

文章编号: 1000-8152(2002)06-0860-05

机器人间接自适应模糊控制器及其应用*

吴玉香, 王 灏, 毛宗源

(华南理工大学 自动控制工程系, 广州 510641)

摘要: 归纳并证明了机器人间接自适应模糊控制的几个重要特性并阐述了其用于多关节机器人跟踪控制的策略. 对一个具有远程独立电机驱动的双连杆机械臂的仿真结果证实了可行性.

关键词: 最终一致有界; 模糊控制; 机器人轨迹跟踪; 智能控制

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Robot fuzzy indirect adaptive controller and its application

WU Yu-xiang, WANG Hao, MAO Zong-yuan

(Automatic Control Engineering Department, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Several important properties of robot fuzzy indirect adaptive controller are extracted and proved. Their application to an n -link robot manipulator trajectory tracking is also analyzed. Simulation result with a 2-link revolute joint arm with remotely driven link is presented to demonstrate its feasibility.

Key words: uniform ultimate boundedness; fuzzy control; manipulator trajectory tracking; intelligent control

1 前言(Introduction)

机器人的控制问题, 由于其关节间的强耦合和动力学方程的高度非线性, 一直吸引着众多控制界的学者和专家的关注. 现有的理论对基于精确数学模型的控制方法已有较完善的系统性的成果^[1]. 但是对基于系统行为模型的机器人智能控制方法(如模糊控制方法, 神经网络方法等)虽然不断地得到人们的重视^[2], 但到目前为止, 各种方法仍有待进一步完善. 特别是模糊控制, 有的只讨论纯粹的行为模型而忽略了原有数学模型^[2,3]; 有的只讨论离线的用于建模阶段的模糊逻辑系统^[4,5]. 针对上述情况, 本文开发了一种能够以原有的尽管具有不确定性但却含十分宝贵信息的数学模型为基础的模糊控制系统, 并将其运用于多自由度机器人的跟踪控制问题. 该控制方法与其他方法相比显示出独特的潜在优越性.

2 多自由度机器人的间接自适应模糊控制策略(Adaptive indirect fuzzy control strategy for multi-DOF manipulators)

多自由度刚性机器人的动力学特性可由下式来描述:

$$\sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(q) = \tau_k. \quad (2.1)$$

其中, $k = 1, \dots, n$. 写成矩阵形式为:

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + \phi(q) = \tau, \quad (2.2)$$

式中, q 为关节广义坐标, $D(q)$ 为惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ 包括离心力和哥氏力(Coriolis)项, $\phi(q)$ 为重力项, τ 为施加于各关节上的广义力. 以上各向量或矩阵具有适当的维数.

选取状态向量如是: $x_k = q_k; x_{n+k} = \dot{q}_k, k = 1, \dots, n$. 另记: $x_I = [x_1, \dots, x_n]^T, x_{II} = [x_{n+1}, \dots, x_{n+n}]^T$, 利用惯性矩阵 $D(q)$ 的正定性^[1], 则式(1)的状态空间表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_I = x_{II}, \\ \dot{x}_{II} = -D^{-1}(x_I) [C(x_I, x_{II}) + \phi(x_I)] + D^{-1}(x_I) \tau. \end{cases} \quad (2.3)$$

取变换: $u(x_I) = D^{-1}(x_I) \tau$, 记 $f(x_I, x_{II}) = -D^{-1}(x_I) [C(x_I, x_{II}) + \phi(x_I)]$, 则得到宜于实现间接自适应模糊控制的多自由度机器人的模型. 事实上, 它就是解耦控制的标准形式, 也是计算力矩法的标准形式^[1], 即 $\ddot{q} = v$.

注意到上式已完全具有文[6,7]中所讨论的特定形式.

记 $\underline{x} = [x_I^T, x_{II}^T]^T$, $f_j(\underline{x})$ 为 $f(\underline{x})$ 的第 j 维分

* 基金项目: 广东省自然科学基金(011626)资助项目.

