

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.022

基于名义模型的机械手 PI 鲁棒滑模控制研究^①

马莉丽¹, 蒋 猛²

1. 中国人民武装警察部队工程大学 装备工程学院, 西安 710086; 2. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 针对多关节机械手关节轨迹跟踪控制问题, 将机械手动力学模型分解为名义模型和建模误差两部分, 并对两部分用跟踪位置误差和速度误差定义滑模函数, 对这两部分设计控制律, 提出了基于名义模型的机械手 PI 鲁棒滑模控制方法. 通过定义基于积分型的 Lyapunov 函数, 证明了控制系统是全局渐近稳定的. 利用该控制器对三关节机械手进行关节力矩控制, 使三关节能在 3 s 内实现对理想轨迹的跟踪, 三关节均具有良好的位置跟踪和速度跟踪性能. 仿真实验验证了控制器设计的有效性, 并且通过合理选择控制器参数, 能够消除滑模控制器输出所存在的抖振现象.

关键词: 机械手; 名义动力学模型; 建模误差; 滑模控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2016)12-0133-07

机械手也称为机械臂、多关节机器人, 是具有多个自由度的开链机构. 在工业应用的机器人中, 机械手占有很大的比例, 是工业机器人的主体^[1-3]. 机械手是一个十分复杂的多输入多输出(MIMO)非线性系统, 其动力学特征具有时变不确定性、多变量强耦合性和高度非线性^[4-6]. 其控制问题主要是对机械手的各关节或末端执行器的位置进行控制, 使其能够以期望的动态品质跟踪给定的轨迹或稳定在指定的位置上, 即所设计的控制系统的任务是轨迹跟踪控制或位置镇定控制^[7-8]. 由于机械手结构参数的不确定性、作业环境干扰的不确定性、结构共振模式的不确定性, 都将导致机械手动力学模型存在建模误差, 很可能引起控制系统质的变化, 甚至造成系统不稳定. 针对这类不确定性机械手的控制策略主要有 3 种, 滑模控制^[9-12]、自适应控制^[13-15]和鲁棒控制^[16-17]. 其中, 滑模控制无需精确的动力学模型和专门的多变量解耦, 只需根据轨迹跟踪或位置控制误差合理设计滑模面, 具有响应速度快、无超调及鲁棒性强等优点而成为不确定性机械手控制的首选方法^[18-21], 但该方法易导致控制器输出存在严重抖振现象, 所以滑模控制通常与其他控制方法联合使用. 本文将机械手动力学模型分解为名义模型和建模误差两部分, 分别针对两部分设计控制律, 从而构成机械手的 PI 鲁棒滑模控制器, 利用该控制器对三关节机械手关节力矩的控制, 实现了对关节变量的理想轨迹跟踪控制, 验证了控制器设计的有效性. 同时, 只要合理选择控制器参数, 完全可以消除控制器输出的抖振现象.

1 机械手 PI 鲁棒滑模控制器设计

n 关节机械手动力学模型为

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

式中, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ 为机械手关节位置, $\dot{q}$ 和 $\ddot{q}$ 分别为关节速度和加速度矢量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为正

① 收稿日期: 2015-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005246); 中国人民武装警察部队工程大学基础研究基金资助项目(WJY201509).

作者简介: 马莉丽(1980-), 女, 江苏如东人, 博士, 讲师, 主要从事机电系统智能控制及其自动化、军事装备理论及其应用方向的研究.

定质量惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为哥氏力和离心力矩阵; $G(q) \in \mathbf{R}^n$ 为重力矢量; $\tau_d(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^n$ 为外界干扰; $\tau \in \mathbf{R}^n$ 为关节控制力矩矢量.

工程实际中, 由于机械手负载质量、连杆质量、长度及其质心位置等物理量未知或只有部分已知, 驱动器动力学、结构共振模式等高频未建模动态和动摩擦力、关节柔性等低频未建模动态、作业环境干扰、驱动器饱和问题等因素的存在, 造成 $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 通常是不精确的, 可表示为

$$\begin{cases} M(q) = M_0(q) + E_M \\ C(q, \dot{q}) = C_0(q, \dot{q}) + E_C \\ G(q) = G_0(q) + E_G \end{cases} \quad (2)$$

式中: $M_0(q)$ 、 $C_0(q, \dot{q})$ 和 $G_0(q)$ 分别为机械手名义模型的质量惯性矩阵、哥氏力及离心力矩阵和重力矢量; E_M 、 E_C 和 E_G 分别为 $M(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 和 $G(q)$ 的建模误差.

