

一种前馈补偿和模糊滑模相结合的柔性机械臂控制

党进¹, 倪风雷¹, 刘业超¹, 刘宏^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨;
2. 德国宇航中心机器人与机电一体化研究所, 82230, 德国慕尼黑)

摘要: 针对柔性关节机器人控制系统中存在的扰动力、摩擦力、参数变化以及建模误差等问题, 将扰动力分为确定性扰动和不确定性扰动、摩擦力分为线性和非线性部分, 并在此基础上提出了一种前馈补偿和模糊滑模相结合的鲁棒控制器. 机器人自身结构的相关量、确定性扰动以及摩擦力的线性部分, 可以通过控制器的计算力矩和前馈补偿部分进行有效控制, 并通过模糊滑模控制器来克服外界的不确定性扰动、摩擦力的非线性部分、参数变化以及建模误差等. 在 HIT 四自由度柔性机械臂上进行了控制器的相关实验, 实验结果表明, 该控制器具有良好的位置跟踪性能和较强的抗干扰能力.

关键词: 柔性机械臂; 前馈补偿; 模糊滑模; 控制器

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)03-0075-06

Control Strategy for Flexible Manipulator Based on Feedforward Compensation and Fuzzy-Sliding Mode Control

DANG Jin¹, NI Fenglei¹, LIU Yechao¹, LIU Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Institute of Robotics and Mechatronics, Germany Aerospace Center, Munich 82230, Germany)

Abstract: Considering external disturbance, friction, parameters variation, modeling errors and other issues in flexible joint robot control system, the external disturbance is divided into deterministic part and uncertainty part, and the friction into linear part and nonlinear part, then a new structure robust controller based on the combination of feedforward compensation and fuzzy sliding mode control is proposed. The controller consists of two parts, the part associated with the robot structure itself, deterministic disturbance and the linear part of the friction can be eliminate effectively by computed torque and feedforward compensation. And the fuzzy-sliding mode control of the proposed controller can compensate the external uncertainty disturbance, nonlinear part of friction, parameters variation, modeling error and so on. The experiment results on the platform of HIT four degrees of freedom flexible manipulator show the good position tracking performance and strong anti-interference ability.

Keywords: flexible manipulator; feedforward compensation; fuzzy-sliding mode; controller

空间机械臂具有体积小、能耗低、负载自重比大的特点, 并且能代替宇航员完成抓捕、对接、维修等危险作业, 是近年来研究的热点. 空间机器人在航天

器中的使用也已经进入了实验使用阶段, 如德国宇航的 ROTEX、ROKVISS^[1-2], 欧空局的 ERA, 日本宇航中心的 ETS-VII^[3-4]等. 通常, 影响柔性关节机

械臂的动态精度和稳定性的主要因素为柔性问题(臂杆柔性、谐波减速器和力矩传感器的使用)、摩擦问题(模型复杂、参数多、难辨识)、控制参数变化问题(负载力矩的变化、受控对象的控制参数大范围的变化)、不确定性扰动以及建模误差等,采取增加传感器的方法来提取系统更多的变化量且用于控制^[5],但却受制于传感器技术的发展.变结构控制具有控制简单、解耦等优点,但存在着控制增益过大和抖振现象.奇异摄动法是在假设关节柔性较小的情况下,采用力矩环为内环,来解决关节动力学中变化较快的部分,位置环作为外环,解决了机器人动力学中变化较慢的部分^[6-7],但在应用时,关节柔性、力矩及加速度信号的好坏将会影响到整个系统的带宽.反馈线性化法已被 De Luca 等人^[8]使用,这种方法的计算量较大,无法实现反馈线性化,因此难以在实践中得到应用.自适应控制是近年来研究的热点^[9],但对于不确定扰动的抑制比较困难.

针对上述出现的问题,本文以哈尔滨工业大学(HIT)自主研发的卫星在轨自维护四自由度机械臂地面实验原理样机为平台,提出了一种前馈补偿和模糊滑模相结合的柔性机械臂控制方法,并通过试验对所提出的控制方法进行了验证.

1 HIT 四自由度柔性关节机械臂

如图 1 所示,关节采用永磁同步电机驱动,通过谐波减速器进行扭矩传递,减速比为 160,运动学参数与坐标布置见表 1.在电机端和关节末端安装有旋转变压器和电位计,分别用于测量电机端和关节端的位置.

