文章编号:1673-0062(2009)01-0061-05

## 多关节机器人的自学习模糊全局滑模控制

李军红<sup>1</sup>,欧阳利军<sup>2</sup>,刘 华<sup>1</sup>

(1. 南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 计算机科学与技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:针对模型不确定性多关节机器人的轨迹跟踪控制问题,研究多关节机器人全 局滑模控制,为了削弱系统在滑动模态上的抖振,将模糊控制和全局滑模控制相结 合,提出一种自学习模糊全局滑模控制方法.该方法利用模糊系统的输出代替全局滑 模控制中的非连续开关切换量,并根据滑模变结构原理,设计自学习算法,动态调整 模糊隶属函数的参数。通过对2关节机器人的仿真,结果表明在存在模型误差和外 部扰动的情况下,该方法既能达到快速跟踪,又能很好地消除控制器的抖振. 关键词:机器人;全局滑模控制;模糊控制 中图分类号:TP273 文献标识码:A

# Global Fuzzy Self – learning Sliding Mode Control for Multi – link Robot Manipulators

## LI Jun-hong<sup>1</sup>, OUYANG Li-jun<sup>2</sup>, LIU Hua<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;2. School of Computer Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In this paper global sliding control for multi – link robot manipulators is studied and a global fuzzy self – learning sliding mode controller is proposed, which combines fuzzy control and global sliding control to restrain the chattering around the sliding plane. The output of a fuzzy control system is substituted for the non – continuous switching Control volume and a self – learning algorithm is devised to regulate the fuzzy membership functions parameters according to the sliding mode variable structure theory. Some simulation results of a two – link robotic manipulator show that the control scheme can achieve tracking effect with high precision and speediness, as well as eliminate chattering of control under the condition of existing model error and external disturbances.

Key words: robot; global sliding mode control; fuzzy control

基金项目:湖南省教育厅基金资助项目(08C752;06C728).

作者简介:李军红(1971-),男,湖南耒阳人,南华大学电气工程学院讲师,硕士.主要研究方向:智能控制.

收稿日期:2009-01-08

机器人系统是一个十分复杂的多输入多输出 非线性系统,具有时变、强耦合和非线性动力学特 性,其控制十分复杂。滑模控制因其对系统参数 摄振和外干扰具有完全适应性而得到控制界的重 视,并被广泛用于机器人控制中。目前大多研究 的是传统滑模控制在机器人系统中的应用[1-6], 而对机器人全局滑模控制的研究甚少,也很少有 这方面的研究成果。传统滑模变结构系统的响应 包括趋近模态和滑动模态两部分,该类系统的鲁 棒性仅存在于滑动模态阶段,在趋近模态阶段不 具有鲁棒性;换言之,系统的动力学特性在响应的 全过程并不都具有鲁棒性。全局滑模控制可以保 证系统从任意初始状态开始就处在滑动模态阶 段,系统不存在趋近模态阶段,全局具有鲁棒性。 本文研究多关节机器人全局滑模控制,提出一种 自学习模糊全局滑模控制方法,通过对2关节机 器人仿真,结果表明该方法不仅有效削弱了系统 的抖振,而且对模型误差和外干扰具有很强的鲁 棒性。

1 机器人全局滑模控制器

 计算力矩控制 对于具有 n 个旋转关节的 刚性机器人,其动态性能可由以下二阶非线性微 分方程描述<sup>[7]</sup>:

 $M(q)q + C(q,q)q + G(q) = \tau + d(t)$  (1) 式中:q,q,q  $\in R^{n}$ ,分别表示关节角位置矢量、速 度矢量及加速度矢量, $M(q) \in R^{n \times n}$ 为机器人惯 量矩阵, $C(q,q) \in R^{n}$ 表示向心力、哥氏力,G(q) $\in R^{n}$ 代表重力项, $\tau \in R^{n}$ 是关节控制力矩,d(t)是扰动信号。

对系统(1),假定己知M(q)、C(q,q)和h(q, q)q)中的可建模部分 $M_0(q)$ 、C(q,q)和h(q,q),则

$$M(q) = M_0(q) + \Delta M(q)$$
 (2)

$$C(q,q) = C_0(q,q) + \triangle C(q,q) \tag{3}$$

$$G(q) = G_0(q) + \Delta G(q) \tag{4}$$

其中  $\Delta M(q)$ 、 $\Delta C(q,q)$ 、 $\Delta G(q)$ 为不确定部分。 将式(2)、(3) 和(4) 代人式(1) 则动力学方程可 写为:

$$M_0(q)q + C_0(q,q)q + C_0(q) = \tau(t) + \rho(t)$$
(5)

