

文章编号: 1001-0920(2001)05-0612-05

基于滑模位置控制的机器人灵巧手 模糊自适应阻抗控制

姜力, 蔡鹤皋, 刘宏

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制策略。该控制方案通过模糊控制器实时地调整阻抗参数, 不但可使系统稳定, 而且具有良好的动态品质; 同时内环的滑模位置控制器可增强系统的鲁棒性。最后以机器人灵巧手单关节为对象进行仿真研究, 证明了该控制策略的有效性和可行性。

关键词: 阻抗控制; 模糊控制; 滑模控制; 稳定性; 动态品质

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

Fuzzy Adaptive Impedance Control of Dextrous Robot Hand Based on Sliding Mode Position Control

J I A N G L i, C A I H e-gao, L I U H ong

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Fuzzy adaptive impedance control strategy is proposed based on sliding mode position control. The control scheme modifies impedance parameters real-time by fuzzy controller so that the stability and dynamic behavior are improved. Sliding mode position controller in inner loop enhances the robustness of the system. The simulation study on the joint of dextrous robot hand shows the validity and feasibility of the proposed strategy.

Key words: impedance control; fuzzy control; sliding mode control; stability; dynamic performance

1 引言

为使机器人完成与环境相接触的复杂作业, 需要进行主动柔顺控制, 目前最具代表性的两种控制策略是力/位置混合控制和阻抗控制^[1]。与力/位置混合控制相比, 阻抗控制的任务规划量和实时计算量较少, 并且不需要控制模式的切换, 因而在机器人柔顺控制中占据着主导地位。由于商用机器人都配有高性能的位置控制器, 所以基于位置的阻抗控制策略得到了广泛的应用^[2]。

传统的基于位置的阻抗控制策略, 其目标阻抗参数(包括惯量、阻尼和刚度)在整个控制过程中为常数。为了保持过渡过程的稳定, 需要较大的阻尼参数, 但这将导致动态响应的迟缓和较大的冲击力^[3]。为解决固定阻尼参数不能兼顾稳定性和动态响应的问题, 目前研究较多的是模型参考自适应阻抗控制。该方法的缺点是需要在线计算机人的动力学, 实时计算量大, 实际应用效果并不理想。

本文提出一种模糊自适应阻抗控制策略, 使用模糊控制器在线调整阻抗参数, 算法简单而有效, 并

收稿日期: 2000-07-03; 修回日期: 2000-10-17

作者简介: 姜力(1971—), 男, 黑龙江兰西人, 博士生, 从事机器人控制等研究; 蔡鹤皋(1935—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事机电一体化、机器人控制等研究。

且可以根据不同阶段的要求,方便地进行阻抗参数的局部调整,应用滑模理论设计位置控制器,实现了位置控制和阻抗控制的强鲁棒性;以研制的机器人灵巧手单关节为对象,对基于滑模位置控制的模糊阻抗自适应控制算法进行仿真研究,证明了该控制策略的有效性和可行性。

2 数学模型

2.1 机器人灵巧手单关节数学模型

机器人灵巧手单关节是由微型直线驱动器进行驱动的。直线驱动器是集微型无刷直流电机、高效旋转直线转换机构和多种感知功能为一体的集成化驱动器。灵巧手单关节的主要方程如下(其中参数的含义和数值见表 1):

电压平衡方程

$$U_a = Ri + L di/dt + e \quad (1)$$

反电动势方程

$$e = K_e d\theta_n/dt \quad (2)$$

电磁转矩方程

$$T_{em} = K_T i \quad (3)$$

转矩平衡方程

$$\frac{T_{em}}{n} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_f + T_g + T_L \quad (4)$$

减速比方程

$$n = \dot{\theta}/\dot{\theta}_i \quad (5)$$

表 1 机器人灵巧手单关节参数

参数意义	数 值
电枢电阻	$R = 5.7 \Omega$
电枢电感	$L = 0.44 \text{ mH}$
力矩常数	$K_T = 7.4 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$
反电动势常数	$K_e = 7.5 \times 10^{-3} \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$
折算到关节端的转动惯量	$J = 7.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
折算到关节端的阻尼系数	$B = 5.2 \times 10^{-1} \text{ Nm}/(\text{rad}/\text{s})$
减速比	$n = 1/218$
PWM 常数	$K_{\text{PWM}} = 22$
电枢电压和电流	U_a, i
关节与环境的作用力矩	T_L
重力矩和摩擦力矩	T_g, T_f