定义关节位置跟踪误差为

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (3)$$

式中: $q_d(t)$ 为关节理想位置信号; $q(t)$ 为关节实际角度信号.

定义滑模函数(滑模面)

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d + \Lambda e \quad \Lambda > 0 \quad (4)$$

定义

$$\dot{q}_r = s(t) + \dot{q}(t) \quad (5)$$

则

$$\ddot{q}_r = \dot{s}(t) + \ddot{q}(t) \quad (6)$$

由式(3) — 式(5), 得

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d + \Lambda e \quad \ddot{q}_r = \ddot{q}_d + \Lambda \dot{e} \quad (7)$$

于是, 式(1) 变为

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)(\ddot{q}_r - s) + C(q, \dot{q})(\dot{q}_r - s) + G(q) + \tau_d = \\ &M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + G(q) - M(q)s - C(q, \dot{q})s + \tau_d = \\ &M_0(q)\ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_r + G_0(q) - M(q)s - C(q, \dot{q})s + E' + \tau_d \end{aligned} \quad (8)$$

式中:

$$E' = E_M\ddot{q}_r + E_C\dot{q}_r + E_G$$

现设计控制器

$$\tau = \tau_m + K_p s + K_i \int s dt + \tau_s \quad (9)$$

式中: τ_m 为基于机械手名义模型的控制力矩矢量; K_p 为比例常数矩阵, K_i 为积分常数矩阵, K_p 和 K_i 中各元素为正数; $K_p s + K_i \int s dt$ 称为 PI 滑模面; τ_s 为鲁棒项.

式(9) 中

$$\tau_m = M_0(q)\ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_r + G_0(q), \tau_s = K_s \text{sgn}(s) \quad (10)$$

式中: K_s 为鲁棒项系数, 且 $K_s = \text{diag}[k_{sii}], k_{sii} \geq |E_i|, i = 1, \dots, n$ (n 为机械手关节数),

$$E = E' + \tau_d$$

由式(8) — 式(10), 有

$$\begin{aligned} &M_0(q)\ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_r + G_0(q) - C(q, \dot{q})s + E' + \tau_s = \\ &M_0(q)\ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_r + G_0(q) + K_p s + K_i \int s dt + K_s \text{sgn}(s) \end{aligned}$$

则

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{s} dt = -\mathbf{K}_p \mathbf{s} - \mathbf{K}_s \text{sgn}(\mathbf{s}) + \mathbf{E} \quad (11)$$

2 稳定性分析

定理 对于系统(1), 在控制律(9)的作用下是全局渐近稳定的.

证 定义基于积分型的 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M} \mathbf{s} + \frac{1}{2} \left(\int_0^t \mathbf{s} d\delta \right)^T \mathbf{K}_i \left(\int_0^t \mathbf{s} d\delta \right) \quad (12)$$

显然, V 是正定的, 则

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T (\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2}\dot{\mathbf{M}}\mathbf{s} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{s} d\delta)$$

考虑到机械手动力学方程的斜对称性, 即 $(\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$ 是一个斜对称矩阵, 有

$$\mathbf{s}^T (\dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \mathbf{s} = 0$$

则

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T (\mathbf{M}\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}\mathbf{s} + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{s} d\delta) \quad (13)$$

将式(11)代入式(13), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_p \mathbf{s} - \mathbf{s}^T \mathbf{K}_s \text{sgn}(\mathbf{s}) + \mathbf{s}^T \mathbf{E} = \\ &= -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_p \mathbf{s} - \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{sii} |\mathbf{s}|_i + \mathbf{s}^T \mathbf{E} \end{aligned}$$