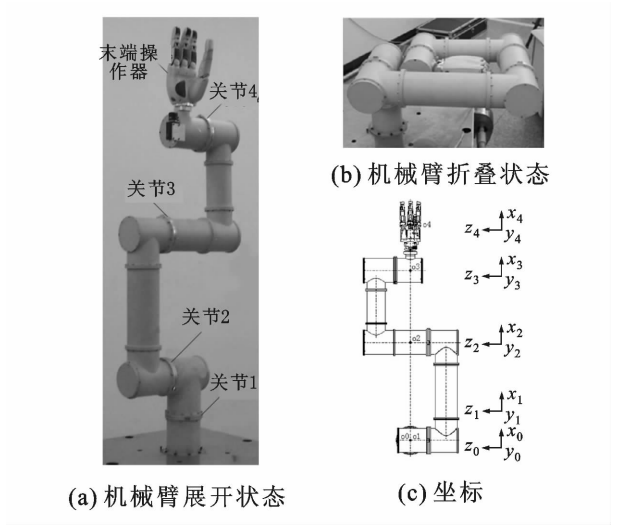


图 1 HIT 四自由度机械臂及其坐标系

表 1 HIT 四自由度关节机器人的参数

参数	连杆			
	1	2	3	4
d_1/mm	0	530	390	225
$\theta_1/(\text{^\circ})$	-90	0	0	0
d_2/mm	0	0	0	0
$\theta_2/(\text{^\circ})$	0	0	0	12
m/kg	4.229	7.730	6.640	4.020
$J/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1.857	1.857	0.150	0.150
$k/\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$	72.154	72.154	58.128	58.128

注: d_1 :沿 x_i 测量的距离; θ_1 :绕 x_1 旋转的角度; d_2 :沿 z_i 测量的距离; θ_2 :绕 z_i 旋转的角度; m :连杆质量; J :电机转动惯量; k :关节刚度系数.

为了提高控制性能,机器人控制采取数字信号处理器(DSP)和现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的硬件结构,各关节底层的信号处理、电机驱动及控制部分由关节 FPGA 完成,而机器人的上层控制算法在 DSP 下完成. DSP 与关节 FPGA 间采用高速串行通信方式的多点低压差分串行总线(MLVDS),通信速率最高可达 5 kHz,从而保证了控制算法的实时性.

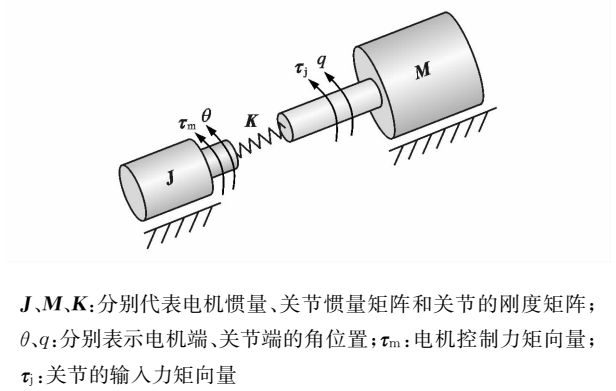
2 柔性机械臂动力学及控制器设计

2.1 柔性机械臂动力学模型

本文研究的机器人的柔性主要集中于关节上,连杆视为刚性杆.利用 Spong 的假设^[10],将柔性关节简化成如图 2 所示的弹簧,其动力学模型为

$$\left. \begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) &= \tau_j + \tau_e \\ \tau_m &= J\ddot{\theta} + \tau_j + \tau_f \\ \tau_j &= K(\theta - q) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C 表示哥氏力及离心力项; g 表示重力项; τ_f 为摩擦力; τ_e 为关节处的扰动力.



J, M, K :分别代表电机惯量、关节惯量矩阵和关节的刚度矩阵;
 θ, q :分别表示电机端、关节端的角位置; τ_m :电机控制力矩向量;
 τ_j :关节的输入力矩向量

图 2 机械臂关节的简化模型

2. 2 控制器设计

本文从补偿的角度,将扰动力分为确定性扰动 F_v 与不确定性扰动 F_u ,即

$$\tau_e = F_v + F_u$$

令 $\tau = \tau_m - B\ddot{\theta}$,得

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau - \tau_F + F_v + F_u \tag{2}$$

根据式(2)可知,在设计柔性关节机器人的控制器时,主要考虑的问题为:①与机器人自身结构相关参数的确定;②摩擦力项;③确定性扰动;④关节运动中的不确定性干扰;⑤上述模型中未考虑建模误差、参数变化等其他未知因素。

