

基于反演设计的机器人自适应动态滑模控制

王洪瑞¹, 冯玉东¹, 刘秀玲², 冯展芳¹

WANG Hong-rui¹, FENG Yu-dong¹, LIU Xiu-ling², FENG Zhan-fang¹

1.燕山大学 西校区电院 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

2.河北大学, 河北 保定 071002

1.Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

2.Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

E-mail: fyd1214@yahoo.com

WANG Hong-rui, FENG Yu-dong, LIU Xiu-ling, et al. Adaptive dynamic sliding mode control for robotic manipulator based on backstepping. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(8): 211-213.

Abstract: A new dynamic sliding mode control law is presented for tracking control of robot manipulator. New switch function based on backstepping method is designed to transfer discontinuity to derivativeness of the control law, so that the chattering of control can be eliminated. The control law can guarantee fast convergence of trajectory tracking error as well as robustness for external disturbances and parameter uncertainties. Simulation results prove the validity of theoretic analysis results.

Key words: robotic manipulator; sliding mode control; backstepping; adaptive

摘要: 针对机器人跟踪控制问题, 设计了一种新型的动态滑模控制器, 采用反演(backstepping)方法设计一种新的切换函数, 将不连续项转移到了控制的一阶导数中, 得到了输入的平滑性的动态滑模控制律。该控制律能保证轨迹跟踪误差的快速收敛性和参数不确定的鲁棒性, 仿真实例验证了该控制算法的有效性。

关键词: 机器人; 滑模控制; 反演设计; 自适应

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.08.061 文章编号: 1002-8331(2010)08-0211-03 文献标识码: A 中图分类号: TP262.4

1 引言

近年来, Backstepping(李亚普诺夫递推)设计方法在非线性系统控制中被广泛研究, 此方法针对带有参数严格反馈形式的非线性系统, 提供了递推的步骤从而保证了系统的全局稳定性。滑模变结构控制不需要被控对象精确的数学模型, 并对一类有界干扰及参数变化具有很强的鲁棒性, 从而在机器人控制领域扮演了重要的角色^[1]。但是, 变结构控制中存在着严重的抖振问题。为了解决这个问题, 许多学者采用了边界层技术, 例如运用饱和函数等代替切换函数来平滑控制信号, 然而由于没有定量规则来确定边界层的厚度, 相应的抖振消除效果难以得到保证, 并且这些方法只能确保跟踪误差的最终一致有界, 在消除抖振的同时也削弱了变结构控制的鲁棒性, 连续化后的变结构控制减弱了其本身的强鲁棒性^[2]。

动态滑模方法通过设计新的切换函数或者将常规滑模变结构控制的切换函数通过微分环节构成新的切换函数。该切换函数与系统控制输入的一阶或高阶导数有关, 可将不连续项转移到控制的一阶或高阶导数中去, 得到在时间上本质连续的动态滑模控制律, 有效地降低了抖振。

2 控制系统的设计

对于 n 关节刚性机器人, 其动力学方程可表示为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = \tau \quad (1)$$

式中, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为机器人关节角度矢量、角速度矢量及角加速度矢量; $\tau \in R^n$ 为关节控制力矩输入矢量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为对称正定的惯量矩阵; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 代表哥氏力与离心力矢量; $G(q) \in R^n$ 为重力项矢量; $F(\dot{q})$ 为摩擦项; $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 是已知函数矩阵, 称作回归矩阵(regressor), θ 是 $r \times 1$ 的机器人物理参数向量^[3]。

对于机器人系统, 令 $x_1 = q, x_2 = \dot{q}, x_3 = \ddot{q}$, 可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = M^{-1}(u - \dot{M}(q)\dot{q} - \dot{C}(q, \dot{q})\dot{q} - C(q, \dot{q})\ddot{q} - \dot{G}(q) - \dot{F}(\dot{q})) \end{cases} \quad (2)$$

基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划项目(the Science and Technology R&D Foundation of Hebei Province of China under Grant No. 07212106D); 河北省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Hebei Province of China under Grant No.F2007000223)。

作者简介: 王洪瑞(1956-), 男, 主要研究领域为机器人系统控制、智能控制、冶金自动化; 冯玉东(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为不确定机器人的智能控制。

收稿日期: 2008-09-11 **修回日期:** 2009-02-16

其中, $u = \tau$ 为设计虚拟控制量, 得到误差状态方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \dot{e}_3 = \ddot{q}_d - \ddot{x}_3 = \ddot{q}_d - M^{-1}(u - \dot{M}(q)\ddot{q} - \dot{C}(q, \dot{q})\dot{q} - C(q, \dot{q})\ddot{q} - \dot{G}(q) - \dot{F}(q)) \end{cases} \quad (3)$$