式中: $\rho(t) = -\Delta M(q)\dot{q} - \Delta C(q,\dot{q})\dot{q} - \Delta G(q)$ + d(t)为广义扰动,且 $\rho(t)$ 有界。

假设机器人关节的期望运动轨迹为 q<sub>d</sub>,误差

向量为:

$$e = q - q_d \tag{6}$$

按照计算力矩方法,选择关节控制力矩为:

 $\tau = M_0(q) \left[ q_d - K_V e - K_P e \right] +$ 

$$C_0(q,q)q + G_0(q)$$
 (7)

如果没有外部干扰和模型误差即 ρ(t),则由式 (5) 和式(7) 式可得

$$e + K_V e + K_P e = 0 \tag{8}$$

按照稳定性理论,选择合适的 K<sub>v</sub> 和 K<sub>p</sub>,跟踪 误差将渐近收敛至零。然而在实际情况下系统的 结构和参数都存在着极大的不确定性,并且伴有 未知干扰的影响,则

$$e + K_V e + K_P e = M_0^{-1}(q)\rho(t)$$
 (9)

由式(9) 可知,不管如何设置 K<sub>v</sub> 和 K<sub>p</sub>,系统 跟踪误差不可能收敛至零,甚至系统是不稳定的, 计算力矩控制器已不能达到期望的效果。

2) 滑模补偿控制器 定义如下新控制律:

$$\tau = \tau + \tau_{sw} \tag{10}$$

式中 r 如式(7) 所描述, r 加为滑模补偿控制量。 取滑模切换函数为:

$$S(t) = \int_{0}^{t} (e + K_{V}e + K_{P}e) dt$$
  
=  $(e(t) - e(0)) + K_{V}(e(t) - e(0)) + K_{P}\int_{0}^{t} e(t) dt$   
=  $(e(t) + K_{V}e(t)) + K_{P}\int_{0}^{t} e(t) dt - (e(0) + K_{V}(0)) = 0$  (11)

当系统到达滑模切换面,则

 $\dot{S}(t) = \dot{e} + K_{\nu}\dot{e} + K_{P}e \qquad (12)$ 

系统跟踪误差将渐近收敛至零。

另外,式(11) 描述的滑模切换面经过误差相 平面原点和初始点(e(0),e(0))所以系统从一开 始就处在滑动模态,不存在到达阶段,属于全局滑 模控制,系统鲁棒性更强。取滑模补偿控制量  $\tau_w$ 为:

$$\tau_{sw} = -M_0(q) \Psi \text{sgn}(S) \tag{13}$$

式中  $\operatorname{sgn}(S) = [\operatorname{sgn}(s_1), \cdots, \operatorname{sgn}(s_n)]^{\mathsf{T}}$ 

 $\Psi = \text{diag}(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$ 为 $n \times n$ 阶正定矩阵 由式(5),式(10),式(13)可以推导出

$$\ddot{e} + K_{v}e + K_{p}e = M_{0}^{-1}(q)(\rho(t) - M_{0}(q)\Psi sgn(S))$$
 (14)

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}S^{\mathrm{T}}S \tag{15}$$

式(15) 对时间求导得

$$V = S^{T}S$$
  
=  $S^{T}(e + K_{v}e + K_{p}e)$   
=  $S^{T}[M_{0}^{-1}(q)(\rho(t) - M_{0}(q)\Psi \text{diag}(S))]$   
=  $S^{T}[M_{0}^{-1}(q)\rho(t)] - \sum_{i=1}^{n} \psi_{i} | s_{i} |$   
(16)

$$\psi_i = \left[ \left[ M_0^{-1}(q) \rho(t) \right]_i \right]_i + \eta_i \tag{17}$$

其中  $\eta_i$  为很小的正数,  $[M_0^{-1}(q)\rho(t)]_i$  为矢量  $M_0^{-1}(q)\rho(t)$  的第i个分量(后面叙述中类似情况 不再作说明),则

$$V \leq -\sum_{i=1}^{n} \eta_i \mid s_i \mid$$
(18)

