

文章编号: 1001-0920(2006)10-1124-05

基于广义双曲正切模型的机器人模糊自适应控制

高道祥, 薛定宇

(东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 利用广义模糊双曲正切模型的全局逼近特点, 设计一种直接模糊自适应控制器用于机器人轨迹跟踪控制。模糊控制器的输入变量经过平移变化后得到的广义输入变量能够覆盖整个输入空间, 因此, 模糊控制器能以任意精度逼近系统的最优控制; 由于双曲正切模型的特殊结构, 在保证跟踪精度的同时, 避免了因模糊子集数目增加而带来的计算负担的增加, 满足了机器人实时控制的需要。仿真结果表明, 该控制算法具有较强的鲁棒性和较好的跟踪性。

关键词: 机器人; 模糊控制; 广义双曲正切模型; 直接自适应控制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Fuzzy Adaptive Control of Manipulators Based on the Generalized Hyperbolic Model

GAO Dao-xiang, XUE Ding-yu

(Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: GAO Dao-xiang, Email: dausson@163.com)

Abstract: A universal approximator and a direct fuzzy adaptive controller are proposed for the trajectory tracking control of robotic manipulator by taking advantage of the property of the generalized hyperbolic model. The input generalized variables of the fuzzy controller, derived from the translation of the input variables can cover the whole input space. So, this controller can approximate the optimal control by arbitrary accuracy. Furthermore, due to the special structure of the fuzzy hyperbolic model, the control strategy avoids a heavy computation burden when the fuzzy subsets are augmented but taking a satisfied tracking performance. It meets the requirement of robotic manipulator real-time control. Simulation studies show that this control algorithm possesses strong robustness and satisfactory tracking accuracy.

Key words: Robotic manipulator; Fuzzy control; Generalized hyperbolic model; Direct adaptive control

1 引言

机器人系统是一个多变量、强耦合、高度复杂的非线性动力学系统, 其工作环境复杂多变, 外界干扰和机器人本身参数的不确定性成为获得机器人精确数学模型的最大障碍, 因此, 根据机器人精确数学模型设计一个有效的控制器是很困难的。自适应控制根据环境和参数的变化在线调整控制器参数, 能够设计出针对机器人系统的较为理想的控制器。基于机器人模型的自适应控制^[1]利用机器人参数线性化的特点, 能够在线估计机器人不确定的但能够结构化的参数, 这种方法在理论上的渐近收敛性已经给

出了严格的证明, 并取得了较为满意的实验结果。但是, 机器人模型的复杂程度随着自由度的增加呈指数上升, 而且, 有些情况下机器人模型并不容易得到, 因此, 设计一个无模型的自适应控制器便成为当前研究的一个热点。

模糊控制能够利用人类语言信息直接进行系统建模和控制器设计, 这正是处理具有不确定性复杂非线性系统控制所需要的, 直接模糊控制^[2]的特点是避开被控对象的特性建模, 利用一组模糊基函数, 直接综合出控制律来逼近最优控制律, 或者将模糊控制与其他控制算法相结合, 例如, 滑模变结构控

收稿日期: 2005-09-09; 修回日期: 2005-11-15

作者简介: 高道祥(1972—), 男, 山东蓬莱人, 博士生, 从事机器人鲁棒自适应控制等研究; 薛定宇(1963—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事控制系统CAD、机器人控制等研究

制^[3], PD 控制^[4]等 这种基于普通模糊基函数进行建模方法的缺点是: 当系统状态位于设定的紧集 D 之外时, 不能保证系统是稳定的, 如果选择较大的 D 保证系统的状态位于其内, 这又会导致模糊规则数目急剧增加 文献[5] 构造了一种监督控制的方法来解决这类问题, 但监督控制属于一种符号切换函数控制, 选取过大时将对被控对象造成较大的冲击, 可能激发系统未建模的动态特性, 使闭环系统的性能恶化

本文提出一种基于广义双曲正切模型^[6,7] 的直接模糊自适应控制算法, 将传统的模糊基函数用双曲正切函数代替, 在模糊规则的设计上依然采用“if ... then ...”的语言描述, 后件参数采用李亚普诺夫稳定性原理设计自适应控制律进行在线调整 由于双曲正切函数本身的特点, 即使系统的状态位于事先设定的紧集 D 之外, 系统依然能够保持稳定