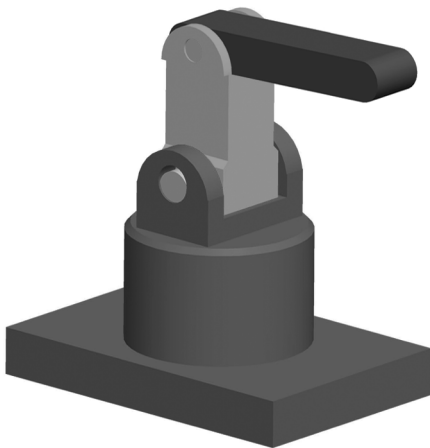
由于 $\mathbf{K}_{sii} \geq |\mathbf{E}_i|$, 则

$$\dot{V} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{K}_p \mathbf{s} \leq 0$$

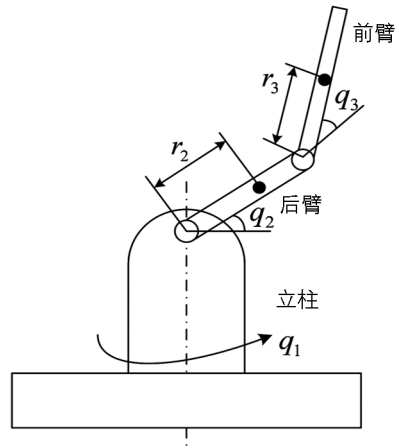
显然, $\dot{V}$ 是负定的, 即控制系统是全局渐近稳定的. 证毕.

3 控制器有效性的验证

为了验证所设计控制器(9)的有效性, 现以图 1 所示的三关节机械手为例进行仿真实验. 图 1 中, 后臂质量为 m_2 , 前臂质量为 m_3 , 后臂长为 l_2 , 前臂长为 l_3 , 后臂质心到关节 2 的距离为 r_2 , 前臂质心到关节 3 的距离为 r_3 , 立柱转动惯量为 I_1 , 后臂转动惯量为 I_2 , 前臂转动惯量为 I_3 , 不计关节摩擦力矩.



(a) 立体图



(b) 平面示意图

图 1 三关节机械手

从图 1 可看出, 由于只考虑了由立柱、前臂和后臂组成的 3 个自由度, 略去了手腕部分的自由度, 所以其主要运动由前、后臂的俯仰及立柱的回转所构成. 在式(1) 中

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau}_d = [\tau_{d1} \quad \tau_{d2} \quad \tau_{d3}]^T \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$$

其中,

$$M_{11} = I_1 + a_1 \cos^2(q_2) + a_2 \cos^2(q_2 + a_3) + 2a_3 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3)$$

$$M_{12} = M_{21} = M_{13} = M_{31} = 0, M_{22} = I_2 + a_1 + a_2 + 2a_3 \cos(q_3)$$

$$M_{23} = M_{32} = a_2 + a_3 \cos(q_3), M_{33} = I_3 + a_2$$

$$C_{11} = -\frac{1}{2}a_1 \dot{q}_2 \sin(2q_2) - \frac{1}{2}a_2 (\dot{a}_2 + \dot{q}_3) \sin(2q_2 + 2q_3) -$$

$$a_3 \dot{q}_2 \sin(2q_2 + q_3) - a_3 \dot{q}_3 \cos(q_2) \sin(q_2 + q_3)$$

$$C_{12} = -\frac{1}{2}a_1 \dot{q}_1 \sin(2q_2) - \frac{1}{2}a_2 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + 2q_3) - a_3 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + q_3)$$

$$C_{13} = -\frac{1}{2}a_1 \dot{q}_1 \sin(2q_2 + 2q_3) - a_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \sin(q_2 + q_3)$$

$$C_{21} = -C_{12}$$

$$C_{22} = -a_3 \dot{q}_3 \sin(q_3)$$

$$C_{23} = -a_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) \sin(q_3)$$

$$C_{31} = -C_{13}, C_{32} = -a_3 \dot{q}_2 \sin(q_3)$$

$$C_{33} = 0$$

$$g_1 = 0$$

$$g_2 = b_1 \cos(q_2) + b_2 \cos(q_2 + q_3)$$

$$g_3 = b_2 \cos(q_2 + q_3)$$

其中,

$$a_1 = m_2 r_2^2 + m_3 l_2^2 \quad a_2 = m_3 r_3^2 \quad a_3 = m_3 r_3 l_2$$

$$b_1 = (m_2 r_2 + m_3 l_2)g \quad b_2 = m_3 r_3 g$$

机械手参数:

$$m_2 = 30 \text{ kg} \quad m_3 = 26 \text{ kg}$$

$$r_2 = 0.6 \text{ m} \quad r_3 = 0.5 \text{ m}$$

$$l_2 = 1.0 \text{ m} \quad I_1 = 3.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_2 = 2.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad I_3 = 1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