HIT 四自由度柔性关节机器人自身结构相关的运动学和动力学参数可借助三维机械 CAD 程序来精确计算, F_v 的存在规律则可通过测量方法来获取。由于谐波减速器的使用加剧了摩擦的复杂性和建模难度,因此本文将摩擦力项分成线性部分 F_f 和非线性部分 F_n 。摩擦力的线性部分由静摩擦 f_s 、库仑摩擦 f_c 、黏性摩擦组成,即

$$F_f = \begin{cases} f_s, & v = 0 \\ f_v v + f_c \operatorname{sgn}(v), & v \neq 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: v 表示速度。将 F_n 、 F_u 等不确定量统一用函数 F_i 表示,因此柔性机械臂的关节模型可以改写为

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau - F_f + F_v + F_i \tag{4}$$

2.2.1 计算力矩加前馈补偿 定义误差 $e = q_d - q$,误差变化率 $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$, $\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$,其中 q_d 为期望轨迹, q 为实际轨迹。式(4)还可改写为

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = M(q)(\ddot{q}_d - \ddot{e}) + C(q,\dot{q})(\dot{q}_d - \dot{e}) + g(q) \tag{5}$$

对于式(4),可分两步进行控制,即计算力矩加前馈补偿器控制部分

$$\tau_{FC} = [\widetilde{M}(q)(\ddot{q}_d + K_{FD}\dot{e} + K_{FP}e) + \widetilde{C}(q,\dot{q})\dot{q} + \widetilde{g}(q)] + [\widetilde{M}(q)u_v + \widetilde{M}(q)u_f] \tag{6}$$

式中: K_{FP} 、 K_{FD} 为控制增益; $\widetilde{M}$ 、 $\widetilde{C}$ 、 $\widetilde{g}$ 分别为 M 、 C 和 g 的名义值; u_v 为 F_v 的前馈补偿量; u_f 为摩擦力线性部分的前馈补偿量。

若系统不存在模型偏差和外界干扰,可以通过选择不同的控制增益,即可任意定义系统闭环的收敛特性。但是,在实际系统中不可避免地存在模型偏差和外界扰动(即存在 F_i),此时传统的 PID 就无法兼顾精度和稳定性的要求。

2.2.2 模糊滑模控制器 滑模控制具有强鲁棒性,能够抵御外部的干扰和参数摄动等不确定性因素的

影响,但存在增益过大和抖振的缺点。为了能够利用滑模控制的强鲁棒性和抗不确定性因素影响的优点,本文在 τ_{FC} 的基础上叠加滑模变结构控制,同时为了克服滑模控制引起的抖振现象,在滑模变结构控制时引入了模糊规则^[11-14],根据系统的输出动态来调节滑模控制的输出。计算力矩和前馈补偿使得滑模控制的增益大幅减小,而模糊控制的作用使滑模控制的抖振现象得到了改善。

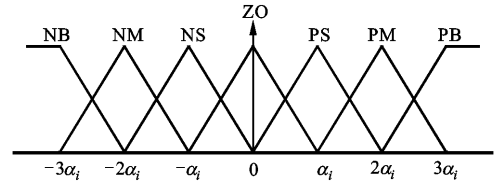
系统的控制律由两部分组成,即

$$\tau = \tau_{FC} + \tau_{FS} \tag{7}$$

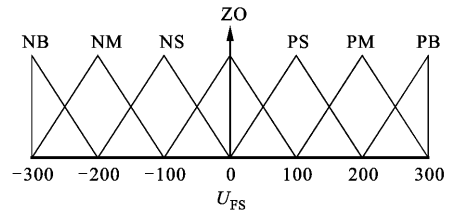
在实际系统中,要测量系统所有的状态变量是非常困难的,因此设计时,选取系统最主要的 2 个状态变量来设计误差和误差的变化率^[13-14],其切换面方程即滑模面变量为

$$S(t) = \dot{e} + \lambda e, \quad \lambda > 0 \tag{8}$$

实验发现,采用均匀分布的论域可以满足精度要求且算法实现简单,如图 3 所示。模糊量用 7 个语言变量来描述,NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。当 $i = 1$ 、 $\alpha_1 = 0.2$ 时,表示 S 的输入隶属度函数;当 $i = 2$ 、 $\alpha_2 = 1$ 时,表示 $\dot{S}$ 的输入隶属度函数



