha g_0|\xi_r(X(t-N))|^2}]^2 + \frac{g_0\omega^2(t-N)}{\text{sign}(g_0) - \alpha g_0|\xi_r(X(t-N))|^2} - \frac{\text{sign}(g_0)}{g_0}e^2(t). \end{aligned}$$

因为 $|\xi_r(X(t-N))| < 1, 0 < \alpha < 1/a, g_0$ 满足假设 2, 所以 $-\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0} + \alpha|\xi_r(X(t-N))|^2 < 0$, 故

$$\begin{aligned} \Delta V(t) < & -\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0}e^2(t) + \frac{g_0\omega^2(t-N)}{\text{sign}(g_0) - \alpha g_0|\xi_r(X(t-N))|^2} \quad (12) \end{aligned}$$

2) 如果式(10)的第 2 行成立, 由于 $|\theta_i| \leq M_{\theta}$, 由投影算法得

$$\begin{aligned} |\theta_i(t) - \theta_i^*| < & |\theta_i(t-N) - \text{sign}(g_0)\alpha\xi_r(X(t-N))e(t) - \theta_i^*|, \end{aligned}$$

故 $\Delta V(t) < -2\text{sign}(g_0)\Phi_i^T(t-N)\xi_r(X(t-N))e(t) + \alpha|\xi_r(X(t-N))|^2e^2(t)$. 按式(1)的方法可知式(12)亦成立. 综上所述, 自适应律(10)都使式(12)成立.

令 $\sup|\omega(t-N)| = \epsilon$, 又 $0 < |\xi_r(X(t-N))| < 1$, 故

$$\sup \frac{g_0}{\text{sign}(g_0) - \alpha g_0|\xi_r(X(t-N))|^2} \triangleq W$$

是有界量. 由式(12)得

$$\Delta V(t) < -\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0}e^2(t) + \epsilon^2W. \quad (13)$$

利用文献[6]的思路可以证明, $e(t)$ 将收敛到原点的小邻域内. 事实上, 由式(13)得

$$V(t) < V(t-N) - \left[\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0}e^2(t) - \epsilon^2W \right]$$

对上式 t 从 1 到 l 相加, 且知对任意 $t, V(t)$ 有界, 因此 $\lim_{l \rightarrow \infty} \frac{1}{l} \left[\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0} |e(t)|^2 - \epsilon^2W \right] < 0$. 利用

级数性质知 $\lim_{l \rightarrow \infty} \left[\frac{\text{sign}(g_0)}{g_0} |e(t)|^2 - \epsilon^2W \right] = 0$, 当 t

时 $|e(t)| \leq \epsilon \sqrt{\frac{g_0}{\text{sign}(g_0)}W}$, 因此 $e(t)$ 收敛到原点的小邻域内.

4 仿 真

考虑如下非线性系统

$$\begin{aligned} y(t) = & \frac{2.5y(t-1)y(t-2)}{1+y^2(t-1)+y^2(t-2)} + \\ & 0.7\sin(0.5(y(t-1)+y(t-2)))\cos(0.5(y(t-1)+y(t-2))) + \\ & 1.2u(t-1) + 1.4u(t-2). \end{aligned}$$

假设使以上系统跟踪参考序列 $y_r(t) =$

$\cos(\frac{\pi t}{250})$, 初始位置 $[y(-2), y(-1)] = [0, 0]$. 假

设 $a = 1.5, g_0 > 0$, 由定理条件可选择 $\alpha = 0.15$. $\theta_i(-1)$ 和 $\theta_i(0)$ 的每个分量均在 $[-0.1, 0.1]$ 内随机选取, 据此可选择 $M_{\theta} = 2.6$, 控制算法中选择 $N = 2$.

为了保证 $y(t), y(t-1)$ 和 $u(t-1)$ 的取值在一定范围内, 进行一一映射^[3], $\bar{y}(t) = \frac{y(t)}{|y(t)|+1}$, 这样对于任意的 $y(t), \bar{y}(t) \in (-1, 1)$. 对 $y(t-1)$ 和 $u(t-1)$ 可作同样的映射. 因此, 模糊逻辑系统 $\hat{f}(X(x)|\theta)$ 中 $X(t) = [\bar{y}(t), \bar{y}(t-1), \bar{u}(t-1)]^T$, 每个输入的隶属函数均取为 $\mu_1 = \exp(-(\frac{x+1}{0.6})^2)$, $\mu_2 = \exp(-(\frac{x}{0.6})^2)$, $\mu_3 = \exp(-(\frac{x-1}{0.6})^2)$, 这样模糊逻辑系统由 27 条规则构成. 系统输出 $y(t)$ 跟踪参考序列 $y_r(t)$ 的情况如图 1 所示.