本文使用 PWM 方式调节 U_a , 从而实现关节的位置控制。忽略驱动电路的延时, 其传递函数为

$$G_{\text{PWM}}(s) = U_a/U_c \quad k_{\text{PWM}} \quad (6)$$

根据上述方程, 可得单关节传递函数为

$$G(s) = \theta(s)/U_c(s) =$$

$$\frac{(nK_{\text{PWM}}K_T)U_c(s) - (n^2JL)s^3 + n^2(JR + BL)s^2 + n^2(Ls + R)(T_f(s) + T_g(s) + T_L(s))}{(n^2BR + K_eK_T)s} \quad (7)$$

为了进行滑模位置控制器的设计, 在状态空间中单关节数学模型写成轨迹误差方程的形式。设 $\theta_i(t) = [\theta_i \quad \dot{\theta}_i \quad \ddot{\theta}_i]^T$ 和 $\theta(t) = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T$ 分别为关节的期望轨迹向量和实际轨迹向量, 其中 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 和 $\ddot{\theta}_i$ 分别为关节的期望位置, 速度和加速度; $\theta, \dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 分别为关节的实际位置, 速度和加速度。定义误差向量为

$$E(t) = \theta_i(t) - \theta(t) = [e_1 \quad e_2 \quad e_3]^T$$

则状态空间中的误差方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_3 \end{bmatrix} U_c + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_4 \end{bmatrix} [T_f + T_g + T_L] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中

$$U_d = \frac{d^3\theta}{dt^3} + \left(\frac{B}{J} + \frac{R}{L}\right) \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{n^2BR + K_eK_T}{n^2JL} \frac{d\theta}{dt}$$

$$A_1 = -\frac{n^2BR + K_eK_T}{n^2JL}, \quad A_3 = \frac{K_{\text{PWM}}K_T}{nJL}$$

$$A_2 = -\left(\frac{B}{J} + \frac{R}{L}\right), \quad A_4 = \frac{R}{JL}$$

2.2 目标阻抗模型和环境模型

阻抗控制的实质是调节末端作用力和位置之间的动力学关系, 目标阻抗模型通常采用二阶线性微分方程来描述, 即

$$T_L = M_t(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}) + B_t(\dot{\theta} - \dot{\theta}) + K_t(\theta - \theta) \quad (9)$$

式中, M_t, B_t 和 K_t 分别为目标惯性, 阻尼和刚度, θ 为关节的参考位置。设 $\Delta\theta = \theta - \theta$, 则阻抗控制器的传递函数为

$$G_F(s) = T_L(s)/\Delta\theta(s) = M_t s^2 + B_t s + K_t \quad (10)$$

本文采用刚性环境模型。设 θ 为环境的位置, K_e 为环境的刚度, 则环境模型方程为

$$T_L = K_e(\theta + \theta) \quad (11)$$

3 滑模位置控制器的设计^[4,5]

基于位置的阻抗控制要求内环的位置控制器具有很强的鲁棒性和快速的动态响应。本文应用滑模变结构理论设计关节位置控制器,其设计由两部分组成:1)求切换函数 $s(E)$,使系统的滑动模态渐近稳定并具有所要求的动态品质;2)求控制函数 $U_c(E)$,使滑模的存在条件和到达条件得以满足。

3.1 切换函数 $s(E)$ 的选择

采用线性切换函数

$$s(E) = CE(t) \tag{12}$$

式中, $C = [c_1 \ c_2 \ c_3]$, $E(t) = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$, 取 $c_3 = 1$ 。系统的滑模运动方程为

$$\ddot{e}_1 + c_2\dot{e}_1 + c_1e_1 = 0 \tag{13}$$

方程(13)的特征方程为

$$p^2 + c_2p + c_1 = 0 \tag{14}$$

为保证系统渐近稳定,要求 $c_1 > 0, c_2 > 0$; 为保证系统无超调,要求 $c_2^2 \geq 4c_1$ 。

3.2 控制函数 $U_c(E)$ 的选择

所采用的控制函数为

$$U_c = \psi_1 e_1 + \psi_2 e_2 + \delta \text{sgn}(s) \tag{15}$$

式中, ψ_1 和 ψ_2 分别为 e_1 和 e_2 的反馈增益, δ 是一个小的正数,它可保证原点处 ($e_1 = e_2 = e_3 = 0$) 满足滑模存在条件,并且提高系统的抗干扰能力,消除静态误差。