满足滑动模态可达条件。

## 2 自学习模糊全局滑模控制器

### 2.1 模糊系统

采用式(13) 变结构控制策略,必须知道广义 扰动 $\rho(t)$  各分量的上界。然而,在实际系统中广 义扰动各分量的上界是很难预先知道的,这样参 数 $\psi_i(i = 1, 2, ..., n)$  的选择很难,过大的 $m_i$  引起 非连续切换控制量( $\tau_{sw}$ ) 过大,会给系统带来太大 抖振;过小的 $m_i$  又不足以补偿各种不确定因素的 影响。为解决此问题,本文考虑利用模糊系统非线 性函数任意精度逼近的性质,设计一个自学习模 糊逻辑系统逼近非连续切换控制量( $\tau_{sw}$ ),不至于 使切换量过大,有效抑制滑模切换面上的抖振。

模糊系统的输入为 $S = (s_i, s_2, \dots, s_n)^T$ ,输出 为 $\tau_{sw} = (\tau_{sw1}, \tau_{sw2}, \dots, \tau_{swn})^T$ 。模糊规则形式如下<sup>[2]</sup>

 $R_i^l$ :若 $S_i$ 为 $A_i^l$ ,则 $\tau_{swi}$ 为 $B_i^l$ 其中 $i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, N_i$ 

 $A_i^l$ 和  $B_i^l$ 是输入量和输出量的模糊子集。 $A_i^l$ 和  $B_i^l$ 的隶属函数分别为 $\mu_{A_i^l}$ 和  $\mu_{B_j^l},\mu_{A_i^l}$ 采用高斯型函数,描述如下

$$\mu_{A_{i}^{l}} = \exp(-\frac{s_{i} - \theta_{il})^{2}}{\sigma_{il}^{2}})$$
(19)

为简单起见,µ<sub>B</sub>;采用单点模糊化函数,ω<sub>i</sub>是µ<sub>B</sub>最 大值所对应的点。采用乘积推理和中心平均值反 模糊化方法,则第 i 个模糊控制器的输出为

$$\tau_{inci} = \frac{\sum_{l=1}^{N_i} \omega_{il} \mu_{A_i^l}(S_i)}{\sum_{l=1}^{N_i} \mu_{A_i^l}(S_i)} \\ = \frac{\sum_{l=1}^{N_i} \omega_{il} \exp(-\frac{(s_i - \theta_{il})^2}{\sigma_{il}^2})}{\sum_{l=1}^{N_i} \exp(-\frac{(s_i - \theta_{il})^2}{\sigma_{il}^2})} = \frac{a_i}{b_i} \quad (20)$$

$$\mathfrak{T} \oplus b_i = \sum_{l=1}^{l} Z_l, a_i = \sum_{l=1}^{l} \omega_{il} z_l$$

$$Z_l = \mu_{\lambda_i^l}(S_i) = \exp(-\frac{(s_i - \theta_{il})^2}{\sigma_{il}^2})$$

2.2 学习算法

根据广义滑模条件 SS 和减小抖振幅值的原则,应该沿着使 SS 值减小的方向调整  $\omega_u \circ \sigma_u^2$  和  $\theta_u$ 。也就是说,调整控制器以满足滑模条件,使切 换函数收敛到零,并最终保持滑动模态。下面采取 梯度下降法来对权值  $\theta_u$ 进行调整。

$$\Delta \theta_{ii} = -\eta \nabla_{\theta_{ii}} S^{\mathrm{T}}(t) \dot{S}(t) = -\eta \frac{\partial S^{\mathrm{T}}(t) S(t)}{\partial \theta_{ii}}$$

$$-\eta \frac{\partial S(t)S(t)}{\partial \tau_{swi}} \frac{\partial \tau_{swi}}{\partial \theta_{il}}$$
(21)

$$\begin{aligned} \frac{\partial S^{\mathrm{T}}(t) \dot{S}(t)}{\partial \tau_{swi}} &= S^{\mathrm{T}}(t) \frac{\partial \dot{S}(t)}{\partial \tau_{swi}} \\ &= S^{\mathrm{T}}(t) \frac{\partial [M_{0}^{-1}(q) (\rho(t) - M_{0}(q) \Psi \mathrm{sgn}(S))]}{\partial \tau_{swi}} \\ &= [S^{\mathrm{T}}(t) \frac{\partial [M_{0}^{-1}(q) (\rho(t) - M_{0}(q) \Psi \mathrm{sgn}(S))]}{\partial \tau_{swi}} \\ &= [S^{\mathrm{T}}(t) M_{0}^{-1}(q)]_{i} \end{aligned}$$
(22)

