

文章编号: 1001-0920(2011)04-0597-04

自适应神经变结构的机器人轨迹跟踪控制

张文辉¹, 齐乃明¹, 尹洪亮²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001; 2. 北京航空航天大学 仪器与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种神经网络与变结构融合的控制策略用于非线性机器人控制, 该方案利用神经网络来自适应补偿不确定模型, 并通过变结构控制器消除逼近误差. 考虑到局部泛化网络的不足, 根据其状态空间的划分, 分别对 3 个区间采用神经网络与变结构的分级与集成控制. 该方案能在控制阶段初期及网络逼近区域外使两种控制器共同起作用以保持系统的强鲁棒性, 基于 Lyapunov 理论证明了闭环系统的全局稳定性. 仿真结果进一步表明了该方法的优越性.

关键词: 神经网络; 不确定机器人; 变结构; 自适应控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Neural-variable structure-based adaptive trajectory tracking control of robot manipulators

ZHANG Wen-hui¹, QI Nai-ming¹, YIN Hong-liang²

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Department of Instrument Science and Photoelectricity Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China. Correspondent: ZHANG Wen-hui, E-mail: hit_zwh@126.com)

Abstract: The trajectory tracking of a class of robot manipulators with uncertainties is considered. The syncretic control algorithm is proposed by adaptive neural network and variable structure. Neural network is used to adaptively learn and compensate the unknown system, and approach error as disturbance is eliminated by using variable structure controller. Considering the shortage of local network, based on partition of state dimensional, neural network and variable structure separate control is applied to three sections with classification and integration. Two controllers together keep the robust of system in control initial stages and outside of approach region. The controller can guarantee good robustness and the stability of closed-loop system based on Lyapunov. The simulation results show the effectiveness of the presented methods.

Key words: neural network; uncertainty robot manipulators; variable structure; adaptive control

1 引言

在建模存在误差的情况下, 为了实现机器人无偏轨迹跟踪, 通常考虑在控制律中引入补偿控制项, 以消除不确定性因素的影响. 传统的控制方法由于鲁棒性不强、控制精度偏低等原因, 难以对机器人进行有效控制. 神经网络具有强大的非线性逼近能力, 可以补偿各种非线性建模动态的影响, 因而近 10 年来已成为机器人智能控制的主要手段^[1-3]. 文献 [4] 提出了一种鲁棒神经网络控制方案, 利用神经网络自适应学习非线性不确定系统, 但该方案只能保证系统的最终一致有界 (UUB). [5] 提出了模糊神经网络控制方案, 通过模糊神经网络在线学习系统模型, 该方案虽能保

证系统的全局稳定, 但算法复杂, 需要调节的参数过多. [6] 提出一种自适应神经网络控制方案, 该控制策略能够保证全局稳定. 但上述控制策略在控制阶段初期由于神经网络没有完成学习, 均存在控制精度无法得到保证的缺点.

针对以上不足, 本文提出一种自适应神经网络与变结构相结合的控制方案. 该方案首先利用径向基函数 (RBF) 神经网络作为控制器来自适应学习并补偿各种未知非线性, 其逼近误差通过变结构消除. 基于 Lyapunov 函数法的权值自适应学习律可以对不确定界进行实时估计, 该算法能够保证闭环系统的稳定性和跟踪误差的渐近收敛. 但考虑到 RBF 网络的局部

收稿日期: 2010-01-12; 修回日期: 2010-07-13.

基金项目: 中国航天科技创新基金项目(CAST09C01).

作者简介: 张文辉(1980—), 男, 博士生, 从事机器人智能控制、神经网络控制的研究; 齐乃明(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制等研究.

律均在逼近域内定义,而在逼近域外存在盲区.在神经网络完成学习之前,系统不能达到很好的控制效果.对此,本文提出一种基于分级集成的控制策略.