根据广义滑模条件可以得到

$$\begin{aligned} \dot{s}s &= (c_1\dot{e}_1 + c_2\dot{e}_2 + \dot{e}_3)s = \\ &(-c_1c_2 - c_1A_2 - A_3\psi_1)e_1s + (c_1 + \\ &A_2 - c_2^2 - c_2A_2 - A_3\psi_2)e_2s + \\ &(c_2 + A_2)s^2 + [A_4(T_L + T_g + \\ &T_f) + U_d]s - A_3\delta \text{sgn}(s)s < 0 \end{aligned} \tag{16}$$

通过逐项优越的方法满足上式,得到

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_1, & e_1s > 0 \\ \beta_1, & e_1s < 0 \end{cases} \tag{17}$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \alpha_2, & e_2s > 0 \\ \beta_2, & e_2s < 0 \end{cases} \tag{18}$$

$$c_2 < -A_2 = B/J + R/L \tag{19}$$

$$\delta > |(A_4(T_L + T_g + T_f) + U_d)/A_3| \tag{20}$$

4 基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制

4.1 阻抗参数恒定的阻抗控制

基于位置的阻抗控制方案由两个控制环组成:

位置控制内环和阻抗控制外环。根据接触力矩 T_L 和目标阻抗模型 $G_F(s)$, 阻抗控制外环产生位置修正量 $\Delta\theta$, 并通过内环的位置控制实现期望的阻抗关系。文献[3]证明了基于位置的阻抗控制的过渡过程稳定性条件为

$$\begin{cases} \xi_i > 0.5(\sqrt{1+2k} - 1) \\ \xi_i = B_i/(2\sqrt{KM_i}) \\ k = K_e/K_i \gg 1 \end{cases} \tag{21}$$

由式(21)可以看出,为了实现过渡过程的稳定,目标刚度应远小于环境刚度,同时目标阻尼要足够大。理论和实验证明,高阻尼有利于过渡过程的稳定,但同时会导致动态响应的迟缓和冲击力的增大。为了解决这一问题,本文在基本阻抗控制方案的基础上,根据不同阶段对阻抗参数的不同要求,应用模糊规则实时调整阻抗参数,在减小冲击力的同时,保证了过渡过程的稳定性。

4.2 基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制^[3]

基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制策略的目标是:1)增强过渡过程中关键阶段的稳定性;2)改善过渡过程的力响应(减小冲击和力超调);3)达到静态期望力,且不依赖于环境参数。控制器结构如图1所示,它由3部分组成:1)内环的滑模位置控制器;2)外环的阻抗控制器;3)模糊自适应机构,它根据力响应在线计算并调整阻抗参数。

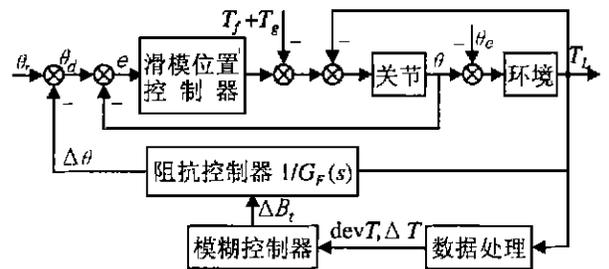


图1 基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制器结构

模糊控制器有两个输入变量:1)力偏差 $\text{dev}T(k) = (T_d - T_L(k)) |\text{sign}T_L(k)|$, 其中 T_d 为期望的静态力, $|\text{sign}T_L(k)|$ 为接触标志函数,用以判断与环境是否相接触,在自由空间中 $\text{dev}T(k) = 0$;2)力增量 $\Delta T(k) = T_L(k) - T_L(k-1)$ 。模糊控制器有一个输出变量 ΔB_i ,它是目标阻尼参数的修正量。

为方便模糊控制器的设计,将两个输入变量和一个输出变量进行归一化处理,即

$$\text{dev}T^*(k) = \text{dev}T(k) / |\text{dev}T|_{\max} \tag{22}$$

$$\Delta T^*(k) = \Delta T(k) / |\Delta T|_{\max} \quad (23)$$

$$\Delta B^*(k) = \Delta B(k) / |\Delta B|_{\max} \quad (24)$$

将所有的输入输出变量划分为 7 个模糊子集, 分别用语言值 NB, NM, NS, ZO, PS, PM 和 PB 表示。每个模糊集的隶属度函数均选为高斯基函数。模糊控制规则表略。

模糊推理采用传统的 Mamdani 算法, 模糊推理规则采用 max-min 复合运算, 即

$$\mu_{\tilde{c}}(y) = \min_{i=1}^n (\mu_{\tilde{a}_i}(\text{dev}T^*(k)), \mu_{\tilde{b}_i}(\Delta T^*(k))) \quad (25)$$