2 n 连杆机器人动力学模型

如果考虑外部干扰力矩, n 连杆机械手的动力学模型可表示为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_d, \quad (1)$$

式中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为机器人关节的位置、速度、加速度; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为正定有界的惯量矩阵, $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^n$ 为离心力和哥氏力项, $G(q) \in R^n$ 为重力项; $\tau \in R^n$ 为输入的控制力矩, $\tau_d \in R^n$ 为干扰力矩

虽然式(1)所示的机器人动力学方程式非常复杂, 但由 n 个自由杆件所组成的机械系统是非常简单的, 其中的一些特性有利于控制系统的分析与设计:

- 1) $M(q)$ 为正定矩阵, 满足

$$\beta_1 \|x\|^2 \leq x^T M(q)x \leq \beta_2 \|x\|^2,$$

$$\forall q, x \in R^n, 0 < \beta_1 < \beta_2;$$
- 2) $M(q) - 2C(q, \dot{q})$ 为斜对称矩阵, 即

$$x^T (M(q) - 2C(q, \dot{q}))x = 0, \forall x \in R^n.$$

3 广义模糊双曲正切模型

直接型模糊自适应控制器是采用模糊逻辑系统作为控制器的, 因此语言性模糊控制规则可直接作用于控制器 本文采用广义模糊双曲正切模型来逼近系统的最优控制

定义 1^[6] 已知 MIMO 系统的 n 个输入变量 $x = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$, 输出 $u_f = [u_{f1}(t), \dots, u_{fm}(t)]^T$, 如果用来描述此系统的模糊规则基满足以下条件, 则称这组模糊规则基为广义双曲正切型模糊规则基, 第 l 条模糊规则的形式为

If $(x_1 - d_{11})$ is $F_{x_{11}}$ and $(x_1 - d_{12})$ is $F_{x_{12}}$
and ... and $(x_1 - d_{1r_1})$ is $F_{x_{1r_1}}$

and ... and $(x_n - d_{n1})$ is $F_{x_{n1}}$ and $(x_n - d_{n2})$
is $F_{x_{n2}}$ and ... and $(x_n - d_{nr_n})$ is $F_{x_{nr_n}}$,
then $u_{f1}^l(t) = \theta_{F_{11}} + \theta_{F_{12}} + \dots + \theta_{F_{1r_1}} + \dots$
 $+ \theta_{F_{n1}} + \theta_{F_{n2}} + \dots + \theta_{F_{nr_n}}$

and ... and

$u_{fm}^l(t) = \theta_{F_{11}} + \theta_{F_{12}} + \dots + \theta_{F_{1r_1}} + \dots$
 $+ \theta_{F_{n1}} + \theta_{F_{n2}} + \dots + \theta_{F_{nr_n}}$

其中: $r_i (i = 1, \dots, n)$ 为将 x_i 进行平移变换的次数, $d_{ij} (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, r_i)$ 为 x_i 作平移变换时的平移量, $F_{x_{ij}} (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, r_i)$ 为与 $x_i - d_{ij}$ 相对应的模糊子集, 仅包括正(P)和负(N)两个语言值, $\theta_{F_{x_{ij}}} (z = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, r_i)$ 是与 $F_{x_{ij}}$ 对应的常数

注 1 If 中输入变量以及 then 中输出常数项都是可选的, 但输出项 $\theta_{F_{x_{ij}}}$ 与输入变量是一一对应的, 即如果在 If 部分包括 $F_{x_{ij}}$, 则在 then 部分应包括 $\theta_{F_{x_{ij}}}$ 项; 相反如果 If 部分不包括 $F_{x_{ij}}$, 则在 then 部分也应不包括 $\theta_{F_{x_{ij}}}$ 项 设广义输入变量总数 $\omega =$

