

基于模糊变结构的机械臂控制

林 雷¹, 王洪瑞², 任华彬¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北大学 电子信息工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 现有的机械臂模糊变结构控制方法大都计算复杂或需要检测滑模面的微分信号. 本文将机械臂模型分为确定部分和不确定部分进行研究, 对确定部分采用一般反馈控制, 对不确定部分采用变结构集中补偿控制, 为了消除变结构控制器的抖震引入模糊控制方法, 将滑模面作为模糊控制器的输入, 补偿控制器权值作为输出. 本方案不仅不需要检测滑模面微分信号, 而且计算简单, 易于实现. 仿真结果表明, 在存在模型误差和外部扰动情况下, 该方案既能达到快速跟踪, 又能很好的消除控制器的抖震.

关键词: 机械臂; 模糊控制; 变结构控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fuzzy-based variable structure control for robotic manipulators

LIN Lei¹, WANG Hong-rui², REN Hua-bin¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

2. Institute of Electrostatic Technology, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China)

Abstract: The existing fuzzy variable structure control methods for robotic manipulators are mostly complicated to calculate, or need to examine the differential signal of sliding surface. In this paper, the robotic manipulator is divided into certain part and uncertain part. The normal feedback controller is used to control the certain part, while the variable structure concentrated compensation control is adopted for the latter. In order to eliminate chattering of variable structure controller, the fuzzy control method is introduced, in which the sliding surface is regarded as the input of fuzzy controller while the output is the weight of compensation controller. The proposed scheme need not examine the differential signal of sliding surface, the calculation is simple, and is easy to realize. The results of simulation show that the scheme can achieve fast tracking and greatly eliminate chattering of controller under the condition of existing model error and external disturbance.

Key words: robotic manipulator; fuzzy control; variable structure control

1 引言(Introduction)

机械臂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、强耦合和非线性的动力学特性. 变结构控制因滑动模态对系统干扰和摄动具有完全适应性而被广泛用于机械臂控制中, 该方法具有控制简单、降阶、解耦等优点, 但主要缺点是控制存在抖震.

将变结构控制和模糊逻辑结合, 已被证明是一种解决控制抖震问题的有效方案^[1]. 文献[2,3]利用模糊逻辑对机械臂建模和控制, 理论分析和仿真研究都表明该方法能有效消除控制抖震, 但由于模糊逻辑既要建模, 又要计算控制量, 所以计算十分复杂. 文献[4,5]中, 模糊逻辑的输入量是滑模面和滑模面的微分, 而速度信号的测量并不容易, 这样加重了检

测电路的负担.

针对以上特点, 本文在变结构方法基础上引入模糊控制, 将滑模面作为模糊控制器的输入, 补偿控制器权值作为其输出. 通过对两连杆机械臂仿真表明, 此方案不仅可以有效消除控制抖震问题, 而且对模型误差和外部扰动具有一定的鲁棒性.

2 机械臂模糊变结构控制(Robotic manipulator fuzzy variable structure control)

2.1 动力学模型(Dynamics model)

对 n 关节机械臂, 其动力学方程为

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = u(t) + \omega. \quad (1)$$

其中: $q(t)$ 是 $n \times 1$ 维关节角位置向量, $M(q)$ 是 $n \times n$ 维对称惯量矩阵, $h(q, \dot{q})$ 是 $n \times 1$ 维含向心力、哥氏力

和重力的矩阵, $u(t)$ 是 $n \times 1$ 维关节驱动力矩, ω 是扰动信号.

对系统(1), 假定已知 $M(q)$ 和 $h(q, \dot{q})$ 的一个先验估计 $M_0(q)$ 和 $h_0(q, \dot{q})$, 则

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

$$h(q, \dot{q}) = h_0(q, \dot{q}) + \Delta h(q, \dot{q}). \quad (3)$$

其中 $\Delta M(q)$ 和 $\Delta h(q, \dot{q})$ 为不确定部分.

动力学方程可写为

$$M_0(q)\ddot{q} + h_0(q, \dot{q}) = u(t) + \rho(t). \quad (4)$$

其中 $\rho(t) = -\Delta M(q)\ddot{q} - \Delta h(q, \dot{q}) + \omega$

由式(4)可知, 完全已知的动力学方程为

$$M_0(q)\ddot{q} + h_0(q, \dot{q}) = u_1. \quad (5)$$

系统不确定部分是有界的, 其界为

$$\|\rho(t)\| < b_0 + b_1\|q(t)\| + b_2\|\dot{q}(t)\|^2. \quad (6)$$

其中 b_0, b_1 和 b_2 都是已知的正常数. 在实际控制中, 对每一机械臂, 以上参数可通过离线计算得到^[6].