(a)输入隶属度函数



(b)输出隶属度函数

图 3 隶属度函数

模糊控制的等效控制律为

$$\dot{S}(t) + \lambda S = 0 \tag{9}$$

根据式(9),闭环控制系统动态渐近稳定,由于 λ 严格正定,因此 $S(t)$ 及 $\dot{S}(t)$ 将逐渐趋近于 0。根据式(8)、式(9)对 $S(t)$ 、 $\dot{S}(t)$ 的定义,系统的 e 和 $\dot{e}$ 也将逐渐趋近于 0。对于二维模糊控制系统,当 e 较大

时,控制系统的主要任务是消除误差,这时对 e 在控制系统中的加权应该加大. 当 e 较小时,由于系统已接近稳态,控制系统的主要任务是使系统尽快稳定,因此必须尽快减小超调,这就要求控制规则中加大对误差变化的加权,如表 2 所示.

表 2 模糊控制规则表

U_{FS}	dS						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS
NM	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	NS	NS	NS	NM	NM	NM	NB
PB	NS	NM	NM	NM	NB	NB	NB

采用 Mamdani 推理法处理模糊推理规则,可得到模糊变结构的控制输入量(见图 4).

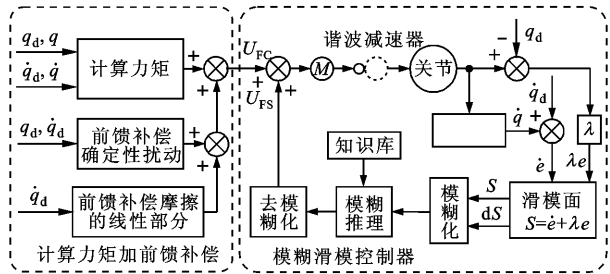


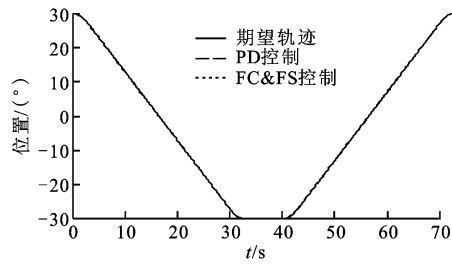
图 4 控制器的结构框图

3 实验结果

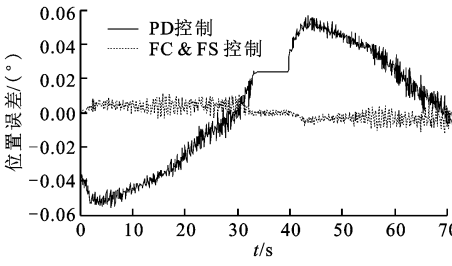
为了验证控制器的有效性,在 HIT 四自由度关节机器人上对受不确定性因素影响最大的关节 2 进行了实验,结果如图 5~图 7 所示. 实验 1 为位置跟踪实验,用于验证控制器的位置跟踪性能. 实验中,关节 2 以 0.017 5 rad/s 的速度跟踪期望的轨迹.

为了便于描述,图 5 中前馈补偿加模糊滑模相结合的控制器的用 FC & FS 替代. 采用传统的 PD 控制跟踪期望轨迹时,位置误差在 $\pm 0.055^\circ$,而采用前馈补偿和模糊滑模相结合的控制方法时,位置误差为 $\pm 0.014^\circ$,并且从图 5c 中可以看出,采用新型前馈补偿和模糊滑模相结合的控制方法时,机械臂能以更加平稳的速度跟踪期望轨迹,即采用文中设计的前馈补偿器和模糊滑模相结合的控制方法,能够以更

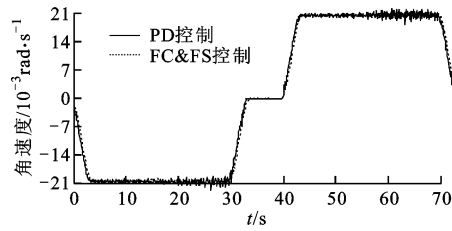
高的精度、更平稳的速度来跟踪期望轨迹.