$\sum_{i=1}^n r_i$, 此模糊规则基共有 2^ω 条模糊规则

引理 1^[6] 给定一组广义双曲正切模型模糊规则基, 首先将输入变量 $x = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ 进行如下的平移变换得到广义输入变量:

$$\chi_\xi = x_i - d_{ij}, \quad (2)$$

式中: $\xi = 1, \dots, \omega, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, r_i$. 取广义输入变量对应的模糊集合 P_{χ_ξ} 和 N_{χ_ξ} 的隶属度函数

$$\mu_{P_{\chi_\xi}} = \exp[-(\chi_\xi - \bar{k}_\xi)^2/2],$$

$$\mu_{N_{\chi_\xi}} = \exp[-(\chi_\xi + \bar{k}_\xi)^2/2], \quad (3)$$

式中偏移量 \bar{k}_ξ 为常数 根据定义中的模糊规则, 如模糊化采用单点模糊集合, 清晰化采用加权平均法, 直积运算采用求积法, 可以得到如下的数学模型:

$$u_{fz} = \sum_{\xi=1}^{\omega} \frac{\theta_{P_{\chi_\xi}} \exp(-k_\xi \chi_\xi) + \theta_{N_{\chi_\xi}} \exp(k_\xi \chi_\xi)}{\exp(-k_\xi \chi_\xi) + \exp(k_\xi \chi_\xi)},$$

$z = 1, \dots, m$, 如果取 $\theta_{P_{\chi_\xi}} = -\theta_{N_{\chi_\xi}} = \theta_\xi$, 则

$$u_{fz} = \sum_{\xi=1}^{\omega} \theta_\xi \tanh(k_\xi \chi_\xi). \quad (4)$$

注 2 按照文献[6] 广义模糊双曲正切模型的定义, $\theta_{P_{\chi_\xi}} = -\theta_{N_{\chi_\xi}}$, 本文之所以选取 $\theta_{P_{\chi_\xi}} = -\theta_{N_{\chi_\xi}}$, 一方面可使设计的直接自适应控制器结构简单, 计算量小, 另一方面本文模糊逻辑系统的输入变量为轨迹跟踪的误差, 这样选择是符合专家控制语言描述的, 即误差为正或负, 控制量应选取为相应的正大或负大

引理 2^[6] 对于 $U \subset R^n$ 上任意连续实函数 f 以及任意 $\epsilon > 0$, 都存在如式 (4) 所示的基于广义双曲正切模型的模糊系统 u_f 满足 $\sup_x |f(x) - u_f(x)| < \epsilon$ 这说明广义双曲正切模型能够逼近定义在致密集上的非线性

4 基于双曲正切模型的模糊控制器设计

4.1 模糊控制器设计

对于式 (1) 所示的机器人动力学系统, 其工作环境及操作目标是随时间发生变化的, 而且作业循环中的末端执行器有效载荷存在大范围的变动, 因此, 机器人系统具有不确定的参数变动和外界干扰, 控制目标是设计一个基于双曲正切模型的模糊自适应控制器, 使机器人操作臂能按照期望的有界轨迹运动, 即使存在载荷的大范围变动和外界不确定干扰, 跟踪轨迹误差及自适应参数都是最终一致有界的

定义轨迹跟踪位置误差 $\tilde{q} = q_d - q$, 速度误差 $\dot{\tilde{q}} = \dot{q}_d - \dot{q}$, 及滑模向量 $s = \tilde{q} + \Lambda \tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \ddot{q}_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 为期望关节轨迹的位置、速度和加速度, $\Lambda \in R^{n \times n}$ 为正定对角矩阵, 则式 (1) 可改写为

$$M(q)\dot{s} = -C(q, \dot{q})s + f - \tau, \quad (5)$$

式中

$$f = M(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{\tilde{q}}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda \dot{\tilde{q}}) + G(q) - \tau.$$

设计如下控制律:

$$\tau = Ks + u_f, \quad (6)$$

$K \in R^{n \times n}$ 为正定对角矩阵, u_f 为模糊控制器输出非线性控制量 f 的估计值 设计一个基于广义双曲正切模型的模糊自适应控制器来逼近 f .