2.2 变结构控制器的设计(Design of variable structure controller)

对系统(1)分两步进行控制:

第1步 对式(5)确定系统设计反馈控制器, 使系统能同步跟踪参考轨迹;

第2步 设计变结构控制器, 以补偿不确定部分的影响, 使闭环系统跟踪误差渐近收敛到零.

设 q_r 为期望轨迹, 跟踪误差为

$$e(t) = q - q_r. \quad (7)$$

由式(5)和(7)得如下状态方程:

$$\dot{X} = AX + Bv. \quad (8)$$

其中:

$$X = \begin{bmatrix} e^T \\ \dot{e}^T \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix},$$

$$v = M_0(q)^{-1}(u_1 - h_0(q, \dot{q})) - \ddot{q}_r.$$

定理 1 对系统(5), 采用如下控制器, 系统误差将渐近收敛至零.

$$u_1 = h_0(q, \dot{q}) + M_0(q)(KX + \ddot{q}_r). \quad (9)$$

其中: $K = [-K_1, -K_2]$, $K_1, K_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

定义矩阵 A_1 如下式:

$$A_1 = A + BK. \quad (10)$$

式(10)中反馈中反馈增益矩阵 K 的选取应使闭环系统稳定.

由式(1)定义如下形式控制输入:

$$u(t) = u_1 + u_0. \quad (11)$$

其中: u_1 为式(9)所示, u_0 用于补偿系统不确定部分的影响.

由式(4)(8)(9)和(11)得

$$\dot{X} = A_1X + BM_0(q)^{-1}u_0 + BM_0(q)^{-1}\rho(t). \quad (12)$$

定义如下开关平面

$$S = CX. \quad (13)$$

其中: $C = [C_1, C_2]$, $C_1, C_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为非奇异阵, 并有 $\text{Re}\lambda(-C_2^{-1}C_1) < 0$ 成立.

定理 2 对式(1)不确定系统, 采用式(11)控制器, 跟踪误差将渐近收敛至零^[7]. 其中 u_1 为式(9)所示线性反馈控制器, u_0 为如下变结构控制器:

$$u_0 = \begin{cases} \frac{(S^T C_2 M_0(q)^{-1})^T}{\|S^T C_2 M_0(q)^{-1}\|^2} w, & \|S\| \neq 0, \\ 0, & \|S\| = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$w = -S^T C A_1 e - \|S\| \|C_2 M_0(q)^{-1}\| \cdot$$

$$(b_0 + b_1\|q\| + b_2\|\dot{q}\|^2). \quad (15)$$

2.3 模糊变结构控制(Fuzzy variable structure controller)

上节介绍控制器能很好跟踪期望轨迹, 并且跟踪误差将渐近收敛至零, 但由于存在滞环、开关延迟等动态非线性, 使实际系统中的控制量存在很强抖震. 轻则可能导致执行器机械损伤, 重则激励未建模高频动力学, 使控制失策.

由式(11)知, 控制器由两部分组成, 其中变结构控制器 u_0 用于补偿模型误差和外部扰动的影响. 由分析知, u_0 项幅值 w 的大小对变结构控制品质有很大影响, 为保证滑模条件成立, 必须保证较大 w 值. 但 w 值越大, 控制器产生的抖震就越强, 这是一个矛盾问题. 为得到适当 w 值, 本文在上述变结构控制器基础上引入模糊控制, 根据扰动和不确定性参数的变化, 实时调整 w 值, 达到消除抖震的目的.

根据变结构控制原理, 若控制器由式(11)所示两部分组成, 此时设计控制规则为

$$\text{If } s(t) \text{ is Z0 then } u \text{ is } u_1, \quad (16)$$

$$\text{If } s(t) \text{ is NZ then } u \text{ is } u_1 + u_0. \quad (17)$$

其中 Z0 和 NZ 分别表示“零”和“非零”.

式(16)表示当切换函数 $s(t)$ 为零时, 控制器为 u_1 ; 式(17)表示当切换函数 $s(t)$ 为非零时, 控制器为 $u_1 + u_0$.