引入辅助变量:

$$z_1 = e_1, z_2 = e_2 + \alpha_1, z_3 = e_3 + \alpha_3$$

定义 Lyapunov 函数为: $V_1 = (1/2)z_1^T z_1$, 此处以 e_2 为虚拟控制量并对其进行设计, 使得 $\dot{V}_1 \leq 0$, 就可以保证 e_1 渐进收敛, 这里选取:

$$\alpha_1 = -K_1 z_1 \quad (4)$$

式中, $K_1 = \text{diag}(k_1^2, k_1^2, \dots, k_1^n)$ 为正定常增益矩阵。则有:

$$\dot{V}_1 = z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T (z_2 + \alpha_1) = z_1^T z_2 + z_1^T \alpha_1 = z_1^T z_2 - z_1^T K_1 z_1 \quad (5)$$

可以看出, 上式只要满足 $z_2 = 0$, 就可得到 $\dot{V}_1 = -z_1^T K_1 z_1 \leq 0$ 。因此需要下一步设计^[4]使得 z_2 收敛于 0。由以上公式可得:

$$\dot{z}_2 = \dot{e}_2 + K_1 \dot{z}_1 \quad (6)$$

定义 Lyapunov 函数 $V_2 = (1/2)z_2^T z_2$, 则

$$\dot{V}_2 = z_2^T \dot{z}_2 = z_2^T (z_3 + \alpha_2 - \dot{\alpha}_1) = z_2^T z_3 + z_2^T \alpha_2 + K_1 z_2 - K_1^2 z_1 \quad (7)$$

这里选取:

$$\alpha_2 = -K_2 z_2 + K_1^2 z_1 \quad (8)$$

其中 $K_2 = \text{diag}(k_2^2, k_2^2, \dots, k_2^n)$, 则

$$\dot{V}_2 = z_2^T (z_3 + (K_1 - K_2)z_2) = z_2^T z_3 - z_2^T (K_3)z_2 \quad (9)$$

其中 $K_3 = K_1 - K_2$ 也是正定的。

显而易见, 只要是满足 $z_3 = 0$, 则可得出 $\dot{V}_2 = z_2^T (K_3)z_2 \leq 0$, 需要继续设计。现在定义滑模面 $z_3 = e_3 + \alpha_3$, 下一步则要寻找控制律 u , 保证滑模面等于 0 或趋近于原点。

定义 Lyapunov 函数为 $V_3 = (1/2)z_3^T M z_3$, 考虑到 $M(q, \dot{q}) - 2C(\dot{q})$ 满足斜对称性: $x^T (M(q, \dot{q}) - 2C(\dot{q}))x = 0$, 可得:

$$\dot{V}_3 = z_3^T \dot{M} z_3 + z_3^T C z_3 = z_3^T (M \dot{z}_3 + C z_3) \quad (10)$$

为简便起见, 定义正定阵 K_4 满足 $K_4 = K_2 K_1 - K_1^2$, 则可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = z_3^T \{-u + M(\ddot{q}_d + K_2 e_3 + K_4 e_2) + C(\ddot{q}_d + K_2 e_2 + K_4 e_1) + \\ (\dot{M} + M)x_3 + (C + \dot{C})x_2 + (G + \dot{G}) + (F + \dot{F})\} \end{aligned} \quad (11)$$

这里定义向量 H :

$$\begin{aligned} H = M(\ddot{q}_d + K_2 e_3 + K_4 e_2) + C(\ddot{q}_d + K_2 e_2 + K_4 e_1) + (\dot{M} + M)x_3 + \\ (C + \dot{C})x_2 + (G + \dot{G}) + (F + \dot{F}) \end{aligned} \quad (12)$$

由于机器人拉格朗日动力学方程可以线性化为(1), 显而易见向量 H 也可以线性化为^[5]:

$$H = \Gamma(t, q, \dot{q}, \ddot{q}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d) \phi \quad (13)$$

则 $\dot{V}_3 = z_3^T (-u + \Gamma \phi)$ 。

设 $\hat{\phi}$ 为参数 ϕ 的估计值^[4], 设计虚拟控制律为:

$$u = \Gamma \hat{\phi} - |\Gamma| \text{sgn}(z_3) + \varepsilon \text{sgn}(z_3) \quad (14)$$