模糊推理结果的非模糊化采用重力中心法 (COG), 输出结果为

$$\Delta B_i(k) = \frac{\int \mu_{\tilde{c}}(y)y dy}{\int \mu_{\tilde{c}}(y) dy} \quad (26)$$

目标阻抗参数的初始值按式 (21) 选择。当关节与环境接触后, 模糊控制器产生 ΔB_i , 对目标阻尼进行实时调节, 在最大冲击以前采用较小的目标阻尼以减小力超调, 而最大冲击以后采用较大的阻尼以保证接触的稳定性。

5 仿真研究

以机器人灵巧手单关节为对象, 使用 MATLAB 的仿真工具 SIMULINK 对所提出的阻抗控制方案进行仿真研究。

5.1 滑模位置控制器的仿真

滑模位置控制的品质对阻抗控制的性能有很大影响。根据表 1 中的关节参数和式 (17) ~ (20) 计算滑模控制器的参数范围, 通过反复调整最后确定滑模控制器的参数为: $c_1 = 9\,000$, $c_2 = 200$, $c_3 = 1$, $\delta = 0.03$, $\alpha = 13$, $\beta_1 = 8$, $\alpha = 2$, $\beta_2 = -2$ 。

单关节的位置阶跃响应曲线如图 2(a) 所示。“抖振”是滑模控制的一个主要问题, 文献 [5] 对其做了详细分析, 并且提出了克服或削弱抖振的方法, 这里不做详细讨论。

5.2 目标阻抗参数恒定的阻抗控制的仿真

仿真实验中取环境的位置 $\theta = 0.9 \text{ rad}$, 刚度 $K_e = 50 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{rad}$, 目标惯量 $M_i = 0.001 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{rad} / \text{s}^2)$, 目标刚度 $K_i = 1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。设关节以 0.3 rad/s 的角速度向环境运动, 期望位置和实际位置曲

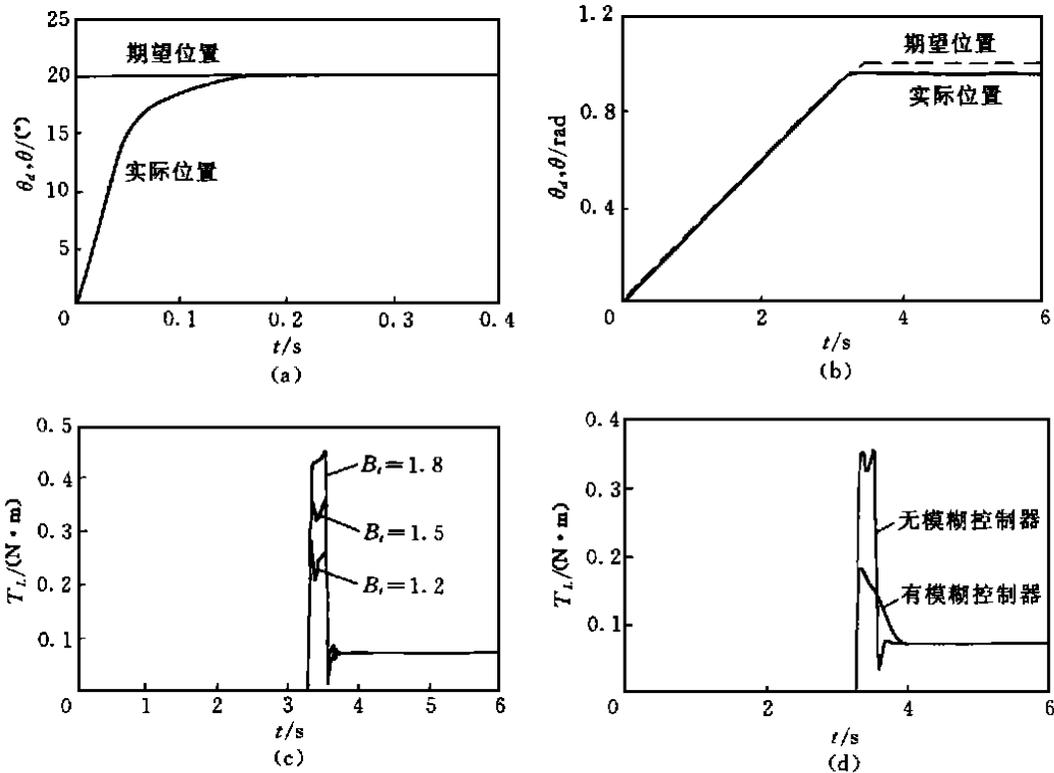


图 2 基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制仿真曲线

- (a) 滑模位置控制器的关节位置响应
- (b) 阻抗控制的期望位置和实际位置
- (c) 不同目标阻尼参数时的关节力矩 ($M_i = 0.001, K_i = 1.5$)
- (d) 无模糊控制器和有模糊控制器时的关节力矩