4 神经变结构集成控制器设计

考虑到变结构具有良好动态特性,采用其对神经网络逼近区域外的非线性误差进行补偿,不仅可以提高控制精度,而且在考虑神经网络失效的情况下,仍能保证系统良好的鲁棒性.在采用神经网络对不确定性进行逼近时,将神经网络的状态空间划分为 3 部分^[7],分别为神经网络控制区 E_{NN} ,变结构控制区 E_{VS} ,以及介于二者之间的集成控制区 E_{NV} ,且定义

$$\begin{cases} E_{NN} = \{\theta \mid \|\theta - \theta_0\|_{\bar{p},w} \leq R_{NN}\}, \\ E_{VS} = \{\theta \mid \|\theta - \theta_0\|_{\bar{p},w} > R_{VS}\}, \\ E_{NV} = E_{VS} - E_{NN}. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\theta = (q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r)$, θ_0 为固定状态空间的位置, R_{NN} 为神经网络逼近域的球形半径, R_{VS} 为集成控制域的球形半径, $\|\cdot\|_{\bar{p},w}$ 表示变量 (\cdot) 加权 \bar{p} 范数.

定义集成函数为

$$\psi(t) = \max\left(0, \tanh\left(\frac{\|\theta - \theta_0\|_{\bar{p},w} - R_{NN}}{R_{VS} - R_{NN}}\right)\right). \quad (14)$$

对式(9)进行修正,修正后的控制律如下:

$$\tau = \tau_0 + (1 - \psi(t))(\tau_{NN} + \Delta\tau) + \psi(t)\tau_{VS}, \quad (15)$$

$$\tau_{VS} = U_d \text{sgn}(s). \quad (16)$$

其中: τ_0 同式(4), τ_{NN} 同式(10), $\Delta\tau$ 同式(11); τ_{VS} 为变结构控制器; $U_d = \text{diag}(u_1, \dots, u_n)$ 为变结构增益矩阵,且满足 $u_i \geq |f_i|$.

神经网络权值矩阵的自适应学习算法修正为

$$\dot{\hat{\theta}} = -(1 - \psi(t))\eta\phi s^T, \quad (17)$$

其中 $\eta, \hat{\theta}$ 定义同式(12).

定义如下 Lyapunov 函数来证明闭环系统的稳定性:

$$V = \frac{1}{2}s^T Ms + \frac{1}{2}e^T(K_p + \Lambda K_d)e + \frac{1}{2}\text{tr}(\tilde{\theta}\eta^{-1}\tilde{\theta}^T).$$

首先对其两边微分,并应用性质 2 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s^T(M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) + F + \\ & d - \tau) + e^T K_p \dot{e} + e^T \Lambda K_d \dot{e} + \text{tr}(\tilde{\theta}^T \eta^{-1} \dot{\tilde{\theta}}). \end{aligned}$$

将控制律按式(15), (16)代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s^T(f - K_p e - K_d \dot{e} - (1 - \psi(t))(\tilde{\theta}^T \phi(x) + \\ & \xi_{dm} \text{sgn}(s)) - \psi(t)U_d \text{sgn}(s)) + e^T K_p \dot{e} + \\ & e^T \Lambda K_d \dot{e} + \text{tr}(\tilde{\theta}^T \eta^{-1} \dot{\tilde{\theta}}). \end{aligned}$$

将 $s = \dot{e} + \Lambda e$ 代入,得

$$\dot{V} = -\dot{e}^T K_d \dot{e} - e^T K_p \Lambda e - \psi(t)s^T(U_d \text{sgn}(s) - f) +$$

$$(1 - \psi(t))s^T(f - \hat{\theta}^T \phi(x) - \xi_{dm} \text{sgn}(s)) + \text{tr}(\tilde{\theta}^T \eta^{-1} \dot{\tilde{\theta}}).$$

将 f 按式(8),自适应律 $\dot{\tilde{\theta}}$ 按式(17)代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\dot{e}^T K_d \dot{e} - e^T K_p \Lambda e - \psi(t)s^T(U_d \text{sgn}(s) - f) + \\ & (1 - \psi(t))s^T(\xi - \xi_{dm} \text{sgn}(s)). \end{aligned}$$

由于 $u_i \geq |f_i|$,进一步整理可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\dot{e}^T K_d \dot{e} - e^T K_p \Lambda e + \\ & (1 - \psi(t)) \sum_{i=1}^n (s_i \xi_i - |s_i \xi_{dm}|). \end{aligned}$$

因此有 $\dot{V} < 0$.