其中满足

$$\varepsilon_{ij} \geq |\Gamma_{ij}| \quad (15)$$

定义 Lyapunov 函数为 $V_4 = V_3 + (1/2)(\phi - \hat{\phi})^2$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = \dot{V}_3 + \dot{\phi}(\phi - \hat{\phi}) = \\ z_3^T (-\Gamma \hat{\phi} + \Gamma \phi - \varepsilon \text{sgn}(z_3) + |\Gamma| \text{sgn}(z_3)) - \dot{\phi}(\phi - \hat{\phi}) = \\ z_3^T (\Gamma(\phi - \hat{\phi}) - \varepsilon \text{sgn}(z_3) + |\Gamma| \text{sgn}(z_3)) - \dot{\phi}(\phi - \hat{\phi}) \end{aligned}$$

设计自适应律为 $\dot{\phi} = z_3^T \Gamma = (e_3 + \alpha_3) \Gamma$, 则可得:

$$\dot{V}_4 = -z_3^T \varepsilon \text{sgn}(z_3) + z_3^T |\Gamma| \text{sgn}(z_3) \leq - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i |z_3^i|$$

显然 \dot{V}_4 是负定的, 而 V_4 是关于 z_3 的正定函数, 所以所定义的滑模面 z_3 是全局渐进收敛的^[6]。根据误差状态方程(3)可以可以得跟踪误差渐进地收敛到原点。

3 仿真实验

将该文所提出的控制方法用于二自由度机器人仿真, 机器人的动态模型为:

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \\ M(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_2^2) + 2m_2 l_1 l_2 c_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 c_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 c_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \\ C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 \dot{q}_2 s_2 & -m_2 l_1 l_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) s_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{q}_1 s_2 & 0 \end{bmatrix} \\ G(q) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) l_1 g c_1 + m_2 l_2 g c_{12} \\ m_2 l_2 g c_{12} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$m_1 = 4 \text{ kg}, m_2 = 2 \text{ kg}, l_1 = 1 \text{ m}, l_2 = 1 \text{ m}$$

$$s_i = \sin(q_i), c_i = \cos(q_i), i = 1, 2$$

$$c_{12} = \cos(q_1 + q_2), s_{12} = \sin(q_1 + q_2)$$

其中 g 为重力加速度。采样时间为 1 ms。

设期望轨迹为:

$$q_{d1} = 0.5 \sin t, q_{d2} = -0.5 \cos t$$

初始关节位置和速度分别为:

$$q_1(0) = 0.5, q_2(0) = 0$$

$$\dot{q}_1(0) = \dot{q}_2(0) = 0$$

图 1、图 2 为传统滑模控制的跟踪误差和控制输入, 图 3、图 4 为该文算法的跟踪误差和控制输入, 从仿真结果可以看出, 该文的控制算法保证了滑模控制轨迹的跟踪精度, 有效地消除了抖振现象。