收稿日期: 2000-08-20; 收修改稿日期: 2002-06-20.

量, $\xi_j(\underline{x})$ 为系统的模糊基函数, 其对应的参数向量为 $\underline{\theta}_{fj}$ (其第 l 维分量记作 θ_{fl}), $\underline{q}_j^d$ 为 $\underline{q}_j$ 的理想轨迹, 而 $P_j, \underline{b}_{jc}, \underline{k}_j$ 为第 j 关节相应子系统设计参数矩阵或向量, $\underline{e}_j$ 为其误差向量, $j = 1, \dots, n$; γ_{j1} 为参数学习速度因子, I_j 按预先定义的准则实时地在值 0 和 1 之间实施监督切换. 以上各量的具体选取方法可参见文[8].

于是, 我们有下面的结论.

定理(机器人间接自适应模糊控制器) 考虑机器人系统(2.3), 如果能决定函数的界 $f_j^U(\underline{x})$, 即当 $\underline{x}$ 处在可控区域 U_c 时, 有 $|f_j(\underline{x})| \leq f_j^U(\underline{x})$ (为状态的多项式), 式中 $f_j^U(\underline{x}) < \infty, \forall \underline{x} \in U_c$, 施加控制(2.4), 其中确定等价控制 u_{jc} 由式(2.5)给出, 监督控制 u_{js} 由式(2.6)给出, 而模糊系统估值 $\hat{f}_j$ 由式(2.7)给出. 参数向量 $\underline{\theta}_{fj}$ 由自适应律(2.8)来调整. 即:

$$u_j = u_{jc} + u_{js}, \quad (2.4)$$

$$u_{jc} = -\hat{f}_j(\underline{x} | \underline{\theta}_{fj}) + \underline{q}_j^d + \underline{k}_j^T \underline{e}_j, \quad (2.5)$$

$$u_{js} = I_j \operatorname{sgn}(\underline{e}_j^T P_j \underline{b}_{jc}) [|\hat{f}_j(\underline{x} | \underline{\theta}_{fj})| + f_j^U(\underline{x})], \quad (2.6)$$

$$\hat{f}_j(\underline{x}) = \sum_{l=1}^M \theta_{fl} \xi_l(\underline{x}) = \underline{\theta}_{fj}^T \underline{\xi}(\underline{x}), \quad (2.7)$$

$$\dot{\underline{\theta}}_{fj} = -\gamma_{j1} \underline{e}_j^T P_j \underline{b}_{jc} \underline{\xi}_f(\underline{x}), \quad (2.8)$$

那么由此所构成的机器人控制系统具有下面的特性:

特性 1

$$|\underline{\theta}_{fj}| \leq \sqrt{M} \cdot M_{fj}, |\underline{x}| \leq |\underline{x}^d| + \sqrt{\frac{2\bar{V}}{\lambda_{\min 0}}},$$

$$\lambda_{\min 0} = \min(\lambda_{\min 1}, \lambda_{\min 2}, \dots, \lambda_{\min n}),$$

$$|u_j(t)| \leq 2\sqrt{M} \cdot M_{fj} + |\underline{q}_j^d| +$$

$$|\underline{k}_j| \sqrt{\frac{2\bar{V}_j}{\lambda_{\min j}}} + |f_j^U(\underline{x})|.$$

式中, M 是模糊规则库中规则总数, $\lambda_{\min j}$ 是矩阵 P_j 的最小特征值, 且 $\underline{x}^d$ 为理想跟踪状态轨迹, 而 M_{fj} 是参数 θ_{fl} 的约束范围, 即 $|\theta_{fl}| \leq M_{fj}, l = 1, 2, \dots, M$.

特性 2

$$\int_0^t |\underline{e}(t)|^2 dt \leq a + \sum_{j=1}^n b_j \int_0^t |w_j(t)|^2 dt,$$

$$\forall t \geq 0.$$

式中, a, b_j 为常数, 而 w_j 是最小逼近误差.