(a) 轨迹

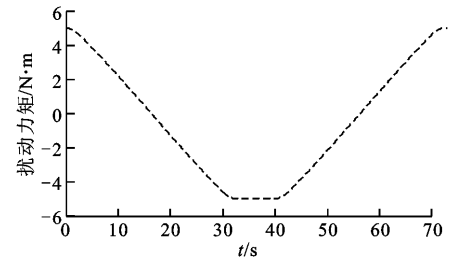


(b) 位置误差



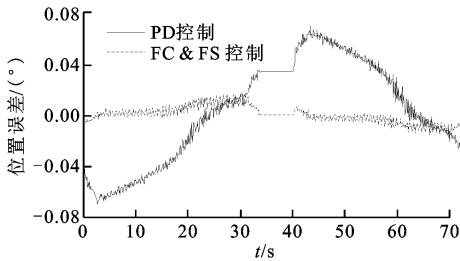
(c) 速度

图 5 关节的速度与位置误差曲线



(a) 扰动力矩

实验 2 为参数慢变实验,用于检验系统参数发生变化时控制器的控制效果. 实验时机械臂关节沿着图 5a 光滑的曲线运动,为了模拟系统参数的变化,在臂杆的末端施加一个渐变负载力矩,力矩大小如图 6a 所示. 从图 5b 和图 6b 中可以看出:采用 PD 控制时,关节的位置跟踪误差从不加负载时的 $\pm 0.055^\circ$ 增加到 $\pm 0.075^\circ$,位置跟踪精度变化明显(误差范围扩大 0.04°),而采用前馈补偿和模糊滑



(b)施加扰动力矩时的关节位置误差

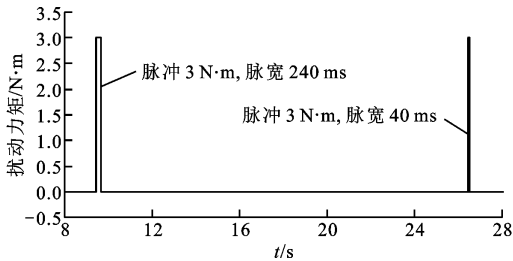
图 6 不确定性扰动时关节位置的误差
模相结合的控制时,关节位置跟踪误差从未加扰动时的 $\pm 0.014^{\circ}$ 增加到 $\pm 0.016^{\circ}$ (误差范围扩大 0.004°),位置跟踪精度基本不变,说明前馈补偿和模糊滑模相结合的控制对参数变化及扰动不灵敏(鲁棒性),因此无需再次调节控制参数.当参数发生变化时,采用传统的 PD 控制,根据负载变化重新调节控制参数也能达到较好的效果,但参数的重复调节会给控制带来许多不便.

实验 3 为不确定性扰动实验,用以验证控制器对于随机性扰动的控制效果.实验中,关节 2 以 $1^{\circ}/\text{s}$ 的速度跟踪光滑的期望轨迹,运动过程中施加 2 次随机性的扰动.第 1 次随机性扰动的力矩为 $3\text{ N}\cdot\text{m}$,扰动作用时间为 240 ms ;第 2 次随机性扰动力矩为 $3\text{ N}\cdot\text{m}$,扰动作用时间为 40 ms .

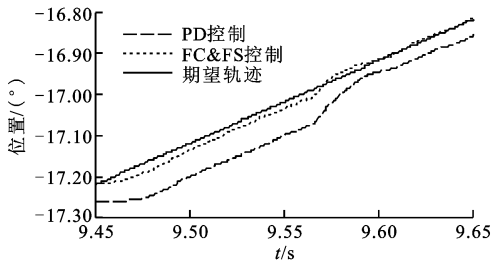
从图 7 中可以看出:在没有干扰时,关节的角度和速度都能以较高精度跟踪期望轨迹;当出现随机性扰动时,由于外力能够及时地反映到控制器的模糊滑模控制部分,因此模糊滑模控制器能够更迅速地控制电机速度,从而以较快的响应速度跟踪期望轨迹,且关节速度的波动明显减弱.实验 2 和实验 3 的结果充分体现了模糊滑模控制的特点,即系统的滑模运动与控制对象的参数变化、系统的外部扰动等无关,前馈补偿与模糊滑模相结合的控制继承了模糊滑膜控制的鲁棒性.

4 结 论

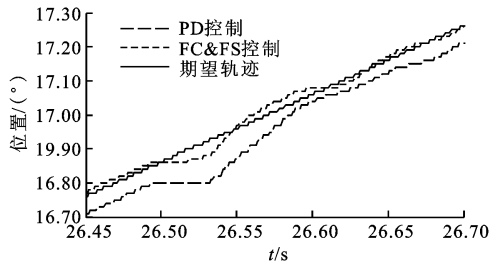
本文分析了设计柔性关节机器人控制器时需要考虑的主要问题,针对控制系统中存在非线性摩擦和扰动力的特点,将复杂的摩擦力分为线性和非线性部分,将扰动力分为确定和不确定性扰动,并在此基础上提出了一种由前馈补偿和模糊滑模相结合的新型鲁棒控制器.通过计算力矩和前馈补偿弥补了滑模控制增益过大的缺点,模糊控制规则使得滑模控制的抖颤现象得到了明显改善.本文以 HIT 四自由度关节机械臂为平台,对该控制器进行了相关的