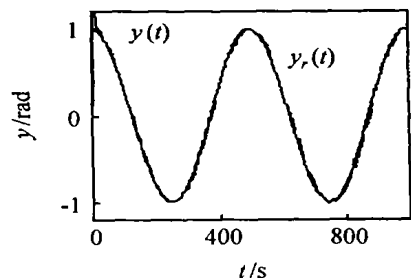


图 1 参考序列 $y_r(t)$ 和输出 $y(t)$

从图 1 可以看出, 本文方法在系统函数未知时输出也能很好地跟踪参考序列.

(下转第 304 页)

通过不断更新GM(1,1)模型来克服随机噪声干扰,并挖掘出目标的最新运动规律,克服了Kalman滤波跟踪方案在运动规律不清楚以及噪声特性不明确的情况下需要作出假设的不足,从而能较快较好地预测出目标的运动位置,实现运动目标的可靠跟踪

参考文献(References)

- [1] Kamijō Shunsuke, Nishida Tsunetoshi, Satoh Suguru, et al. Automated Behavior and Statistical Analysis from Traffic Images Based on Precise Vehicle Tracking Algorithm [A]. *IEEE 5th Int Conf on Intelligent Transportation Systems*[C]. Singapore, 2002: 920-925
- [2] Lee Hwajeong, Kim Daehwan, Kim Daijin, et al. Real-time Automatic Vehicle Management System Using Vehicle Tracking and Car Plate Number Identification [A]. *IEEE Int Conf on Multimedia and Expo, Atlanta* [C]. Maryland, 2003: 353-356
- [3] Noyer J-C, Lanvin P, Benjelloun M. Non-linear Matched Filtering for Object Detection and Tracking [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(6): 655-668
- [4] Harini Veeraraghavan, Osama Masoud, Nikolaos P. Computer Vision Algorithms for Intersection Monitoring [J]. *IEEE Trans on ITS*, 2003, 4(2): 78-89
- [5] Zaki M, ElNahas M Y, Youssef M. An Enhanced Motion-based Object Tracker [J]. *J of Systems and Software*, 2002: 69(1-2): 149-158
- [6] 黄福珍, 苏剑波. 基于Level Set方法的人脸轮廓提取与跟踪 [J]. *计算机学报*, 2003, 26(4): 491-496
- (Huang F Z, Su J B. Face Contour Extraction and Tracking Using Level Sets [J]. *Chinese J of Computers*, 2003, 26(4): 491-496)
- [7] 周志宇, 汪亚明. 基于模糊熵聚类和Kalman滤波的区域跟踪 [J]. *测控技术*, 2003, 22(11): 60-62
- (Zhou Z Y, Wang Y M. Region Tracking Based on Fuzzy Entropy Clustering and Kalman Filter [J]. *Measurement and Control Technology*, 2003, 22(11), 60-62)
- [8] 郑江滨, 张艳宁, 冯大淦, 等. 视频监视中运动目标的检测与跟踪算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(10): 34-37.
- (Zheng J B, Zhang Y N, Feng D G, et al. Moving Object Detection and Tracking Algorithm for Video Monitoring [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(10): 34-37.)
- [9] 汪亚明, 楼正国, 卞昕, 等. 一种非刚体运动图象序列的特征点对应方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2000, 5A(3): 232-236
- (Wang Y M, Lou Z G, Bian X, et al. A New Correspondence Approach for Feature Points in Non-rigid Image Sequences [J]. *J of Image and Graphics*, 2000, 5A(3): 232-236)
- [10] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国. *灰色系统理论及其应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- (Liu S F, Guo T B, Dang Y G. *Grey Theory and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 1999)

(上接第299页)

5 结 论

本文只用一个模糊逻辑系统对一类非线性离散系统设计了直接自适应模糊预测控制器,避免了实时控制算法中的矩阵求逆,减小了在线计算量

参考文献(References)

- [1] Fischer M, Nelles O, Isemann R. Predictive Control Based on Linear Fuzzy Models [J]. *Int J of System Science*, 1998, 29(7): 679-697.
- [2] Sarin veis Haralam bos, Bafas George. Fuzzy Model Predictive Control of Nonlinear Processes Using Genetic Algorithms [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 139(1): 59-80
- [3] Liu G P, Kadiramanathan V, Billings S. Predictive Control for Nonlinear Systems Using Neural Networks [J]. *Int J Control*, 1998, 71(6): 1119-1132
- [4] 师五喜, 霍伟, 吴宏鑫. 一类未知非线性离散系统的直接自适应模糊预测控制 [J]. *自动化学报*, 2004, 30(5): 664-670
- (Shi W X, Huo W, Wu H X. Direct Adaptive Fuzzy Predictive Control for a Class of Unknown Nonlinear Discrete Systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(5): 664-670)
- [5] Wang L X. Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155
- [6] Goodwin G C, Sin K S. *Adaptive Filtering, Predictive and Control* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984: 11-20