特性 3 若 w_j 绝对可积, 即 $\int_0^\infty |w_j(t)|^2 dt < \infty$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\underline{e}(t)| = 0$.

特性 4 对于任意误差初始状态 $\underline{e}(t_0) = \underline{e}_0$, $(\underline{e}_0, t_0) \in \mathbb{R}^{2n} \times \mathbb{R}^1$, 系统(2.3)必最终一致有界.

证 特性 1, 2, 3: 考虑到机器人系统为一组相互关联的双积分子系统, 显然为文[6, 7]的一种特例, 故可用类似方法证明[8], 此处从略;

特性 4: 考察第 j 个子系统(即第 j 关节), 设其误差初始状态为 $(\underline{e}_{j0}, t_0) \in \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^1$, 定义椭圆面族(ellipsoids)为:

$$E_j(k) = \left\{ \underline{e}_j \in \mathbb{R}^2 \mid \frac{1}{2} \underline{e}_j^T P_j \underline{e}_j \leq k \equiv \text{Const.} > 0 \right\}.$$

根据文[6, 7], 当 $V_{je} > \bar{V}_j$ 时, 即 $\underline{e}_j \in E_j(\bar{k}), \bar{k} > \bar{V}_j$ 时, 应加入监督控制, 即 $I_j = 1$. 此时, 候选 Lyapunov 函数 $\frac{1}{2} \underline{e}_j^T P_j \underline{e}_j$ 单调递减, 则利用矩阵特征值的关系式有

$$0 < \lambda_{\min j} \cdot \|\underline{e}_j(t)\|^2 \leq \underline{e}_j^T(t) P_j \underline{e}_j(t) \leq \underline{e}_{j0}^T P_j \underline{e}_{j0} \leq \lambda_{\max j} \|\underline{e}_{j0}\|^2. \quad (2.9)$$

当 $V_{je} \leq \bar{V}_j$ 时, 即 $\underline{e}_j \in E_j(\bar{V}_j)$ 时, 应取消监督控制, 即 $I_j = 0$. 同理, 有

$$0 < \lambda_{\min j} \cdot \|\underline{e}_j(t)\|^2 \leq \underline{e}_j^T(t) P_j \underline{e}_j(t) \leq 2\bar{V}_j. \quad (2.10)$$

综合式(2.9), (2.10), 则得对于 $\underline{e}_j(t), t \in [t_0 + \infty)$ 的界:

$$d_j(\underline{e}_{j0}) = \begin{cases} \|\underline{e}_{j0}\| \sqrt{\frac{\lambda_{\max j}}{\lambda_{\min j}}}, & \underline{e}_{j0} \in E_j(\bar{k}), \bar{k} > \bar{V}_j, \\ \sqrt{\frac{2\bar{V}_j}{\lambda_{\min j}}}, & \underline{e}_{j0} \in E_j(\bar{V}_j). \end{cases} \quad (2.11)$$

根据文[6, 7], 当 $V_{je} > \bar{V}_j$ 时, 即 $\underline{e}_j \in E_j(\bar{k}), \bar{k} > \bar{V}_j$ 时, 候选 Lyapunov 函数的导数为

$$\dot{V}_{je} = -\frac{1}{2} \underline{e}_j^T Q_j \underline{e}_j + \underline{e}_j^T P_j \underline{b}_{jc} [\hat{f}_j(\underline{x} | \underline{\theta}_{fj}) - f_j(\underline{x}) - u_{js}]. \quad (2.12)$$

记

$$c_0 = \min \left\{ \frac{1}{2} \underline{e}_j^T Q_j \underline{e}_j - \underline{e}_j^T P_j \underline{b}_{jc} [\hat{f}_j(\underline{x} | \underline{\theta}_{fj}) - f_j(\underline{x}) - u_{js}] \mid \underline{e}_j \in E_j(k_0) \setminus \text{int}[E_j(\bar{V}_j)] \right\},$$

