

液压伺服关节自适应模糊神经网络控制补偿方法

朱兴龙, 周骥平

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 三自由度液压伺服关节在实现位置跟踪时存在跟踪误差, 原因在于液压伺服关节是一个具有饱和、结构死区和强耦合的动力学系统. 为了解决这一问题, 建立了该关节的动力学模型. 通过比较几种控制方法在该关节位置跟踪问题上存在的不足, 提出了一种自适应模糊神经网络控制补偿方法. 该方法采用样本训练自学习, 自适应调整增益系数. 该方法不但消除了饱和、结构死区和强耦合引起的位置跟踪误差, 而且解决了控制向量在大范围内变化实现准确位置跟踪. 最后, 通过仿真试验验证了该动力学系统是稳定的, 提出的方法是可行的.

关键词: 控制补偿方法; 自适应模糊神经网络; 液压伺服关节; 机器人

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Control compensation methods for hydraulic servo joint with adaptive-network-based fuzzy inference system

ZHU Xing-long, Zhou Ji-ping

(Institute of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009, China)

Abstract: Tracking errors occur during the position tracking because the three degrees of freedom (d.o.f.) hydraulic servo joint is a nonlinear dynamic system with saturation, dead band and stroke coupling. In order to solve this problem, the dynamic model of the joint is established. A control compensation method with adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) is presented by comparing the advantages and disadvantages of several control methods in position tracing problem. The method enables to adjust the alterable gain coefficients by the sample data sets training and self-learning. The position tracking errors, caused by saturation, dead band and stroke coupling, are eliminated. Simultaneously the accurate position tracking is implemented by the method even if the control vectors are fluctuating in a large scale. Eventually, the simulation results show that the dynamic system is steady and the method is feasible.

Key words: control compensation methods; adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS); hydraulic servo joint; robot

1 引言 (Introduction)

随着机器人技术的不断发展, 控制方法的研究方兴未艾. 文献[1]采用无力矩传感器研究机器人操作臂的控制, 文献[2]利用传感器预测引导操作臂跟踪连续轨迹完成自动焊接, 文献[3]采用力矩传感器, 探索了在关节高摩擦下操作臂的精确控制, 文献[4~6]提出了神经网络实现操作臂的控制问题, 文献[7~12]讨论了鲁棒控制策略、滑模控制和自适应控制以及模糊控制实现操作臂的控制. 无疑, 上述方法对机器人操作臂的控制起到了推动作用, 但这些方法仅仅考虑操作臂本身的动力学特性, 没有考虑动力源的非线性特性. 本文所讨论的液压伺服关节^[13], 采用内置摆动缸驱动各自由度运动, 内置微型伺服电机控制进入摆动缸的压力油, 当伺服电机

输入某一角度时, 阀口打开, 随动输出轴跟随转动, 转动过程中阀口逐步关闭, 从而实现随动输出轴对伺服电机输入角度的跟踪. 由于设计存在着死区、饱和等非线性特性, 关节在跟踪过程中存在位置跟踪误差. 为了消除这一误差, 采用直接补偿控制方法, 即在线检测随动输出轴实际转动的角度, 然后与期望的输入进行比较, 以消除这一误差. 但这种方法不能真正消除死区的影响, 系统仍存在位置跟踪误差.

固定增益自适应控制^[14], 它利用误差的不断积分累计消除误差. 但仿真结果表明, 在固定增益大的情况下, 系统能很快达到期望位置, 能够消除位置跟踪误差, 但系统出现超调. 而在固定增益小的情况下, 能够消除位置跟踪误差, 但快速性差.

文献[15]采用变增益自适应控制, 使系统响应

初期,增益很小,即系统按原模型运行,然后增益自动增大,使系统按参考模型运行,使用该方法能够消除死区带来的位置跟踪误差。

但上述方法仅是在固定的输入点,能够消除位置跟踪误差.对于在一定范围内变动的输入点,系统又出现位置跟踪误差,不同的输入量,对应着不同的增益系数.机器人实际工作时,关节转角在一个较大的范围内变动,若采用上述方法,则会产生位置跟踪误差,不能实现精确的位置跟踪.因此本文提出了一种自适应模糊神经网络控制补偿方法,可以解决这一问题。

2 动力学模型(Dynamic model)