关节初始值:

$$\mathbf{q} = [0.3 \quad -0.4 \quad 0.5]^\top \quad \dot{\mathbf{q}} = [0.0 \quad 0.0 \quad 0.0]^\top$$

控制器参数:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) &= 0.9\mathbf{M}(\mathbf{q}) & \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= 0.9\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) &= 0.9\mathbf{G}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{K}_p &= \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} & \mathbf{K}_s &= \begin{bmatrix} 25 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 \\ 0 & 0 & 25 \end{bmatrix} & \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

三关节的理想轨迹:

$$q_{d1} = 0.5\sin(\pi t) \quad q_{d2} = \sin(\pi t) \quad q_{d3} = 0.3\sin(\pi t)$$

仿真结果如图 2 和图 3 所示. 图 3 为 3 个关节的位置(角度)和速度(角速度)跟踪结果, 从图中可以看出关节 1、关节 2 和关节 3 分别在 0.5 s、2 s 和 2.7 s 时跟踪理想轨迹, 而且 3 个关节均能稳定地跟踪理想轨迹.

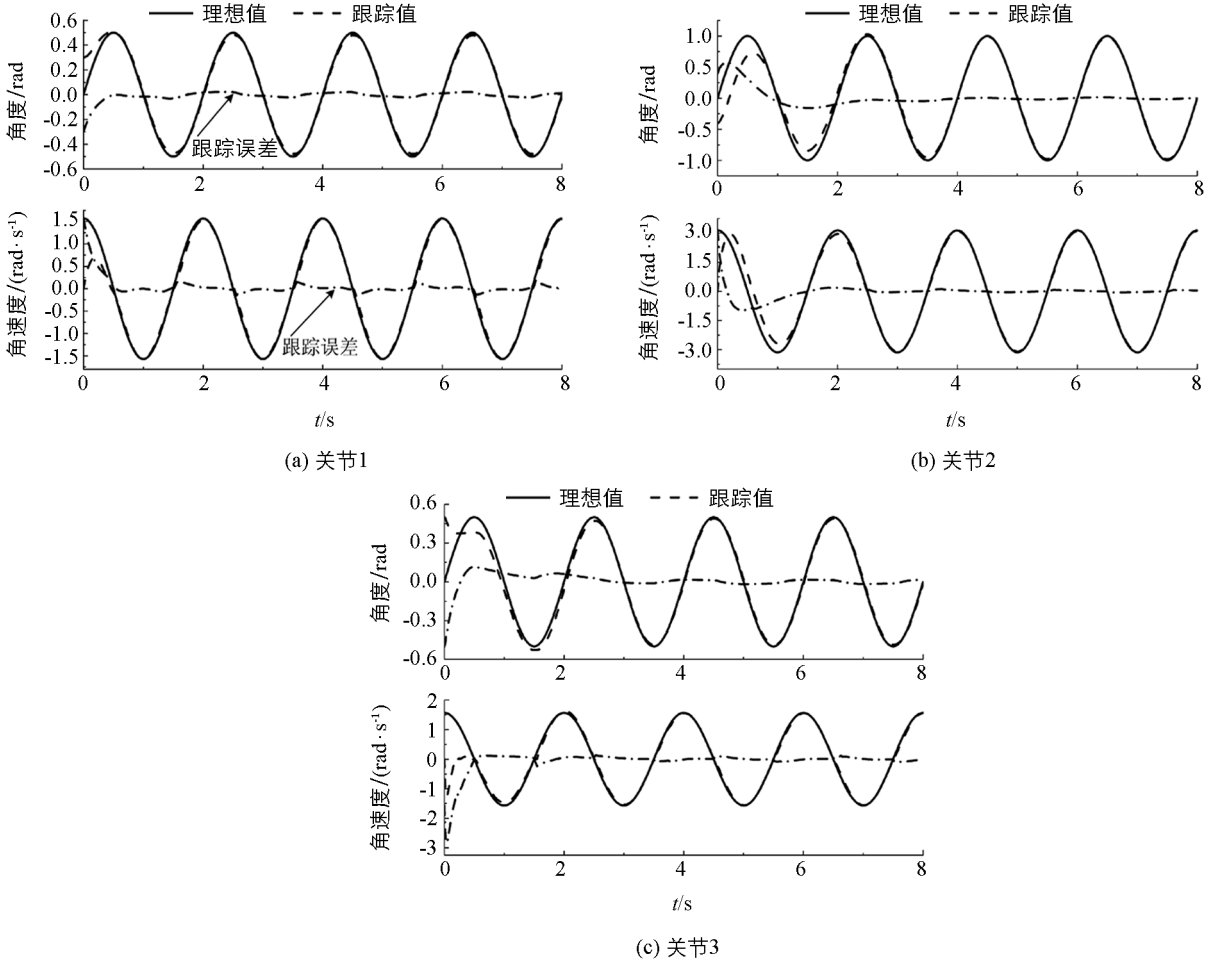


图 2 三关节的角度和角速度跟踪

图 3 为分别作用于 3 个关节的控制力矩. 图 4 为当选择鲁棒项系数 $\mathbf{K}_s = \mathbf{0}_{3 \times 3}$ 时, 作用于关节 3 上的控制力矩, 从图中可以看出存在严重抖振现象, 这种抖振现象是由于滑模控制的不连续性造成的, 即控制系统“结构”随时间变化的开关特性造成的. 通过对比图 3 和图 4 可知, 合理的鲁棒项系数可以完全消除这种抖振现象.

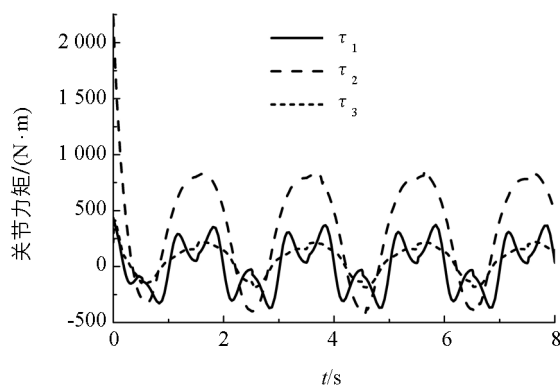


图 3 三关节的控制力矩

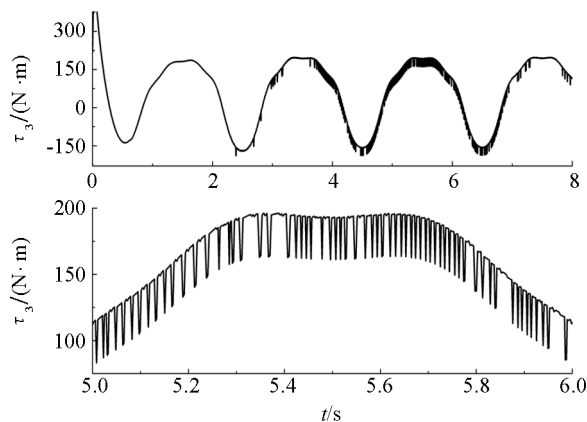


图 4 关节 3 控制力矩输出的抖振现象及其局部放大

4 结 论

基于多关节机械手名义模型设计的 PI 鲁棒滑模控制器解决了时变不确定性、多变量强耦合性和高度非线性的机械手难以控制的问题. 通过定义基于积分型的 Lyapunov 函数, 证明了控制系统是全局渐近稳定的. 将所设计的控制器用于控制三关节机械手关节力矩, 使三关节跟踪理想轨迹. 通过仿真实验, 结果表明了关节 1、关节 2 和关节 3 分别在 0.5 s、2 s 和 2.7 s 时跟踪相应的理想轨迹, 并且通过合理选择控制器参数, 尤其是合理选择鲁棒项系数, 能够消除滑模控制器输出所存在的抖振现象.