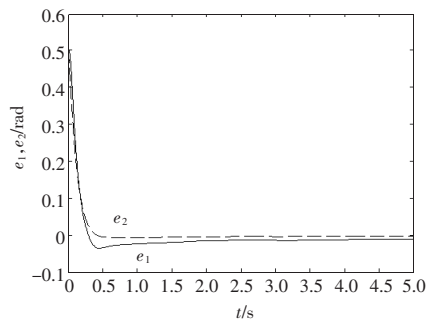


图1 关节1、关节2的跟踪误差

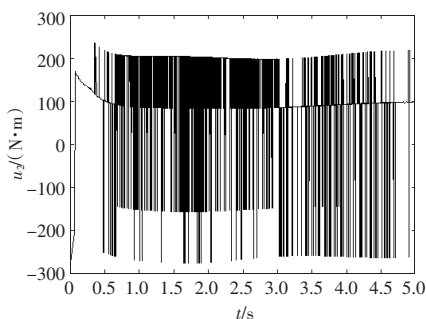


图2 关节2的控制输入

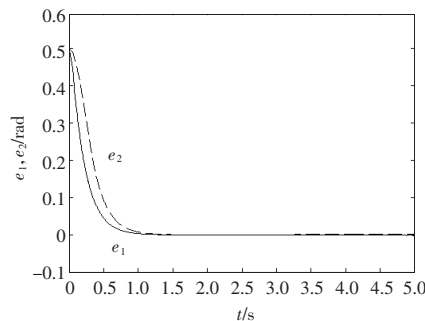


图3 关节1、关节2的跟踪误差

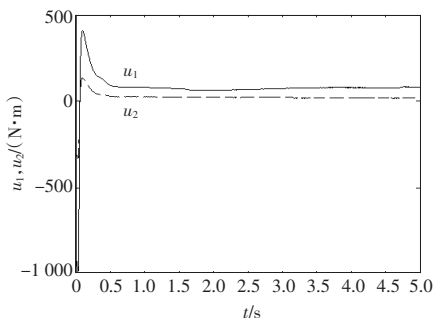


图4 关节1、关节2的控制输入

4 结束语

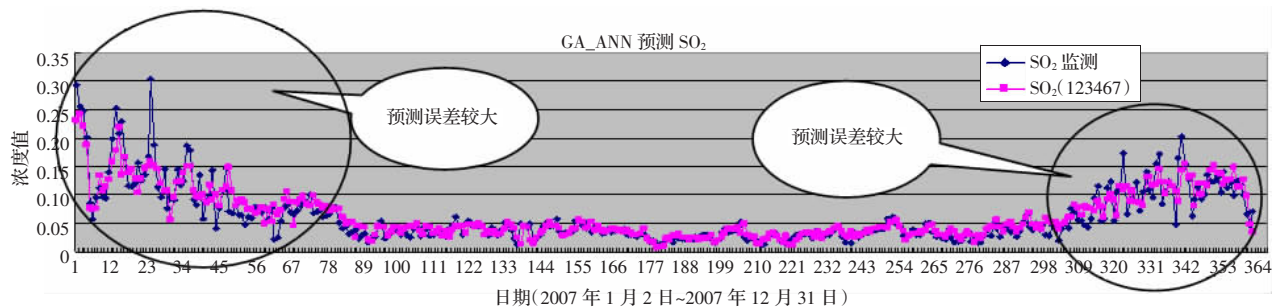
基于动态滑模控制理论,引入了虚拟控制量 u ,采用 back-stepping 方法设计一类新的切换函数,把控制器中的不连续项转移到虚拟控制量中,很好地削弱了控制输入的抖振现象。仿真

结果表明,该控制算法在削弱实际控制输入的抖振的同时,能够保证控制系统鲁棒性,较好地完成了轨迹跟踪的任务。

参考文献:

- [1] 陈卫东,唐得志,王海涛,等.基于 Backstepping 的机器人鲁棒跟踪控制[J].系统仿真学报,2004,16(4):837-838.
- [2] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996.
- [3] Spong M W. On the robust control of robot manipulators[J].IEEE Trans Automat Contr,1992,AC-37(11):1782-1786.
- [4] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [5] Kanellkopouls I, Kokotovic P V, Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable system[J].IEEE Trans Automat Contr,1991,36:1241-1253.
- [6] 魏丽霞,崔宝同.离散时间系统的滑模控制器设计与仿真研究[J].计算机应用研究,2006,24(12):201-205.

(上接 201 页)

图4 GA_ANN 空气质量预报模型 SO_2 浓度的预测情况

物在多介质、多界面上的输送、湍流(或涡旋)扩散、化学转化及干湿迁移等过程。在研究复合型、区域性大气污染问题的形成机制,以及在 $\text{PM}_{2.5}$ 、 MP_{10} 、臭氧、VOC 和能见度等预测中具有明显的优势。由于 CMAQ 的源排放模式需要有准确的污染源参数、排放强度及其空间分布和动态变化信息,我国现有的源排放清单难以客观描述城市污染源的时空变化特征,这在很大程度上影响了 CMAQ 模式在我国城市空气质量预测中的精度, CMAQ 模式存在类似其他模式污染浓度预测量与实况相比明显的“系统性”误差。因此难以发挥 CMAQ 模式在辅助环境工作者进行环境评估以及做出环境控制决策方面的作用。许建明等^[3]研究了统计方法对 CMAQ 模型进行修正。

下一步的工作是将 GA_ANN 算法与 CMAQ 模型相结合,

建立基于 GA_ANN 算法的 CMAQ 校正系统,充分发挥 CMAQ 模型在污染物控制和决策方面的作用,并推动 CMAQ 模型在我国的业务化运行。

参考文献:

- [1] 白晓平,李红,张启明.神经网络在空气污染预报中的研究进展[J].科技导报,2006,24(12).
- [2] Wang Kai, Yang Ju-feng, Shi Guang-shun, et al. An expanded training set based validation method to avoid overfitting for neural network classifier[C]/ICNC'08, 2008.
- [3] 许建明,徐祥德,刘煜,等. CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正模型预测途径研究[J].中国科学: D 辑,地球科学,2005,35(增刊 I): 131-144.