上述控制思想可由下式描述, 控制器输出为

$$u = \frac{\mu_{Z0} u_1(s) + \mu_{NZ}(s)(u_1 + u_0)}{\mu_{Z0}(s) + \mu_{NZ}(s)}. \quad (18)$$

其中 $\mu_{Z0}(s), \mu_{NZ}(s)$ 为模糊系统隶属度函数。

若令 $\mu_{Z0}(s) + \mu_{NZ}(s) = 1$, 则

$$u = u_1 + \mu_{NZ}(s)u_0, \quad (19)$$

即当 $\mu_{NZ}(s) = 1$ 时, $u(t) = u_1 + u_0$, 此时控制律为2.2节所述控制律。当 $\mu_{NZ} \neq 1$ 时, 通过隶属度函数 $\mu_{NZ}(s)$ 的变化, 由模糊控制和变结构控制共同产生一个新的模糊变结构控制器, 实现抖震的消除。

本文模糊规则设计如下:

If (s is N) then (u is B),

If (s is Z) then (u is Z),

If (s is B) then (u is B).

模糊系统输入、输出隶属度函数如图1所示。在给定输入情况下, 根据规则可推出相应输出。

3 仿真研究(Simulation research)

为验证本文控制策略, 以二连杆机械臂为对象进行仿真研究。其动力学方程为

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11}(q_2) & \alpha_{12}(q_2) \\ \alpha_{21}(q_2) & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{12}(q_2)\dot{q}_1^2 + 2\beta_{12}(q_2)\dot{q}_1\dot{q}_2 \\ -\beta_{12}(q_2)\dot{q}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1(q_1, q_2)g \\ \gamma_2(q_1, q_2)g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

式中各参数值参考文献[7]。

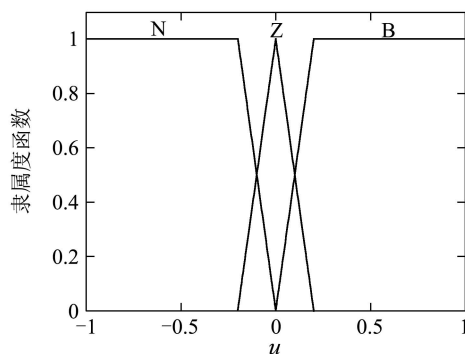


图 1(a) 输入隶属度函数

Fig. 1(a) Membership function of input

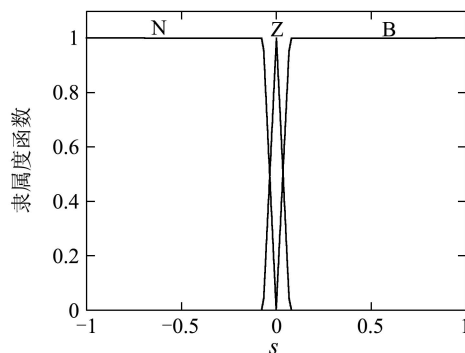


图 1(b) 输出隶属度函数

Fig. 1(b) Membership function of output

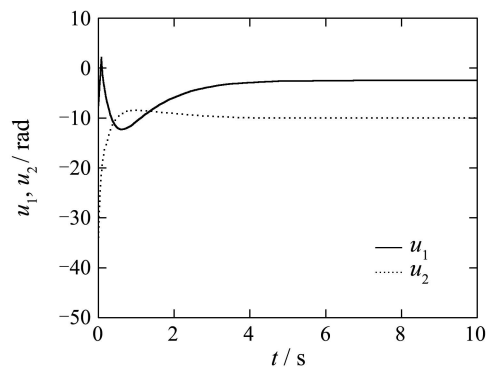


图 2(a) 关节1、关节2力矩

Fig. 2(a) Moment of joint 1 and joint 2

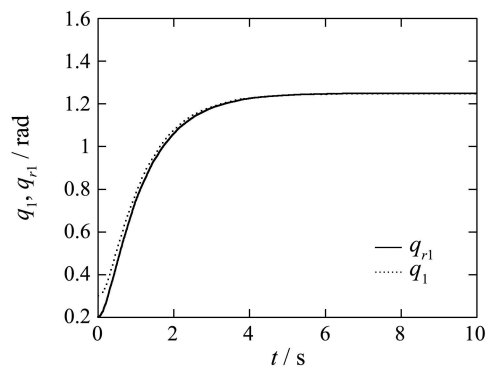


图 2(b) 关节1跟踪

Fig. 2(b) Tracking of joint 1

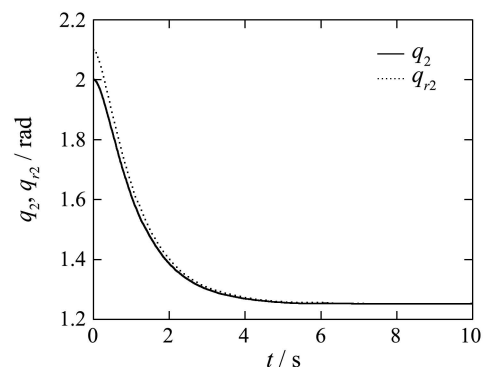


图 2(c) 关节2跟踪

Fig. 2(c) Tracking of joint 2

在MATLAB6.5上对式(1)所述机械臂进行仿真。图2代表采用式(19)的控制输入和关节跟踪信号, 由于利用模糊控制实时调整变结构补偿控制器权值, 不仅跟踪精度高, 而且消除了控制抖震。