液压伺服关节是一个三自由度垂直相交运动解耦的关节,其模型见图1(a)。

取第3自由度旋转中心作为绝对坐标原点 O_1 , 设关节连杆长度为 l_1 ;第1、第2自由度的质量分别为 m_1, m_2 ,且集中在 N_1, N_2 点处,距 O_1 分别为 l_{m1}, l_{m2} ;负载质量为 m_3 ,集中在 N_3 点处,距 O_2 为 l_{m3} , O_2 为负载坐标系的原点;三自由度的转角分别为 α_1, α_2 和 α_3 ; α_0, β_0 为负载在 $O_2x_2y_2z_2$ 方位,见图1(b)。

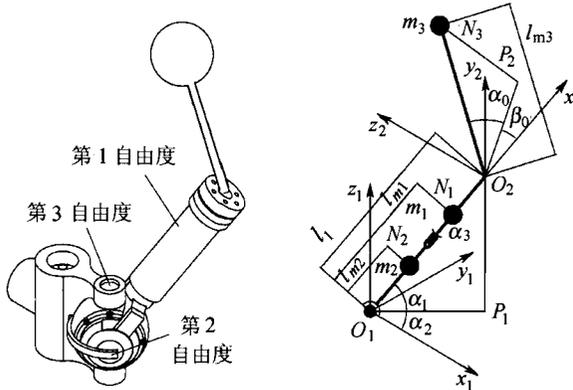


图1(a) 实体模型
Fig. 1(a) Solid model

图1(b) 模型简图
Fig. 1(b) Schematic diagram of model

采用拉格朗日法得各自由度的力矩方程如下

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_1 \\ \ddot{\alpha}_2 \\ \ddot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & 0 & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1^2 \\ \dot{\alpha}_2^2 \\ \dot{\alpha}_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{17} & d_{18} & d_{19} \\ d_{27} & d_{28} & d_{29} \\ d_{37} & d_{38} & d_{39} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{10} \\ d_{20} \\ d_{30} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中, $d_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$, 当 $i = j$ 时为第 i 个

自由度的有效转动惯量, $i \neq j$ 时为第 i 个自由度与第 j 个自由度之间的耦合转动惯量; $d_{ij}(i = 1, 2, 3; j = 4, 5, 6)$ 表示各自由度向心力系数矩阵; $d_{ij}(i = 1, 2, 3; j = 7, 8, 9)$ 表示各自由度科氏力系数矩阵; d_{i0} 表示第 i 自由度的重力矩^[15]. 将式(1)进一步写成如下形式

$$T = J \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_1 \\ \ddot{\alpha}_2 \\ \ddot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + T_{C1} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + T_K \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1^2 \\ \dot{\alpha}_2^2 \\ \dot{\alpha}_3^2 \end{bmatrix} + T_{C2} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + T_C \quad (2)$$

式(2)中, T_{C1} 为耦合惯性力矩矩阵, T_K 为科氏力矩矩阵, T_{C2} 为向心力矩矩阵, T_C 为重力矩. 并定义 \hat{T} 为耦合力矩, 则

$$\hat{T} = T_{C1} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + T_K \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1^2 \\ \dot{\alpha}_2^2 \\ \dot{\alpha}_3^2 \end{bmatrix} + T_{C2} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_2 \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} + T_C, \quad T - \hat{T} = J\ddot{A} \quad (3)$$

通过对文献[13]的工作原理分析,系统的控制方框图见图2。

$$T = 0.5pB(r_2^2 - r_1^2), \quad (4)$$

$$T_f = B_f(r_2^2 + r_1^2)\dot{\Theta}, \quad (5)$$

$$\Theta_f = A - \Theta_c, \quad (6)$$

$$\Theta_b = \begin{cases} 0, & \Theta_f < \Theta_{dead}, \\ \Theta_f - \Theta_{dead}, & \Theta_f \geq \Theta_{dead}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\Theta_v = \Theta_b - \Theta, \quad (8)$$

$$q = \begin{cases} c_d r_3 a \Theta_v \sqrt{2(p_s - p)/\rho}, & \Theta_v < \Theta_{sat}, \\ c_d r_3 a \Theta_{sat} \sqrt{2(p_s - p)/\rho}, & \Theta_v \geq \Theta_{sat}, \end{cases} \quad (9)$$