由 Lyapunov 稳定性理论可得系统信号 s, e 及 $\tilde{\theta}$ 一致有界,由 $s = \dot{e} + \Lambda e$ 可知 \dot{e} 一致有界.再由假设 1 可得 \ddot{q}_r, \dot{q}_r, q 及 \dot{q} 有界.由假设 4 及 $\tilde{\theta}$ 有界可得 $\hat{\theta}$ 有界,进而可得 \hat{f} 及 τ 有界.考虑到性质 2 及假设 3,由式(5)可得 \dot{s} 有界.设连续非负函数

$$V_1(t) = V(t) - \int_0^t (\dot{V}(t) + s^T K_v s) dt,$$

$$\dot{V}_1(t) = -s^T K_v s.$$

由于 \dot{s} 有界,从而 s 一致连续,这表明 $\dot{V}_1(t)$ 是时间的一致连续函数.又 $V_1(t)$ 有界且大于零, $\dot{V}_1(t) \leq 0$,利用 Barbalat 引理可知 $t \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_1(t) = 0$,即 $s \rightarrow 0$.又 Λ 正定,于是 $e \rightarrow 0$ 及 $\dot{e} \rightarrow 0$.

5 仿真算例

为了验证本文两种控制算法的有效性,采用文献[8]的动力学模型进行仿真研究.仿真时各参数实际值为 $r_1 = 1 \text{ m}, r_2 = 0.8 \text{ m}, J_1 = J_2 = 5 \text{ kg}\cdot\text{m}, m_1 = 0.5 \text{ kg}, m_2 = 6.25 \text{ kg}$.其中 m_1 和 m_2 的验前估计值为 $m_1 = 0.4 \text{ kg}, m_2 = 6.1 \text{ kg}$.

设摩擦力为

$$F(\dot{q}) = [0.2 \text{sgn}(\dot{q}_1), 0.2 \text{sgn}(\dot{q}_2)]^T,$$

外部干扰为

$$d = [q_1 \dot{q}_1 0.3 \sin t, q_2 \dot{q}_2 0.3 \sin t]^T,$$

期望轨迹为

$$q_d = [0.5(\sin t + \sin(2t)), 0.5(\cos(3t) + \cos(4t))]^T.$$

为公平起见,控制律(9)及(15)的各参数取相同值.仿真参数为: $U_d = \text{diag}(30, 30), \xi_{dm} = 0.6, \eta = 15, \Lambda = \text{diag}(8, 8), K_d = \text{diag}(10, 10), K_p = \text{diag}(20, 20), R_{NN} = 1.0, R_{VS} = 1.05$.

关节位置和速度初始状态分别取为

$$q_1(0) = 0.3, q_2(0) = 0.2, \dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0.$$

神经网络基函数中心在输入空间 $\theta = [q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \ddot{q}_r] \in R^8$.其中: $q \in [-2, 2] \text{ rad}, \dot{q} \in [-4, 4] \text{ rad/s}, \ddot{q}_r \in [-5, 5] \times [-5, 5], \ddot{q}_r \in [-15, 15]$.

选择神经网络的逼近域为

$$\|\theta - \theta_0\|_{\bar{p},w} = \max(q/2, \dot{q}/4, \ddot{q}_r/5, \ddot{q}_r/15).$$

取神经网络初始权值为 0, 各基函数宽度为 10, 基函数中心在输入输出域中随机选取. 仿真结果如图 2~图 5 所示.