式中, $k_0 = \frac{1}{2} \underline{e}_{j0}^T P_j \underline{e}_{j0}, \text{int}[E_j(\bar{V}_j)]$ 表示 $E_j(\bar{V}_j)$ 的内部(interior). 由于所选择的监督控制能使 V_{je} 一直减小, 直至 $\underline{e}_j$ 到达 $E_j(\bar{V}_j)$ 的边界(boundary), 即 $\underline{e}_j \in \text{Bd}[E_j(\bar{V}_j)]$, 则这一段误差状态转移的时间间隔为

$$\bar{t} - t_0 \leq \frac{k_0 - \bar{V}_j}{c_0}. \quad (2.13)$$

考虑到当 $V_{je} \leq \bar{V}_j$ 时, 即 $e_j \in E_j(\bar{V}_j)$ 时, 转移时间为 0 的事实, 综合得转移时间为

$$T_j(e_{j0}, E_j(k_0)) = \begin{cases} \frac{k_0 - \bar{V}_j}{c_0}, & e_{j0} \in E_j(\bar{k}), \bar{k} > \bar{V}_j, \\ 0, & e_{j0} \in E_j(\bar{V}_j). \end{cases} \quad (2.14)$$

最后, 综合所有关节的误差状态 e_j , 则系统 (2.3) 的误差状态在不超过 $T(e_0, E(\sum_{j=1, \dots, n} k_{j0})) = \max_{j=1, \dots, n} \{T_j(\cdot)\}$ 的时间间隔内, 以 $d(e_0) = \sqrt{\sum_{j=1, \dots, n} d_j^2(e_{j0})}$ 为界. 根据定义^[1], 得证.

3 仿真实验 (Simulation experiment)

为验证本方案的可行性, 取文[1]中的具有远程驱动的双连杆机械手来做仿真, 见图 1. 其特点是: 第 2 关节由一个独立的电机驱动, 且其动力学特性既有两转动关节的相互耦合作用又不致过于繁杂. 其关节变量选取及动力学方程如下:

$$\begin{aligned} d_{11}\ddot{p}_1 + d_{12}\ddot{p}_2 + c_{221}\dot{p}_2^2 + \phi_1 &= \tau_1, \\ d_{12}\ddot{p}_1 + d_{22}\ddot{p}_2 + c_{112}\dot{p}_1^2 + \phi_2 &= \tau_2, \\ d_{11} &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1, \\ d_{12} &= m_2 l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1), \\ d_{21} &= d_{12}, d_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2, \\ c_{221} &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1), \\ c_{112} &= m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1), \\ \phi_1 &= (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1, \\ \phi_2 &= m_2 l_{c2} g \cos p_2. \end{aligned}$$

式中, 第 1, 第 2 关节在工作空间中的转角分别为 p_1, p_2 ; 所受力矩分别为 τ_1, τ_2 ; 重力项分别为 ϕ_1, ϕ_2 , $d_{ijk} (i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1, 2)$ 为 Christoffel 符号^[1]. 用于仿真的具体物理数据见表 1.

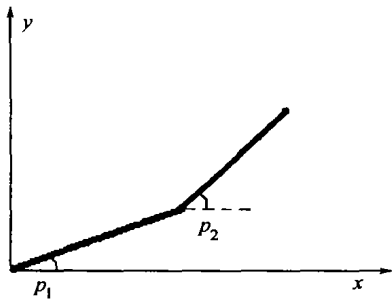


图 1 双连杆机械臂
Fig. 1 2-link manipulator

表 1 机械臂物理数据 (重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$)

Table 1 Physical parameters of the manipulator

	质量	长度	质心位置	转动惯量
	m_i/kg	l_i/m	l_{ci}/m	I_i/kgm^2
连杆 $i = 1$	32	0.5	$l_1/2$	19.48
连杆 $i = 2$	6	0.4	$l_2/2$	18.55