$$q_L = -K_p p, \quad (10)$$

$$f(u) = \exp(-\Theta_u^2). \quad (11)$$

式(4)~(11)中, T —摆动缸输出力矩, T_f —输出轴所受阻尼力矩, $T_f = [T_{f1} \ T_{f2} \ T_{f3}]^T$, B —摆动缸体长度, $B = [b_1 \ b_2 \ b_3]^T$, a —伺服阀口宽度, c_d —流量系数, ρ —油液密度, B_f —摩擦降落特性系数, K_p —漏损系数, r_1 —随动阀套半径, r_2 —叶片半径, r_3 —伺服阀芯半径, p_s —系统压力, p —工作腔压力, q —进入工作腔的流量, q_L —泄漏流量, A —电机输入角度, $A = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T$, Θ —电机输出角度, $\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$, $\dot{\Theta}$ —输出轴角速度, Θ_d —参考模型输出角度, $\Theta_d = [\theta_{d1} \ \theta_{d2} \ \theta_{d3}]^T$, Θ_u —参考模型输入与输出之差, $\Theta_u = [\theta_{u1} \ \theta_{u2} \ \theta_{u3}]^T$, Θ_c —补偿角度, $\Theta_c = [\theta_{c1} \ \theta_{c2} \ \theta_{c3}]^T$, Θ_f

—死区输入角度, $\Theta_f = [\theta_{f1} \ \theta_{f2} \ \theta_{f3}]^T$, Θ_b —死区输出角度, $\Theta_b = [\theta_{b1} \ \theta_{b2} \ \theta_{b3}]^T$, Θ_v —阀口开度, $\Theta_v = [\theta_{v1} \ \theta_{v2} \ \theta_{v3}]^T$, Θ_{dead} —阀口正重叠量, $\Theta_{dead} = [\theta_{dead1} \ \theta_{dead2} \ \theta_{dead3}]^T$, Θ_{sat} —最大阀口开度, $\Theta_{sat} = [\theta_{sat1} \ \theta_{sat2} \ \theta_{sat3}]^T$, E —实际模型输出

与参考模型输出之差, $E = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$. 参考模型与三自由度液压伺服关节的原模型在结构上是一致的,只是不考虑死区和操作臂耦合力矩项以及泄漏的影响. 因此,系统的动力学模型由方程(1)~(11)构成.

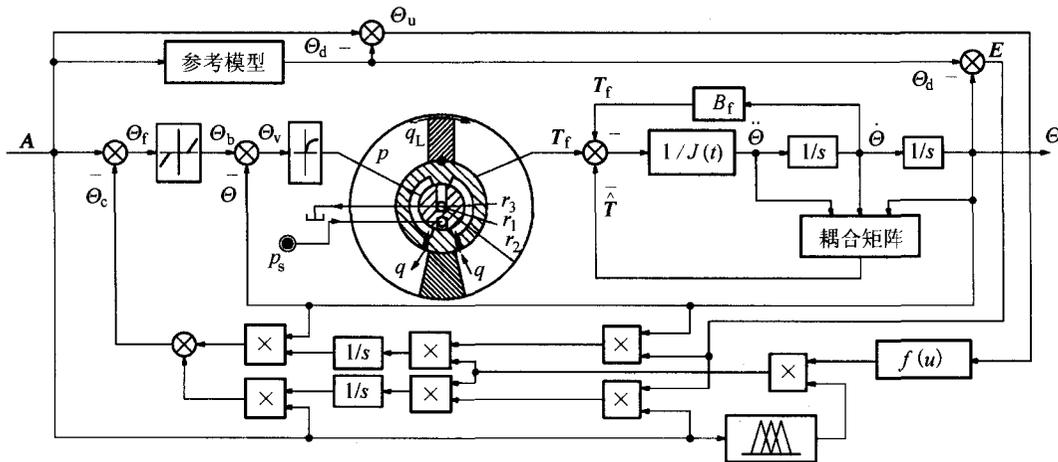


图2 控制系统方块图
Fig. 2 Control system block diagram

3 ANFIS 控制补偿方法 (ANFIS control compensation methods)

3.1 ANFIS 结构与工作原理 (ANFIS configuration and operating principle)

由动力学模型可知,系统有3个可变增益,因此系统在调整时要求有3个输出,由于ANFIS只能支持单输出变量,因此使用3个模型来分别对映射“ $A \rightarrow k_1$ ”,“ $A \rightarrow k_2$ ”和“ $A \rightarrow k_3$ ”进行建模,图3表示了这种映射功能.