将 $x = S_e(\tilde{q} + \Lambda \dot{\tilde{q}})$ ($S_e \in R^{n \times n}$ 为正定对角矩阵) 作为模糊控制系统的输入变量, 对于 n 自由度机器人, $x = S_e[s_1, \dots, s_n]^T, u_f = [u_{f1}, \dots, u_{fn}]^T$. 如果对其 x_i 进行 r_i 次平移, $i = 1, \dots, n$, 模糊控制器广义输入变量 $X = [X_1, \dots, X_\omega]^T, \omega = \sum_{i=1}^n r_i$ 为平移变换后输入变量的总数, 每个变量都取如式 (3) 正与负两种隶属度函数 模糊规则语言可描述为

If X_1 is F_1 and X_2 is F_2 and ... and X_ω is F_ω ,
then $u_{f1} = \theta_{11} + \theta_{12} + \dots + \theta_{1\omega}$ and ... and
 $u_{fn} = \theta_{n1} + \theta_{n2} + \dots + \theta_{n\omega}$

令 $\Theta = [\Theta^1, \dots, \Theta^n]^T, \Theta_i = [\theta_{i1}, \dots, \theta_{i\omega}]^T, i = 1, \dots, n, W(X) = [\tanh(X_1), \dots, \tanh(X_\omega)]^T$, 根据以上模糊规则设计的模糊控制器为

$$u_f(\Theta, X) = \Theta^T W(X), \quad (7)$$

式中 Θ 为模糊自适应控制器在线调整的后件参数 根据李亚普诺夫原理, 设计后件参数 Θ 的自适应调节律为

$$\dot{\Theta} = K_e s W^T(X), \quad (8)$$

自适应学习律 $K_e \in R^{n \times n}$ 为正定对角矩阵 为了避免外界干扰的存在使自适应参数发散, 可采用 δ 修正法对上述算法进行修正

$$\dot{\Theta} = K_e s W^T(X) - \delta s K_e \Theta, \quad (9)$$

$\delta > 0$, δ 修正法能保证自适应系统的鲁棒稳定性, 从而保证了 s 和 Θ 的一致有界

定义 Θ^* 为 Θ 的最优估计值, 参数估计误差为 $\tilde{\Theta} = \Theta - \Theta^*$ 这里引入 Θ^* 只是为了分析的方便, 与控制器的设计无关 根据引理 2, 存在 $\Theta^* = [\Theta^{*1}, \dots, \Theta^{*n}]^T, \Theta^{*i} = [\theta_{i1}^*, \dots, \theta_{i\omega}^*]^T, i = 1, \dots, n$ 且 $\Theta^* < \Theta_{max}$, 使 $u_f(\Theta^*, X) = \Theta^{*T} W(X)$ 在紧集 $D \subset R^n$ 上以精度 ϵ_k 逼近系统的理想控制量 f , 即 $\exists \Theta^*$, 使

$$\sup_B |f - u_f(\Theta^*, X)| < \epsilon_k$$

4.2 稳定性分析

定理 1 考虑由式 (1), (6), (7) 和 (9) 构成的闭环系统, 则对于给定的有界跟踪轨迹 $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 和任意初始误差 $\tilde{q}(0), \dot{\tilde{q}}(0)$, 跟踪误差 $\tilde{q}(t), \dot{\tilde{q}}(t)$ 和自适应估计参数 Θ 是一致终值有界的

证明 将控制律 (6) 代入式 (5), 有

$$M(q)\dot{s} = -C(q, \dot{q})s + f - Ks - u_f(\Theta, X), \quad (10)$$

选取李亚普诺夫函数

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T M(q)s + \text{tr}(\tilde{\Theta}^T (K_e S_e)^{-1} \tilde{\Theta})] \quad (11)$$

沿式 (10) 解的轨迹求解李亚普诺夫方程对时间的微分得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -s^T K s = \frac{1}{2} s^T [M^\circ(q) - 2C(q, \dot{q})] s + \\ & s^T [f - u_f(\Theta, X)] - \text{tr}[\dot{\tilde{\Theta}}^T (K_e S_e)^{-1} \tilde{\Theta}] = \\ & -s^T K s + \frac{1}{2} s^T [M^\circ(q) - 2C(q, \dot{q})] s + \\ & s^T [f - u_f(\Theta^*, X) + u_f(\Theta^*, X) - \\ & u_f(\Theta, X)] - \text{tr}[\dot{\tilde{\Theta}}^T (K_e S_e)^{-1} \tilde{\Theta}] \quad (12) \end{aligned}$$