线如图2(b)所示。使用不同的目标阻尼 B_i , 所得的一组力矩响应曲线如图2(c)所示。可以看出, 在采用相同 M_i 和 K_i 的情况下, 随着 B_i 的增加, 冲击力和力超调变大, 但是冲击之后力的振荡幅度减小, 即接触稳定性提高, 证明了实时调整阻尼参数的必要性。

5.3 模糊自适应阻抗控制的仿真

采用与5.2节相同的仿真条件, 初始目标阻尼 B_{i0} 选为 $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, 采用模糊自适应阻抗控制算法进行仿真研究, 得到的力矩响应曲线如图2(d)所示。与图2(c)相比, 力矩的超调明显减小, 同时接触稳定性也有所增强, 从而较好地解决了采用恒定阻抗参数的阻抗控制所存在的问题。

6 结 语

目标阻抗参数恒定的基于位置的阻抗控制, 过渡过程的稳定性和动态品质不能同时得到提高。针对这一缺点, 本文提出一种基于滑模位置控制的模糊自适应阻抗控制策略。使用滑模位置控制内环, 可以有效地增强系统的鲁棒性; 使用模糊控制器在线调整目标阻尼参数, 既可保证接触的稳定, 又可使力

超调减小。以机器人灵巧手单关节为对象, 建立了仿真对象及控制器的数学模型, 给出了滑模位置控制器和模糊控制器的设计过程。仿真研究结果表明, 该控制策略对于控制性能的提高有明显的作用, 是一种有效而可行的控制方案。

参考文献:

- [1] Hogan N. Impedance control: An approach to manipulation[J]. *J Dyn Syst Meas Contr*, 1985, 107(1): 1-24
- [2] Dragoljub Surdilovic. Synthesis of impedance control laws at higher control levels: Algorithms and experiments[A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]*. Leuven, 1998. 213-218
- [3] Dragoljub Surdilovic. Robust robot compliant motion control using intelligent adaptive impedance approach [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]*. Michigan, 1999. 2128-2133
- [4] H Liu, J Butterfass, S Knoch *et al*. A new control strategy for DLR's multisensory articulated hand[J]. *IEEE Trans on Contr Syst*, 1999, 19(2): 47-54
- [5] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990

(上接第 611 页)

5 结 论

1) 输出反馈的鲁棒性能设计包括两方面内容, 即输入(端)扰动的抑制和输出(端)灵敏度问题。本文主要讨论输出灵敏度问题。由于参数不确定性系统输出反馈的解(式(8))不是线性不等式, 所以应求解式(9), 即先求解一个输出注入问题。输出注入问题中的最优性能 γ 是灵敏度问题的性能极限, 所以这种分步求解的做法, 其物理概念比较清楚。

2) 本文为说明基本方法, 在算例中未加进权函数。对于实际设计问题而言, 应在对象中加上与性能要求有关的权函数。

参考文献:

- [1] Xie L, FU M, Carlos E De Soaza. H_∞ control and quadratic stabilization of systems with parameter uncertainty via output feedback[J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1992, 37(8): 1253-1256
- [2] Yammada Y, Hara S. Global optimization for H_∞ control with constant diagonal scaling[J]. *IEEE Trans on*

Autom Contr, 1998, 43(2): 191-202

- [3] Jabbari F. Output feedback controller for systems with structured uncertainty[J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1997, 42(5): 715-719
- [4] Iwasaki T, Skelton R E. All controllers for the general H_∞ control problem: LM I existence conditions and state space formulas [J]. *Automatica*, 1994, 30(8): 1307-1317.
- [5] Doyle J C, Glover K, Khargonekar P P *et al*. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems[J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1989, 34(8): 831-847.
- [6] Zhou K, Khagonekar P P, Stoustrup J. Robust performance of system with structured uncertainties in state space[J]. *Automatica*, 1995, 31(2): 249-255
- [7] Schmitendorf W E. Design methodology for robust stabilizing controllers[J]. *IAA J Guid Contr Dyn*, 1987, 10(3): 250-254
- [8] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J *et al*. LM I control toolbox[M]. Natick: The Math Works Inc, 1995