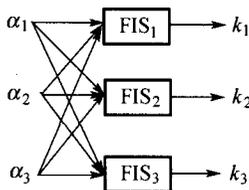


图3 关节模糊推理系统组成
Fig. 3 Configuration of fuzzy inference system of joint

由于该关节是一个高度非线性的动力学系统,非常不利于设计出简单、实用的控制器. 因此可将该模型在系统的某个工作点进行线性化,得到系统的一个线性模型. 即将整个空间分为若干个模糊子空间集合,对每个模糊子空间,系统的动力学特性可用一个局部线性状态方程来描述. 整个系统的动力学则是这些局部线性模型的加权和. 根据实际控制要求,控制变量A的范围依据三自由度液压伺服关节的转角约束而定,根据上述范围,在每个控制变量方

向上不均匀选取11点,然后互相组合成控制向量的点,用这些离散的点来划分模糊空间. 基于这种线性模型,用线性系统理论很容易设计其控制器,这种控制器往往具有线性函数的性质,与Sugeno型模糊推理系统的结构有良好的配合性.

图3中的ANFIS的结构构造见图4,其同一层的每个节点具有相似的功能($O_{1,i}$ 表示第1层的第*i*个节点输出).

第1层 该层每个节点*i*是以节点函数表示的方形节点(该层参数可变).

$$O_{1,i} = \mu_{A,i}(\alpha_1), i = 1, 2, \dots, 11,$$

$$O_{1,i} = \mu_{B,i-11}(\alpha_2), i = 12, 13, \dots, 22,$$

$$O_{1,i} = \mu_{C,i-22}(\alpha_3), i = 23, 24, \dots, 33.$$

第2层 实现前提部分模糊集的代数积运算,这一层每个节点都是固定的节点,其输出

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(\alpha_1)\mu_{B_i}(\alpha_2)\mu_{C_i}(\alpha_3), i = 1, \dots, 11.$$

每个节点的输出表示一条规则的激励强度.

第3层 将各条规则的激励强度规一化,即第*i*个节点计算第*i*条规则的 w_i 与全部规则 w 值之和的比值. 该层的节点也是固定的节点.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2), i = 1, 2, \dots, 11.$$

第4层 该层每个节点为自适应节点,其输出

$$O_{4,i} = \bar{w}_i(p_r\alpha_1 + q_r\alpha_2 + r_r\alpha_3 + s), i = 1, 2, \dots, 11.$$

第5层 该层的节点是固定节点,计算所有输入信号的总输出

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i.$$

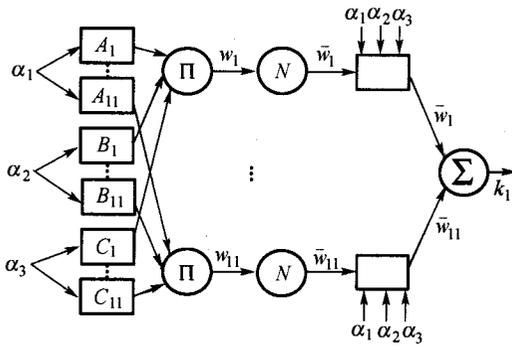


图 4 ANFIS 结构原理

Fig. 4 Structural principle of ANFIS

3.2 样本数据的获取 (Acquisition of sample data)

根据前述的空间划分,进行仿真试验,即在每次确定一组控制变量的前提下,通过调节变增益系数 K ,使得系统输出达到希望输入,记录变增益系数的值,见表 1。

根据表 1 的数据点,采用 Spline 样条函数可以光滑出变增益系数与系统控制变量之间的关系曲线,见图 5。根据图 5 的曲线,在控制变量范围内选取 100 个数据点作为训练数据,同时选取 100 不同于训练数据的数据点作为测试数据,为下一步控制规则的产生提供数据源。

表 1 K 与输入变量 A 的仿真试验结果

Table 1 Simulation test results on A and K

$A/(^\circ)$	1	2	3	4	5	10
k_1	320	20	0.8	0.16	0.08	6.0×10^{-3}
k_2	480	30	1.2	0.24	0.12	9.0×10^{-3}
k_3	640	40	1.6	0.32	0.16	1.2×10^{-2}
$A/(^\circ)$	20	30	40	50	60	
k_1	1.5×10^{-3}	6.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	
k_2	2.2×10^{-3}	9.0×10^{-4}	4.5×10^{-4}	3.0×10^{-4}	1.5×10^{-4}	
k_3	3.0×10^{-3}	1.2×10^{-3}	6.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	