根据机器人动力学方程特性 2) 与模糊逻辑系统万能逼近的特点, 上式为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -s^T K s + s^T [f - u_f(\Theta^*, X) + \tilde{\Theta}^T W(X)] - \\ & \text{tr}[\delta W^T(X) - \delta s \Theta] \tilde{\Theta}^T = \\ & -s^T K s + s^T [f - u_f(\Theta^*, X)] + s^T \tilde{\Theta}^T W(X) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{tr}[sW^T(X)\tilde{\Theta}^T] + \delta \text{tr}[(\Theta^* - \tilde{\Theta})\tilde{\Theta}^T] \quad (13) \\ & \text{根据 } \text{tr}[(\Theta^* - \tilde{\Theta})\tilde{\Theta}^T] = \|\Theta^* - \tilde{\Theta}\|_F^2 \text{ 及} \\ & s^T \tilde{\Theta} V(X) = \text{tr}[sW^T(X)\tilde{\Theta}^T], \text{ 可得} \\ & \dot{V}(t) = -s^T K s + s^T \epsilon + \\ & \quad \delta \text{tr}[(\tilde{\Theta} - \Theta_{\max})\tilde{\Theta}^T] \\ & \quad - s^T [\lambda_{\min}(K) s + \\ & \quad \delta(\tilde{\Theta} - \Theta_{\max}/2)^2 - \epsilon - \Theta_{\max}/4], \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $\lambda_{\min}(K)$ 是 K 的最小奇异值 如果 $s > \delta$ 或

$\tilde{\Theta} > \delta_0, \delta_0 = \frac{\epsilon + \Theta_{\max}/4}{\lambda_{\min}(K)}, \delta_0 = \frac{\epsilon + \Theta_{\max}/4}{\delta} + \Theta_{\max}/2$, 则 $\dot{V}(t) < 0$ 这表明 $\dot{V}(t)$ 在闭集之外为负, 此时的轨迹误差和参数误差将减少. 在闭集之内的区域轨迹误差与参数误差是有界的 因此可以证明, s 和 $\tilde{\Theta}$ 是一致终值有界的 同时根据 $s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q}, \Theta^*$ 是有界的, 所以 \tilde{q}, \tilde{q} 和 Θ 也是一致终值有界的

5 仿真分析与验证

这里将通过一个二连杆的机器人的仿真实验来说明上述算法的可行性

模糊控制器的输入变量 $x_i = S_{ei}(\tilde{q}_i + \lambda \tilde{q}_i), i = 1, 2$ 将 x_i 进行 5 次平移, 平移量分别是 $d = \pm 4, 0, \pm 8$, 偏移量 $k = 1$, 每次平移包含正与负两种模糊集合, 其隶属度函数为 $\mu_{p, \chi_\xi} = \exp[-(\chi_\xi - 1)^2/2], \mu_{n, \chi_\xi} = \exp[-(\chi_\xi + 1)^2/2], \xi = 1, \dots, 10$ 这样共得到关于广义输入变量 X 的 10 组双曲正切模型, 前 5 组由 x_1 平移得到, 后 5 组由 x_2 平移得到, 如图 1 所示 因此, 整个模糊控制器包含 10 个广义输入变量, 每个输入变量包含 2 个模糊集合, 这样可以构造 2^{10} 条模糊规则, 可描述为

If χ_1 is F_{a1} and χ_2 is F_{a2} and ... and χ_{10} is F_{a10} ,
then $u_{f1} = \pm \theta_{1,1} \pm \theta_{1,2} \pm \dots \pm \theta_{1,10}$ and
 $u_{f2} = \pm \theta_{2,1} \pm \theta_{2,2} \pm \dots \pm \theta_{2,10}$

规则中, $a = 1, 2$ 表示取变量模糊集中的正或负隶属度函数, 后件参数中的 \pm 随前件变量隶属度函数取正或负而变化

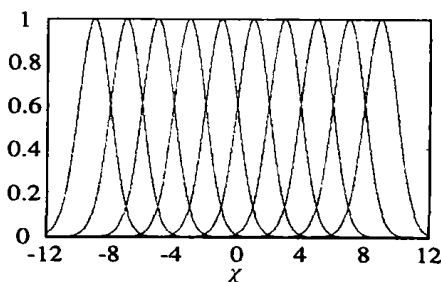


图 1 广义输入变量的隶属度函数

根据以上模糊规则和引理 1, 得到基于广义双曲正切模型的直接模糊控制器为

$$u_{fi} = \sum_{\xi=1}^{10} \theta_{\xi} \tanh \chi_{\xi}, \quad (15)$$

$$\theta_{\xi} = k_{ei} x_i \tanh \chi_{\xi} - k_{ei} \delta x_i \theta_{\xi}, \quad (16)$$