参考文献:

- [1] 印 峰, 王耀南, 夏汉民. 多个关节机器人逆运动学问题的实时求解 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1143—1148.
- [2] 许可诚, 顾寄南, 王富良. 换刀机械手控制系统的设计与研究 [J]. 机械设计与制造, 2011(8): 158—160.
- [3] 王凤利, 冯亚磊, 董吉顺, 等. 基于 kana 方法的关节机器人举升机构的动力学分析 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(1): 30—32.
- [4] 李雪琴, 殷国富, 刘 爽, 等. 基于雅可比矩阵分析法的多关节机器人机构设计技术研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(S1): 252—256.
- [5] 张 奇, 谢宗武, 刘 宏, 等. 基于无源性理论的柔性关节控制器设计 [J]. 机器人, 2013, 35(1): 23—31.
- [6] 邵 兵, 吴洪涛, 程世利, 等. 基于李群李代数的主被动关节机器人动力学及控制 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(3): 253—257.
- [7] 党 培, 谭云福, 申利民. 基于多关节机器人的能量最小消耗控制策略 [J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4575—4577.
- [8] 钟 斌, 何培祥. 基于神经网络观测器的起重机吊重摆角速度软测量研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(10): 105—110.
- [9] 邵克勇, 马千惠, 邹 运, 等. 基于径向基函数神经网络的多关节机器人滑模控制器 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1385—1387.
- [10] LONG Li-jun, XIE Cheng-kang. Neural Network Control Design for a Nonlinear Uncertain Output Feedback System [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31(11): 7—14.
- [11] 胡盛斌, 陆敏恂. 多个关节机器人反馈线性化双模糊滑模控制 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(1): 105—110, 115.
- [12] ISLAM S, LIU P X. Robust Adaptive Fuzzy Output Feedback Control System for Robot Manipulators [J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2011, 16(2): 288—296.
- [13] 罗召成, 朱世强, 王会方. 机器人自适应 PID 饱和输出反馈控制 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31(3): 66—70.
- [14] 王 梅, 吴铁军, 屠大维, 等. 多个关节机器人分布式协作运动规划 [J]. 信息与控制, 2011, 40(4): 489—496.
- [15] DELAVARI H, GHADERI R, RANJBAR A, et al. Fuzzy Fractional Order Sliding Mode Controller for Nonlinear Sys-

tems [J]. Commun in Nonlinear Sci Numer and Simulat, 2010, 15 (4): 963—978.

[16] ODA M. Space Robot Experiments on NASDA'S ETSVII Satellite; Preliminary Overview of the Experiment Results [C] //IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1390—1395.

[17] HARMON F G, FRANK A A, JOSHI S S. The Control of a Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for a Small Unmanned Aerial Vehicle Using a CMAC Neural Network [J]. Neural Networks, 2012, 18(5) : 772—780.

[18] 梁 亮, 陈龙森, 蒋清山. 自动装填机械手的运动学分析与仿真 [J]. 四川兵工学报, 2015, 36(5): 49—52.

[19] 李 楠, 李文鑫, 薛方正. 改进的关节机器人神经网络 PID 控制器 [J]. 控制工程, 2013, 2(4): 1052—1054, 1059.

[20] 王金鹏, 吴向东, 张 兵, 等. 滑模控制在变载荷高性能系统中的应用 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(6): 53—59.

[21] 谭运生, 沈 岨, 黄满洪, 等. 基于滑模控制的 4WS 汽车闭环操纵稳定性研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(11): 12—17.

Research on Manipulator's PI Robot Sliding Model Control Based on Manipulator's Nominal Model

MA Li-li¹, JIANG Meng²

1. Equipment Engineering College, Engineering University of Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China;
2. School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to attain trajectory tracking control for multi-links manipulator's joints, the manipulator's dynamic model was decomposed two sections, that is, nominal model and modeling error. The sliding mode function was defined with tracking position error and velocity error aiming at nominal model and modeling error, and the control law was designed for nominal model and modeling error. So, PI robust sliding mode control method was designed based on manipulator's nominal model. The control system's global asymptotical stability was proved through defining integral-type Lyapunov function. The PI robust sliding mode controller was used to control joints' torque for manipulator with three joints. Three joints can trace ideal trajectory in 3s. Three joints have favorable performance of position tracking and velocity tracking. Simulation experiments test and verify the designed controller's effectiveness. Especially, the sliding mode controller's control output chattering can be eliminated through reasonably selecting controller's parameters.

Key words: manipulator; nominal dynamic model; modeling error; sliding mode control; trajectory tracking

责任编辑 汤振金