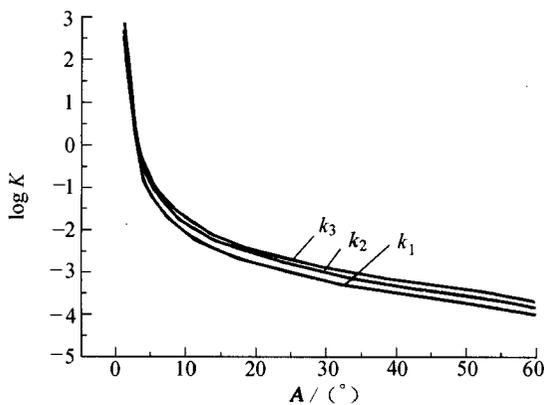


图 5 控制变量与变增益系数关系曲线

fig. 5 Curves of control variables vs. alterable gain coefficients

3.3 控制规则的确定 (Determination of control rule)

基于 Sugeno 型设计的模糊控制器,对应于用 also 连接的每一条模糊规则. 可以将该模糊控制器看成一个线性控制器,而整体的控制器由多条模糊推理规则处理,经过模糊综合、去模糊等过程后,逼近一个非线性的控制器。

本文中,采用神经网络中比较成熟的参数学习算法-最小二乘的反向传播算法,对一组给定的输入输出数据进行学习来调整模糊推理系统中变量的隶属函数的形状参数,从而设计出具有数据学习调整能力的模糊推理系统. 核对数据的使用是为了防止系统在训练时出现不匹配情况,随着训练得进行,如果出现训练数据的误差逐步变小,而核对数据组的误差却突然变大,则说明系统参数相对于训练数据是不匹配的。

通过训练及测试,可以确定输入的模糊集合隶属度函数,如图 6。

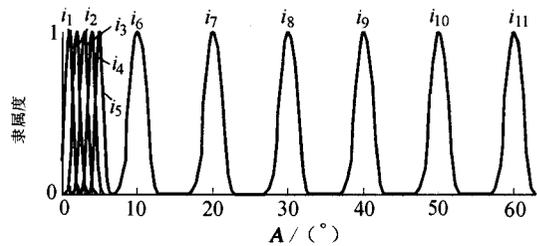


图 6 模糊集合隶属度函数

Fig. 6 Grade of membership function of fuzzy set

4 仿真试验 (Simulation test)

图 7 为采用模糊自适应神经网络变增益控制补偿方法,在阶跃输入作用下的系统响应. 从图 7 可看出,在输入角度分别为 $50^\circ, 60^\circ, 40^\circ$ 的情况下,3 个自由度输出角度分别为 $49.98^\circ, 60.01^\circ, 40.01^\circ$, 达到了期望的位置,消除了位置跟踪误差,快速性好,系统出现小幅超调,但很快衰减。

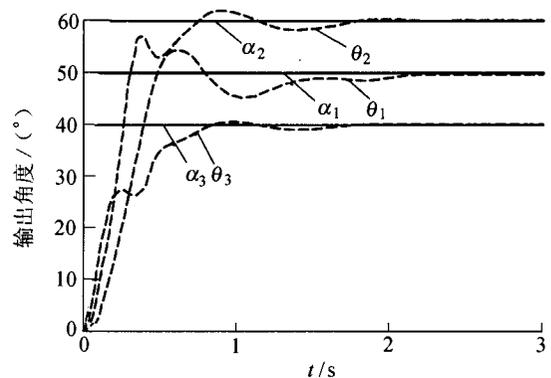


图 7 阶跃输入下的系统响应

Fig. 7 System response under step inputs

图8是系统在复合方波输入下的系统响应。3轴输入角度分别为 $50^\circ, 40^\circ, 30^\circ$,在此基础上,加载方波的幅值为 4° ,频率为 0.1Hz ,从而模拟控制变量在一个范围内变动。从仿真结果可知,采用自适应模糊神经网络变增益控制补偿方法,同样能够消除死区带来的位置跟踪误差。