为确定相应的界 $f_j^U(\underline{x}), j = 1, 2$, 需计算解耦形式的动力学方程:

$$\begin{aligned} \Delta &= d_{11}d_{22} - d_{21}^2 = \\ &= m_1 m_2 l_{c1}^2 l_{c2}^2 + m_1 l_{c1}^2 I_2 + m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 + m_2 l_1^2 I_2 + \\ &= m_2 I_1 l_{c2}^2 + I_1 I_2 - m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 \cos^2(p_2 - p_1), \\ \dot{p}_1 \cdot \Delta &= \\ &= -m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 \cos(p_2 - p_1) \sin(p_2 - p_1) \dot{p}_1^2 - \\ &= (m_2^2 l_1 l_{c2}^3 + m_2 l_1 l_{c2} I_2) \sin(p_2 - p_1) \dot{p}_1^2 + \\ &= (m_2 l_{c2}^2 + I_2) (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1 - \\ &= m_2^2 l_1 l_{c2}^2 g \cos(p_2 - p_1) \cos p_2, \\ \dot{p}_2 \cdot \Delta &= \\ &= m_2 l_1 l_{c2} (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1) \sin(p_2 - p_1) \dot{p}_1^2 + \\ &= m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 \cos(p_2 - p_1) \sin(p_2 - p_1) \dot{p}_2^2 - \\ &= m_2 l_1 l_{c2} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos(p_2 - p_1) \cos p_1 + \\ &= m_2 l_{c2} g (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1) \cos p_2. \end{aligned}$$

由惯性矩阵 $D(q)$ 的正定性, 可得多项式有界性 (polynomial boundedness) 的估算:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &\leq \\ &= \frac{1}{\Delta} [m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 \dot{p}_1^2 / 2 + (m_2^2 l_1 l_{c2}^3 + m_2 l_1 l_{c2} I_2) \dot{p}_2^2 + \\ &= (m_2 l_{c2}^2 + I_2) (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g + m_2^2 l_1 l_{c2}^2 g], \\ \dot{p}_2 &\leq \\ &= \frac{1}{\Delta} [m_2 l_1 l_{c2} (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1) \dot{p}_1^2 + m_2^2 l_1^2 l_{c2}^2 \dot{p}_2^2 / 2 + \\ &= m_2 l_1 l_{c2} (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g + m_2 l_{c2} g (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1)]. \end{aligned}$$

设理想跟踪轨迹为: $q_1^d = q_2^d = \frac{\pi}{30} \sin t$ (弧度), $t \in [0, \pi]$. 对 $q_i \in [-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}] (i = 1, 2)$ 的自变量论域均匀划分为 5 个模糊值. 例如, 对应于第 1 关节 q_1 , 其隶属度函数可取为下式:

$$\mu_{F_{1j_1}}^l = e^{-\left[\frac{p_1 + \pi/6 - (\pi/12) \cdot (j_1 - 1)}{\pi/24}\right]^2},$$

其中 $j_1 = i = 1, 2, \dots, 5$; 上标 l 表示规则库中的规则序号; p_1 为第 1 关节的初始值 (例如: 可取

625)个辅助状态变量.在此情况下,若采用乘积形式的推理机制,则模糊基函数 FBF 可取为下式:

$$\xi_l(\underline{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{i,j_i}^l(x_i)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{i,j_i}^l(x_i)}.$$