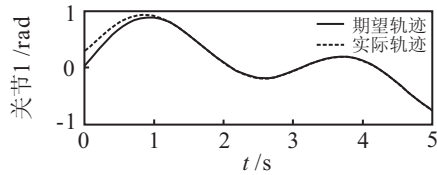


图 2 算法 1 的轨迹跟踪曲线

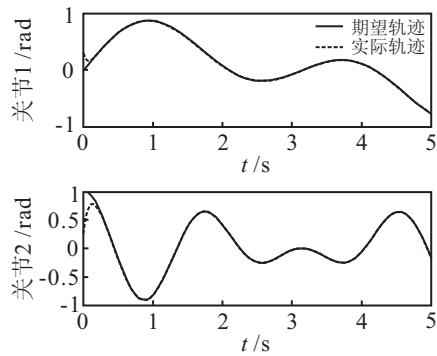


图 3 算法 2 的轨迹跟踪曲线

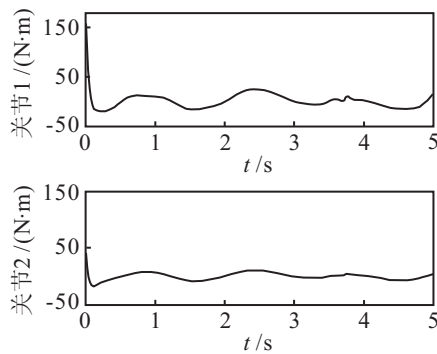


图 4 算法 1 的关节控制力矩

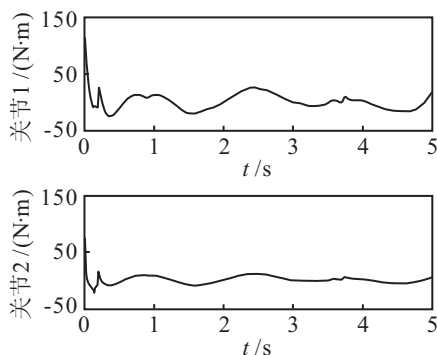


图 5 算法 2 的关节控制力矩

由图 2~图 5 可以看出, 本文设计的两种控制器均能有效跟踪期望轨迹, 且控制力矩均不大. 其中, 基于集成算法的控制器能在更短的时间内达到快速跟踪, 这是由于在控制初期, 由变结构控制补偿了神经网络没有完成学习所造成的较大逼近误差, 因而相对于混合控制器, 集成控制器能更有效地提高控制精度, 加快误差收敛速度.

6 结 论

对于不确定机器人系统, 本文提出的方案均无需精确的数学模型, 且在初始误差较大的情况下, 能够实现系统的快速跟踪. 其中集成控制器通过集成具有快速学习能力的神经网络和良好动态特性的变结构控制器, 克服了局部泛化神经网络的不足, 因而在控制初期能够补偿神经网络没有完成学习所造成的较大逼近误差, 比混合控制器能更有效地提高控制精度, 加快误差收敛速度, 增强系统的鲁棒性.

参考文献(References)

- [1] Lin C K. Non-singular terminal sliding mode control of robot manipulators using fuzzy wavelet networks[J]. IEEE Trans on Fuzzy System, 2006, 14(6): 849-859.
- [2] Niu Y G, Wang X Y, Hu C. Neural network output feedback control for uncertain robot[C]. Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shanghai, 2002: 1980-1984.
- [3] Hu H, Woo P Y. Fuzzy supervisory sliding-mode and neural-network control for robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 929-940.
- [4] 王洪斌, 李铁龙, 郭继丽. 机器人的神经网络鲁棒轨迹跟踪控制[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(2): 145-148. (Wang H B, Li T L, Guo J L. Neural network robust control for trajectory tracking of robot manipulators[J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(2): 145-148.)
- [5] Hsu C F. Self-organizing adaptive fuzzy neural control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Neural Network, 2006, 14(6): 755 -766.
- [6] Lee M J, Choi Y K. A adaptive neural controller using RBFN for robot manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 711-717.
- [7] Sanner R M, Slotine J J E. Gaussian networks for direct adaptive control[J]. IEEE Trans on Neural Network, 1992, 3(6): 2116-2123.
- [8] 魏立新, 李二超, 王洪瑞. 基于 CMAC 在线自学习模糊自适应控制的机器人力/位置鲁棒控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 40-44. (Wei L X, Li E C, Wang H R. Fuzzy adaptive control based on CMAC on-line and it's application on robot[J]. Trans of China Electro Technical Society, 2005, 20(5): 40-44.)