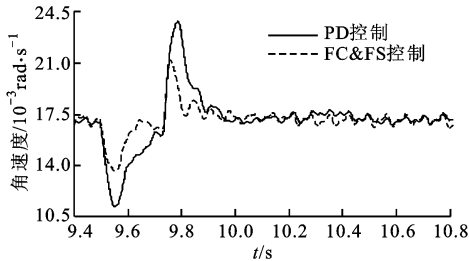
(a)随机性扰动



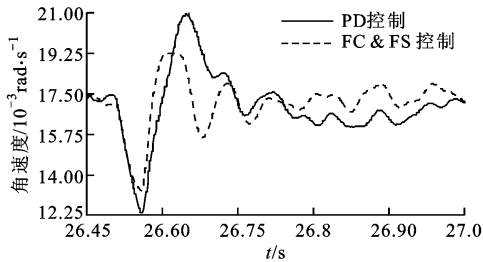
(b)第 1 次随机扰动时的位置跟踪



(c)第 2 次随机扰动时的位置跟踪



(d)第 1 次随机扰动时的速度



(e)第 2 次随机扰动时的速度

图 7 不确定性扰动时的关节位置及速度曲线

实验,实验结果表明,该控制器具有良好的位置跟踪性能和较强的抗干扰能力。

参考文献:

- [1] HIRZINGER G, BRUNNER B. ROTEX—the first remotely controlled robot in space [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 2604-2611.
- [2] ALBU-SCHAFFER A, BERTLEFF W, REBELE B, et al. ROKVISS—robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 3880-3885.
- [3] VERHOEVEN D. Space mechanisms and tribology for joints of the European robot arm [C]//Proceedings of the 8th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Toulouse, France: ESA, 1999: 335-340.
- [4] ODA M. Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite: preliminary overview of the experiment results [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 1390-1395.
- [5] 邱志成,谈大龙. 基于加速度反馈的柔性关节机械臂接触力控制 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 37-42.
- QIU Zhicheng, TAN Dalong. On acceleration sensor-based feedback control for contact force of the flexible joint manipulator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 37-42.
- [6] 刘业超,金明河,刘宏. 柔性关节机器人基于柔性补偿的奇异摄动控制 [J]. 机器人, 2009, 30(5): 460-466.
- LIU Yechao, JIN Minghe, LIU Hong. Singular perturbation control for flexible-joint manipulator based on flexibility compensation [J]. Robot, 2008, 30(5): 460-466.
- [7] ALBU-SCHAFFER A, OTT C, FRESES U. Cartesian impedance control of redundant robots: recent results with the DLR-light-weight-arms [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 14-19.
- [8] ALESSANDRO D L, PASQUALE L. A general algo-

rithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 504-510.

- [9] 王景,王昊瀛,刘良栋. 空间机械臂的鲁棒复合自适应控制 [J]. 自动化学报, 2002, 28(3): 378-383.
- WANG Jing, WANG Haoying, LIU Liangdong. Robust composite adaptive control for space manipulators [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(3): 378-383.
- [10] SPONG M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1987, 109(4): 310-319.
- [11] UTKIN V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives [J]. IEEE Trans and Electron, 1993, 40(1): 23-26.
- [12] SLOTINE J J E, SASTRY S S. Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulator [J]. International Journal of Control, 1983, 38(2): 465-492.
- [13] LIN J, LIAN R J, HUANG C N, et al. Enhanced fuzzy sliding mode controller for active suspension systems [J]. Mechatronics, 2009, 19(7): 1178-1190.
- [14] DELAVARI H, GHADERI R, RANJBAR A, et al. Fuzzy fractional order sliding mode controller for non-linear systems [J]. Commun in Nonlinear Sci Numer and Simulat, 2010, 15(4): 963-978.

[本刊相关文献链接]

可控磁悬浮系统的转子周期性振动抑制. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 55-58.

关节片上位置伺服系统控制器的实现. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 70-74.

采用模块化思想的汽车电器智能化设计方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 111-115.

免疫单神经元 PID 控制在永磁交流伺服系统中的应用. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 76-82.

静态输出反馈多目标控制的求解方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 49-52.

采用计算流体力学数值模拟的比例积分控制器. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 90-93.

(编辑 管咏梅)