仿真采用 Runge-Kutta 5 积分法,最小步长为

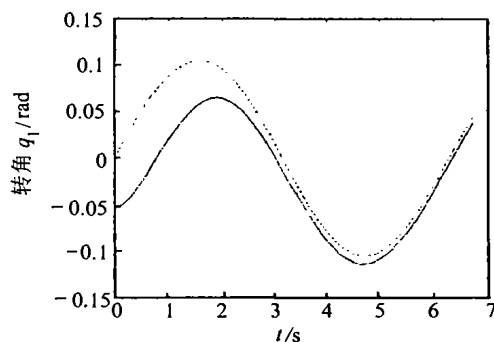


图2 第1关节角度轨迹
Fig. 2 Angular trajectory at link 1

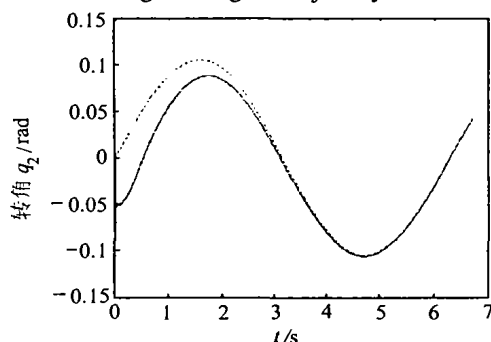


图4 第2关节角速度轨迹
Fig. 4 Angular trajectory at link 2

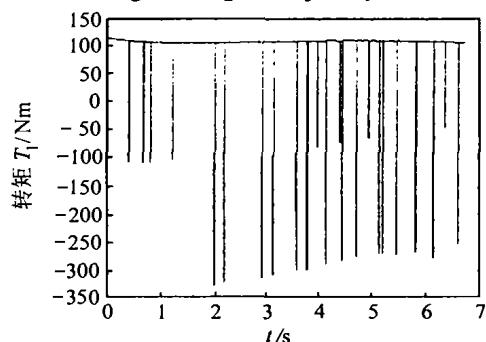


图6 第1关节转矩
Fig. 6 Torque at link 1

0.001秒,最大步长为 10 秒,精度为 10^{-6} 弧度.在一台内存为 16 兆的 586 计算机上连续运行约 60 小时,仿真时间范围 $t \in [0, 2\pi]$ (单位:秒),初始状态取为 $\underline{x}_0 = [-\frac{\pi}{60}, 0, -\frac{\pi}{60}, 0]^T$,取 $\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = 0.0050$.

仿真结果见图 2~7.由此可看出误差的逐步收敛趋势(虚线为理想轨迹).

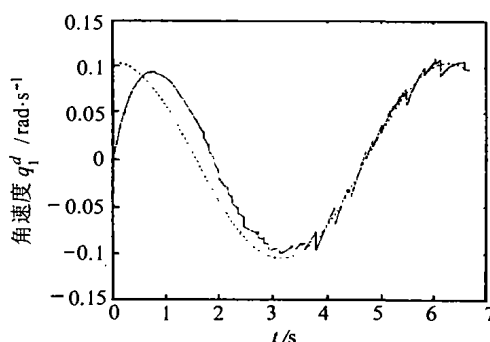


图3 第1关节角速度轨迹
Fig. 3 Velocity trajectory at link 1

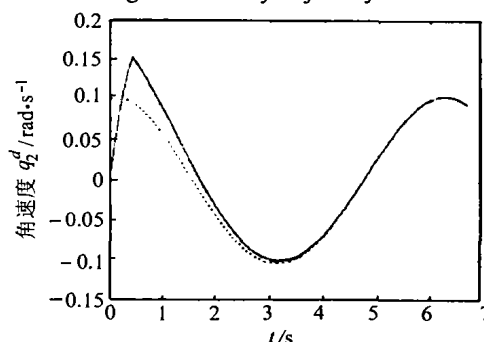


图5 第2关节角速度轨迹
Fig. 5 Velocity trajectory at link 2

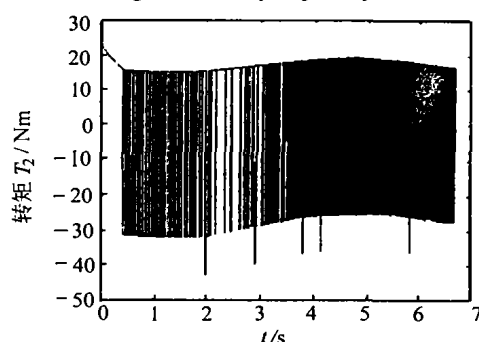


图7 第2关节转矩
Fig. 7 Torque at link 2

4 结语(Conclusions)