$i = 1, 2, \xi = 1, \dots, 10$

控制器的参数为 $\Lambda = \text{diag}(5, 5), K = \text{diag}(50, 50), K_e = \text{diag}(k_{e1}, k_{e2}) = \text{diag}(100, 50), \delta = 0.0003$

注 3 文献[8]根据系统集中不确定的上界, 设计了一种滑模变结构控制, 这种算法也不需要机器人模型, 只是将机器人模型参数和外界干扰都作为集中不确定因素处理, 为了消除变结构控制的抖振, 采用一种准滑模变结构控制方法——边界层控制方法, 即 $u = \rho \frac{s}{s + \epsilon}, \rho > 0$ 为集中不确定的上界, $\epsilon > 0$ 为边界层的宽度, 这种消除抖阵的方法主要是将符号函数不连续面加以光滑化, 如果选择双曲正切函数作为控制器, 即 $u = \rho \tanh(k_b s), k_b > 0$, 也可达到上述同样的目的 但该算法的一个明显缺点就是: 在边界层内, 纯粹依赖高增益来抑制系统的跟踪误差, ϵ 的取值越小(或者 k_b 值越大), 增益越高, 系统的跟踪性能越好, 但是容易产生抖振; 反之, 系统的跟踪性能越差 那么, 本文提出的控制器也可以看作一系列准滑模控制器(如图 2 所示)的线性组合 但由于采用模糊自适应控制, 系统的跟踪性能已不再单纯依赖于边界层的选择, 而系统却具有类似于变结构控制的强干扰抑制性能, 即系统具有强的鲁棒性能

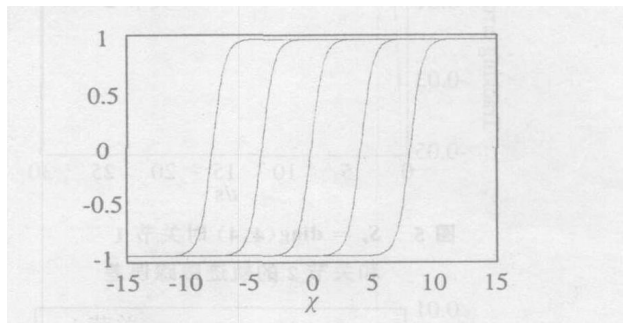


图 2 控制器的广义模糊双曲正切模型

机器人机械机构的具体参数设置为 $m_1 = 10 \text{ kg}, m_2 = 5 \text{ kg}$ 为连杆质量; $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ 为连杆长度; $r_1 = r_2 = 0.5 \text{ m}$ 为连杆质心至关节的距离; $I_1 = 5/6 \text{ kgm}^2, I_2 = 5/12 \text{ kgm}^2$ 为连杆绕质心的转动惯量 假设系统受到如下方波干扰:

$$\tau_{a1}, \tau_{a2} = \begin{cases} 8, 0 & t < \pi \\ 0, \pi & t < 2\pi \end{cases}$$

机器人关节空间的期望轨迹为

$$q_{1d} = \sin(0.67t) + \sin(0.3t) \text{ rad,}$$

$$q_{2d} = \sin(0.39t) + \sin(0.5t) \text{ rad,}$$

机器人关节的初始位置与速度分别为 $q_{10} = q_{20} = 1$ rad, $\dot{q}_{10} = \dot{q}_{20} = 0$ rad/s

图3给出了后件参数的自适应估计值,可以看出, δ -修正法能够保证自适应参数的收敛.图4为控制器的输出力矩,较大的初始力矩是由较大的初始误差引起的.对比图5与6可以看出量化因子 S_e 对系统跟踪性能的影响.图7表明在外界方波干扰和