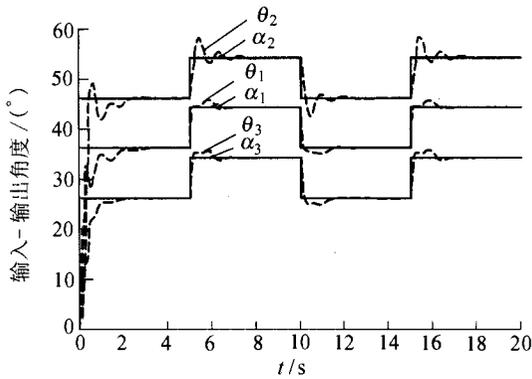


图8 方波输入下的系统响应

Fig. 8 System response under square wave inputs

5 结论(Conclusion)

本文在考虑动力源非线性和操作臂耦合的情况下,建立了三自由度液压伺服关节的动力学模型。对于输入转角在一个较大范围内变动,以及死区、饱和和非线性等造成的位置跟踪误差,在比较了几种控制方法都不能很好地消除这种误差的情况下,采用自适应模糊神经网络控制补偿方法,通过对神经网络的训练和自学习,构成模糊推理系统,自适应地调整变增益系数,从而实现了消除位置跟踪误差这一问题。通过仿真试验验证了该方法是可行的。

参考文献(References):

- [1] MURAKAMI T, YU Fangming, OHNISHI K. Torque sensorless control in multidegree of Freedom manipulator [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1993, 40(2): 259 - 265.
- [2] ADOLFO B, SADEK C A A, LESZEK A D. Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109(1 - 2): 13 - 19.
- [3] GUILLAUME M, KARI I, STEVEN D. The precise control of manipulators with high joint-friction using base force/torque sensing [J]. *Automatica*, 2000, 36(7): 931 - 941.
- [4] HOUNTRAS A, ANTONIADIS I, KANARACHOS A. Implementation of N-Step-Ahead neurocontrol on a 3-axes heavy duty hydraulic manipulator [J]. *Mechatronics*, 2002, 9(3): 235 - 270.
- [5] SEUL J, SUN B Y. Experimental studies of neural network impedance force control for robot manipulators [C]// *Proc of the IEEE Conf on*

Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE Press, 2001: 3453 - 3458.

- [6] CHANG Y C. Neural network-based tracking control for robotic systems [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 2000, 147(3): 303 - 311.
- [7] HAM C, QU Z, JOHNSON R. Robust fuzzy control for robot manipulators [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 2000, 147(2): 212 - 216.
- [8] JAFARI K A, ZINOBER A S I. Robust frequency shaping sliding mode control [J]. *IEE Proc Control Theory and Applications*, 2000, 147(3): 312 - 320.
- [9] KRZYSZTOF P J, HODA A E. Robust hybrid position/force control of redundant robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, 27(3): 111 - 127.
- [10] LEUNG T P, SU C Y, STEPANENKO Y. Combined adaptive and variable structure control for constrained robots [J]. *Automatica*, 1995, 31(3): 483 - 488.
- [11] RAHBARI R, DE SILVA C W. Comparison of two inference methods for P-type fuzzy logic control through experimental investigation using a hydraulic manipulator [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2001, 14(6): 763 - 784.
- [12] SE H R, JAHNG H P. Fuzzy logic based tuning of sliding mode controller for robot trajectory control [C]// *Proc of the IEEE Conf on Robotics and Automation*. Seoul, Korea: IEEE Press, 2001: 2974 - 2979.
- [13] 朱兴龙, 周骥平, 颜景平. 一种新型的三自由度垂直相交运动解耦液压伺服关节的设计 [J]. *中国机械工程*, 2002, 13(21): 1824 - 1826.
(ZHU Xinglong, ZHOU Jiping, YAN Jingping. The design for a novel hydraulic servo joint with 3-d. o. f. vertical cross and motion decoupled. [J] *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(21): 1824 - 1826.)
- [14] 韩曾晋. 自适应控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 29 - 33.
(HAN Zengjin. *Adaptive Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 29 - 33.)
- [15] 朱兴龙, 周骥平, 罗翔等. 一种新型三自由度液压伺服关节的动力学模型 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(1): 32 - 37.
(ZHU Xinglong, ZHOU Jiping, LUO Xiang, et al. Dynamic modeling of a novel hydraulic servo with three degrees of freedom joint [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(1): 32 - 37.)

作者简介:

朱兴龙 (1964—), 男, 博士, 副教授, 已发表论文 10 余篇, 研究领域为机器人技术、机电控制系统, E-mail: xinglongzhu@263.net;

周骥平 (1960—), 男, 博士, 教授, 已发表论文 20 余篇, 研究领域为双臂机器人协调操作。