由式(20) 可知

$$\frac{\partial \tau_{swi}}{\partial \theta_{il}} = \frac{\partial}{\partial z_l} \left(\frac{a_i}{b_i}\right) \frac{\partial z_l}{\partial \theta_{il}}$$

$$= \left(\frac{1}{b_i} \frac{\partial a_i}{\partial z_l} + a_i \frac{\partial}{\partial z_l} \left(\frac{1}{b_i}\right)\right) \left(2z_l \frac{s_i - \theta_{il}}{\sigma_{il}^2}\right)$$

$$= \left(\frac{\omega_{il}}{b_i} - \frac{a_i}{b_i^2}\right) \left(2z_l \frac{s_i - \theta_{il}}{\sigma_{il}^2}\right)$$

$$= 2z_l \frac{\left(\omega_{il} - \tau_{swi}\right)\left(s_i - \theta_{il}\right)}{b_i \sigma_{il}^2}$$

于是

$$\Delta \theta_{il} = -\eta \frac{2z_l(\omega_{il} - \tau_{nvi})(s_i - \theta_{il})}{b\sigma_{il}^2} [S^{\mathrm{T}}(t)M_0^{-1}(q)]_i$$

(23)

同理可推导出

$$\Delta \sigma_{il} = -\eta \frac{2z_l (\omega_{il} - \tau_{swi}) (s_i - \theta_{il})^2}{b_i \sigma_{il}^3} [S^{\mathrm{T}}(t) M_0^{-1}(q)]_i$$
(24)

$$\Delta \omega_{il} = -\eta \, \frac{z_l}{b_i} [S^{\mathrm{T}}(t) M_0^{-1}(q)]_i \qquad (25)$$

式(23)、(24)和(25)为模糊系统各参数调整自 学习算法。

## 3 仿真结果

为了验证本文设计的控制器的效果,引用文 献[8]中的一个2关节机器人的仿真例子。其动 力学方程如下:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11}(q_{2}) & \alpha_{12}(q_{2}) \\ \alpha_{21}(q_{2}) & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{1} \\ q_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\beta_{12}(q_{2})q_{1}^{2} - 2\beta_{12}(q_{2})q_{1}q_{2} \\ \beta_{12}(q_{2})q_{2}^{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{1}(q_{1},q_{2})g \\ \gamma_{1}(q_{1},q_{2})g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{1} \\ \tau_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{1}(t) \\ d_{2}(t) \end{bmatrix}$$
(26)

其中,

 $\alpha_{11}(q_2) = (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos q_2 + J_1;$ 

$$\alpha_{12}(q_2) = \alpha_{21}(q_2) = m_2 r_2^2 + m_2 r_1 r_2 \cos q_2$$

 $\begin{aligned} \alpha_{22} &= m_2 r_2^2 + J_2; \beta_{12}(q_2) = m_2 r_1 r_2 \sin q_2 \\ \gamma_1(q_1, q_2) &= (m_1 + m_2) r_1 \cos q_2 + m_2 r_2 \cos(q_1 + q_2) \\ \gamma_2(q_1, q_2) &= m_2 r_2 \cos(q_1 + q_2) \\ d_1(t) &= d_1(t) = 0.5 \sin(\pi \cdot t) \\ \text{期望轨迹为}; q_{1d} &= 4 \sin(t), q_{2d} = 2 \sin(t); \end{aligned}$ 

系统参数选择为: $r_1 = 1 \text{ m}, r_2 = 0.8 \text{ m}, g =$ 9.8, $J_1 = J_2 = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, m_1 = 0.5 \text{ kg}, m_2 = 1.5 \text{ kg};$ 

仿真时各参数选择: $K_p = \text{diag}(31,35), K_v = \text{diag}(60,80), \psi = \text{diag}(5,5), \alpha = \eta = 0.5; 系统$  $模型不确定部分 <math>\Delta M, \Delta C, \Delta G$  均在标称值左右 随机浮动 ±5%。模糊控制规则及各模糊子集隶属 函数的选择参见文献<sup>[2]</sup>。