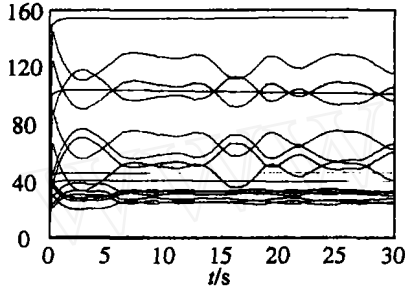


图3 后件参数的自适应估计值

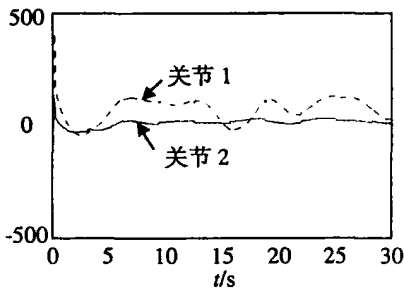


图4 关节1和关节2的力矩

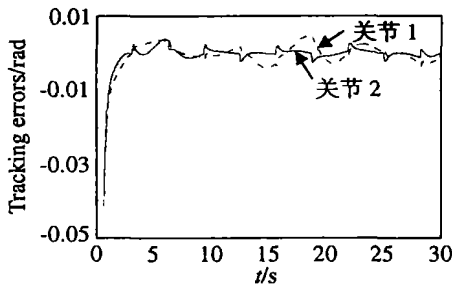


图5 $S_e = \text{diag}(4, 4)$ 时关节1和关节2的轨迹跟踪误差

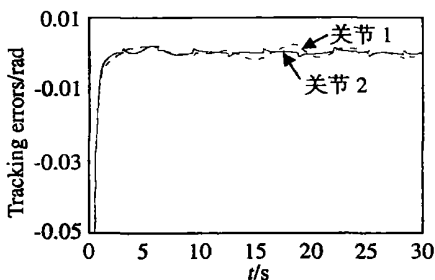


图6 $S_e = \text{diag}(8, 8)$ 时关节1和关节2的轨迹跟踪误差

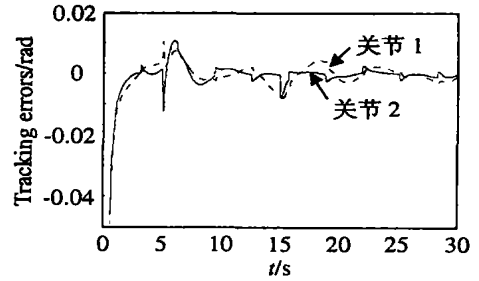


图7 $S_e = \text{diag}(4, 4)$, 5~15s加入5 kg 载荷时关节1和关节2的轨迹跟踪误差

末端执行器有效载荷变化的情况下,系统仍能保证较好的跟踪性和较强的鲁棒性,误差曲线中的尖峰是由于方波干扰引起的

6 结论

本文根据李亚普诺夫稳定性原理,提出了一种基于广义双曲正切模型的机器人模糊自适应控制算法.控制器的设计不需要系统先验知识,只要求机器人的惯量矩阵为正定有界的,这个条件是能够得到满足的.广义模糊双曲正切模型的引入在提高系统跟踪性能的前提下,大大降低了由于模糊规则的增加而带来的计算负担问题.通过与滑模变结构控制的比较,可以认为本文的控制算法是一系列准滑模控制的线性组合,在控制器结构上将滑模变结构控制和模糊自适应控制的优点结合起来,因而能够得到较理想的控制效果.

参考文献(References)

- [1] Slotine J J E, Li W. Composite Adaptive Control of Robot Manipulators[J]. *Automatica*, 1989, 25(4): 509-519
- [2] Chiu K C, Huang S J. An Adaptive Fuzzy Controller for Robot Manipulator[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(2): 151-177.
- [3] Ha Q P, Rye D C, Durrant-Whyte H F. Fuzzy Moving Sliding Mode Control with Application to Robotic Manipulators[J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 607-616
- [4] Miguel A L, Rafael K, Victor S. A Stable Motion Control System for Manipulator via Fuzzy Self-tuning[J]. *Fuzzy Sets and System*, 2001, 124(2): 133-154
- [5] Wang L X. *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1994
- [6] 张化光,王智良,黎明,等.广义双曲正切模型:一个万能逼近器[J]. *自动化学报*, 2004, 30(3): 416-421.
(Zhang H G, Wang Z L, Li M, et al. Generalized Fuzzy Hyperbolic Model: A Universal Approximator [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3): 416-421.)