由仿真结果看,该方法具有较好的输出性能.但是从仿真所需时间来看,该方法耗时长.但由本方案的结构可知,除 FBF(模糊基函数)的求取需统一计算外,其后的步骤均具有独立性,故当采用并行处理的方法时,速度将会大大提高,因此该方法具有一定的可实现性.如果考虑到所选用的模糊逻辑系统对

于自适应参数的线性性,在得出多项式函数界之后可逐项分别进行参数初值的设定,则本方案将更具可操作性.即 $\theta_f = \sum_i \theta_{f,i}$, $f_k = \sum_i \theta_{f,i}^T \xi(\underline{x})$. 因此间接自适应模糊控制能够以控制对象原有的尽管含有不确定性但却含十分宝贵信息的数学模型或行为模型来进行控制,与常规的控制方法(如 PID 控制)相比,具有更佳的控制效果.

不确定性但却含十分宝贵信息的数学模型或行为模型来进行控制,与常规的控制方法(如 PID 控制)相比,具有更佳的控制效果.

另外由仿真输出可知,系统的输出抖振较大.如何结合现有的相关成果,以进一步削弱抖振的幅度和频率,是下一步的努力方向.同时由于所选变换 $u(x_I) = D^{-1}(x_I)\tau$ 仅为位置的函数,故可采用文[5]的方法来调整参数.但严格地说,此时的系统应表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_I = x_{II}, \\ \dot{x}_{II} = f(x_I, x_{II}) + u + h. \end{cases}$$

因此可考虑在原有的控制中再加上鲁棒稳定修正项,即: $u_j = u_{jc} + u_{js} + \Delta u_j$. 关于鲁棒稳定性的讨论,已有一些成果,这也是今后有待研究的方向之一.

参考文献(References)

- [1] Spong M W, Vidyasagar. Robot Dynamics and Control [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2001
- [2] Novakovic B, Scap D, Novakovic D, An adaptive fuzzy logic control synthesis and applications in robotics [A]. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. 1999, 6, 150 - 155
- [3] Abreu A, Correia L. A fuzzy behavior-based architecture for decision control in autonomous vehicles [A]. IEEE International Symposium on Intelligent Control [C]. 2001, 370 - 375
- [4] Chen L H, Chiang C H, Yuan J. New approach to adaptive control architecture based on fuzzy neural network and genetic algorithm [A]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. 2001, 1, 347 - 352
- [5] Gao Y, Meng J E, Song Y. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy neural networks [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2001, 48(6):1274 - 1278
- [6] Wang H, Mao Z Y, Zhou Q J. MIMO indirect adaptive fuzzy control (I) [A]. The Chinese Fifth Conference of Robotic [C]. Harbin, 1997, 397 - 407 (in Chinese)
- [7] Wang H, Mao Z Y, Zhou Q J. MIMO indirect adaptive fuzzy control (II) [A]. The Chinese Fifth Conference of Robotic [C]. Harbin, 1997, 397 - 407 (in Chinese)
- [8] Wang H, Mao Z Y. Robot Intelligent Control [M]. Beijing: National Defence Industrial Publishing Company, 2002 (in Chinese)

本文作者简介

吴玉香 1968 年生. 硕士. 讲师. 现在华南理工大学自动控制工程系任教. 主要从事智能控制及电机拖动方面的教学及应用研究.

Email: yxwu_6801@163.com

王 灏 1964 年生. 博士. 现任职西门子广州公司.

毛宗源 见本刊 2002 年第 1 期第 56 页.