4 结论(Conclusion)

本文在一般变结构控制器基础上引入模糊控制, 将滑模面作为模糊逻辑的输入, 变结构控制器的权值作为其输出, 并将此方法用于二自由度机械臂控制。仿真结果表明, 该方案不仅能有效消除变结构控制抖震, 而且在存在模型误差和外部扰动条件下, 能够实现机器人的快速跟踪。

(下转第650页)

- [12] HERRERA F, LOZANO M. Adaptive genetic operators based on co-evolution with fuzzy behaviors[J]. *IEEE Trans on Evolutionary computation*, 2001, 5(2): 149 – 165.
- [13] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
(WANG Xiaoping, CAO Liming. *Genetic algorithms-theory, application and software implementation*[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)
- [14] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15 – 20.
(LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. *J of Computer Research and Development*, 1995, 32(6): 15 – 20.)
- [15] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32 – 35.
(LIU Changyu, LI Deyi, PAN Lili. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(2): 32 – 35.)
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28 – 34.
(LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. *Engineering Science*, 2004, 6(8): 28 – 34.)

作者简介:

- 戴朝华** (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为计算智能、模式识别等, E-mail: dchzyf@126.com;
- 朱云芳** (1974—), 女, 硕士, 讲师, 目前研究方向为测控系统、信号分析与处理, E-mail: zyfdch@126.com;
- 陈维荣** (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能检测技术、图像处理与计算机视觉, E-mail: wrchen@home.swjtu.edu.cn.

(上接第642页)

参考文献(References):

- [5] KENNE J P, GHARBI A. Stochastic optimal production control problem with corrective maintenance[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, 46(4): 865 – 875.
- [6] GROSFELD-NIR A, GERCHAK Y, HE Q M. Manufacturing to order with random yield and costly inspection[J]. *Operations Research*, 2000, 48(5): 761 – 767.
- [7] GURNANI H. Supply management in assembly systems with random yields and random demand[J]. *IIE Transactions*, 2000, 32(8): 701 – 714.
- [8] KOGAN K, SHU C, PERKINS J R. Optimal finite-horizon production control in a defect-prone environment[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1795 – 1800.

作者简介:

- 宋春跃** (1972—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为最优生产控制、随机过程的建模及优化、数据挖掘等, E-mail: cysong@iipc.zju.edu.cn;
- 王慧** (1959—), 女, 教授, 研究领域为智能交通系统、复杂过程建模、控制与优化, 计算机控制, E-mail: hwang@iipc.zju.edu.cn.

(上接第645页)

参考文献(References):

- [1] HA Q P, NGUYEN Q H, RYE D C, et al. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48 (1): 38 – 46.
- [2] HSU Feng-Yih, FU Li-Chen. Nonlinear control of robot manipulators using adaptive fuzzy sliding mode control[J]. *Proceedings of the IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems* 95, 1995, 1(1): 156 – 161.
- [3] EMAMI M R, GOLDENBERG A A, TURKSEN I B. A robust model-based fuzzy-logic controller for robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1998, 3(3): 2500 – 2505.
- [4] TSAY T I, HUANG J H. Robust nonlinear control of robot manipulators[J]. *Proceedings of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1994, 8(3): 2083 – 2088.
- [5] BEKIT B W, WHIDBORNE J F, SENEVIRATNE L D. Fuzzy sliding mode control for a robot manipulator[J]. *Proceedings of the IEEE Int Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 1997, 33(2): 149 – 160.
- [6] GRIMM W M . Robot nonlinear bounds evaluation techniques for robust control[J]. *Adaptive Cont Signal Processing*, 1990, 4(2): 501 – 522.
- [7] MAN Zhihong, PALANISWAMI M . Robust tracking control for rigid robotic manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 154 – 159.

作者简介:

- 林雷** (1970—), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人智能控制, E-mail: leilin@tom.com;
- 王洪瑞** (1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 河北大学校长, 研究领域为机器人控制、现代控制理论、冶金自动化, E-mail: wanghr_999@yahoo.com.cn;
- 任华彬** (1981—), 男, 硕士研究生, 研究领域为机器人智能变换结构控制, E-mail: rhb-888@163.com.