(下转第1133页)

- Least Squares Support Vector Machines* [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Lte, 2002
- [4] Suykens J A K, De Brabanter J, Lukas L, et al Weighted Least Squares Support Vector Machines: Robustness and Sparse Approximation [J]. *Neurocomputing*, 2002, 48(1-4): 85-105
- [5] Suykens J A K, Vandewalle J. Recurrent Least Squares Support Vector Machines[J]. *IEEE Trans on Circuits Systems — I*, 2000, 47(7): 1109-1114
- [6] 叶美盈, 汪晓东, 张浩然. 基于在线最小二乘支持向量回归的混沌时间序列预测[J]. *物理学报*, 2005, 54(6): 2568-2573
(Ye M Y, Wang X D, Zhang H R. Chaotic Time Series Forecasting Using Online Least Squares Support Vector Machine Regression[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(6): 2568-2573)
- [7] M a J S, James Theiler, Simon Perkins. Accurate Online Support Vector Regression [J]. *Neural Computation*, 2003, 15(11): 2683-2703
- [8] 赵登福, 庞文晨, 张讲社, 等. 基于贝叶斯理论和在线学习支持向量机的短期负荷预测[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(13): 8-13
(Zhao D F, Pang W C, Zhang J S, et al. Based on Bayesian Theory and Online Learning SVM for Short Term Load Forecasting[J]. *Proc of the CSEE*, 2005, 25(13): 8-13)
- [9] Lehel Csato, Manfred Opper. Sparse On-line Gaussian Processes [J]. *Neural Computation*, 2002, 14(3): 641-668
- [10] Chiang J H, Hao P Y. Support Vector Learning Mechanism for Fuzzy Rule-Based Modeling: A New Approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(1): 1-11
- [11] Van Gestel T, Suykens J A K, Baestaens D, et al. Financial Time Series Prediction Using Least Squares Support Vector Machines within the Evidence Framework [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2001, 12(4): 809-821.

(上接第 1123 页)

- [4] M eguerichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, et al. Coverage Problems in Wireless ad-hoc Sensor Networks [A]. *IEEE IN FOCOM* [C]. New York, 2001: 1380-1387.
- [5] A dlakha S, Srivastava M. Critical Density Thresholds for Coverage in Wireless Sensor Networks [A]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conf* [C]. New York, 2003: 1615-1620
- [6] Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404
- [7] M eguerichian S, Koushanfar F, Qu G, et al. Exposure in Wireless ad-hoc Sensor Networks [A]. *Proc of the 7th Int Conf on Mobile Computing and Networking* [C]. Rome, 2001: 139-150
- [8] M egerian S, Koushanfar F, Qu G, et al. Exposure in Wireless ad-hoc Sensor Networks: Theory and Practical Solutions [J]. *J of Wireless Networks*, 2002, 8(5): 443-454
- [9] M arengoni M, Draper B A, Hanson A, et al. System to Place Observers on a Polyhedral Terrain in Polynomial Time [J]. *Image and Vision Computing*, 1996, 18(10): 773-780
- [10] Feng Zhao, Leonidas Guibas. *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach* [M]. Boston: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2004
- [11] Gregg W W, Esaias W E, Feldman G C, et al. Coverage Opportunities for Global Ocean Color in a Multi-mission Era [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1620-1627.

(上接第 1128 页)

- [7] 张化光, 全永兵. 基于模糊双曲正切模型的一类稳定的模糊控制器设计 [J]. *控制与决策*, 2002, 17(6): 956-960
(Zhang H G, Quan Y B. Design of Stable Fuzzy Controller Based on Fuzzy Hyperbolic Model [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(6): 956-960)
- [8] M an Z, Paplinski A P, Wu H R. Robust Tracking Control for Rigid Robotic Manipulators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464-2469
- [9] Salim L, Mohamed S B, Thierry M G. Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear System [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 151(1): 59-77.
- [10] Wang L X. Fuzzy Systems are Universal Approximation [A]. *Proc IEEE Internat Conf Fuzzy Systems* [C]. 1992, 22: 1163-1170