全局滑模控制器的仿真结果如图 1 所示;自 学习模糊全滑模控制的仿真结果如图 2 所示。比 较图 1(c)和图 2(c),实线表示期望轨迹,虚线表 示实际轨迹,由图可以看出,自学习模糊全局滑模 控制器跟踪效果优于全局滑模控制,两个控制器 抗干扰能力均很强;从图 1(a)、(b)与图 2(a)、 (b)可以看出,自学习模糊全局滑模控制中几乎 没有抖振,而全局滑模控制中存在高频抖振。



(a)关节1的控制输入
 (b)关节2的控制输入
 (c)关节1和关节2的跟踪效果
 图2 机器人自学习模糊全局滑控制输入和轨迹跟踪

Fig. 2 Control input and trajectory track of the global fuzzy self - learning sliding mode controller

### 4 结束语

本文在经典的计算力矩法基础上,针对存在模型误差和外部扰动情况下的机器人系统提出了一种自学习模糊全局滑模控制方法,并将其成功应用于2关节机器人轨迹跟踪控制中,仿真结果验证了所提出方法的有效性和可行性。但该方法要求控制器硬件具有更大的输出范围,增加了硬件的开销。如何在不增加硬件要求的前提下实现自学习模糊全局滑模控制方法需要今后继续研究。

#### 参考文献:

- [1] 林 雷. 基于模糊变结构的机械臂控制[J]. 控制理 论于应用,2007,24(4):643-645.
- [2] 孙炜伟,武玉强.机器人操作器的自适应模糊滑模控制器设计[J].控制理论于应用,2007,23(3):397 402.
- [3] Chih Lyang Hwang, Hung Yueh Lin. A Fuzzy Decentralized Variable Structure Tracking Control with Optimal and Improved Robustness Designs Theory and Applica-

tions[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2005, 12(5): 615-630.

- [4] Gou Y Z, Woo P Y. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Robotic Manipulators [C]//Proc of the 42rd IEEE Int Conf on Decision and Control. Maui, Hawaii, 2003: 2174-2179.
- [5]陈 丽,陈卫东,王洪瑞.改进的机器人神经网络变结构混合控制[J].系统工程与电子技术,2006,28
   (3):429-430.
- [6] 邹小兵,蔡自兴,孙国荣.基于变结构的移动机器人侧向控制器的设计[J].中南大学学报,2004,35(2):
   262-267.
- [7] Feng Yong, Yu Xinghuo, Man Zhihong. Non singular Terminal Sliding Mode Control of Rigid Manipulators
   [J]. Automatica (S0005 - 1098), 2002, 38 (12): 2159 - 2167.
- [8] Man Z H, Papl Inski A P, Wu H R. A Robust MIMO Terminal Sliding Mode Control Scheme for Rigid Robotic Manipulators [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994,39 (12):2464-2469.

#### (上接第51页)

2)最新冶轧的 TLM1#、TLM2#、TLM3#、TLM4 #-Φ22×5 mm 新型冷拔无缝钢管,是国内首创 的锚杆钻杆专用无缝钢管,其性价比指标居国内 领先水平.

3) 锚杆钻车施工发现, 钻杆与钻头的连接方 式, 与澳大利亚原装产品相比, 装卸钻头更方便, 但连接部分仍然是该钻具系统的一个薄弱环节. 生产中仍然有钻头脱落, 或钻头穿过坚硬夹层发 热损坏导致钻杆六方梢损坏等现象发生, 且钻头 裤体较长, 粗径部分增加了回转阻力, 对钻速与钻 头寿命有不利影响, 应可改用方牙螺纹连接, 或更 进一步在不断提高钻杆、钻头寿命的基础上, 按照 平均寿命超过 500 m 的目标,利用磨擦焊接技术 研发新一代整体锚杆钻具.

#### 参考文献:

- [1] 张国榉. 凿岩钎具的设计、制造和选用[M]. 长沙:湖 南科学技术出版社,1986.
- [2] GB/T8162—1999 中华人民共和国国家标准:结构用 无缝钢管[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [3] GB/T3077—1999 中华人民共和国国家标准:合金结构钢[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [4]张国榉. 超纯、超细、窄带 Cr Ni W Mo V 系列
   "穿孔 全程带芯纵轧法"中空钎钢[J]. 矿山机械,
   2004,31(6):8-11.