

柔性关节空间机械臂奇异摄动自适应 PD 控制仿真研究^①

刘福才^② 刘 林 兰 会 赵 旭

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 建立了柔性关节机械臂空间漂浮和地面调试两阶段的动力学模型,并为柔性关节机械臂末端轨迹跟踪控制设计了基于奇异摄动的自适应 PD 控制算法,实现了对机械臂末端位置跟踪在空间漂浮和地面调试两阶段的控制。用奇异摄动法实现了将高阶系统降阶为两个低阶系统,即快子系统和慢子系统,再针对两子系统分别设计控制器。对控制系统进行了稳定性分析和仿真验证,结果表明设计的控制算法既可以实现地面装调时的轨迹跟踪控制,也可以较好地实现空间漂浮状态下的轨迹跟踪控制。

关键词 自由漂浮, 柔性关节, 空间机械臂, 自适应, 奇异摄动

0 引 言

航天事业的发展,显示出了机械臂在空间作业中的越来越重要的作用。机械臂的工作精度会直接影响到空间作业的安全性及准确性,所以提高机械臂的工作精度是十分重要的^[1]。影响机械臂工作精度的因素有很多,其中之一是关节的柔性,关节处存在的柔性将会产生滞后、振动和非线性耦合等负面问题^[2]。本文针对机械臂末端轨迹跟踪问题进行了研究,分别建立了地面存在重力情况和空间微重力情况下的柔性关节机械臂模型,然后结合自适应算法、PD 控制法和奇异摄动法,为柔性关节机械臂设计了控制器,并进行了收敛性分析和仿真研究。仿真结果证实,设计的控制器在地面重力环境和空间微重力环境均可以实现良好的跟踪,并与奇异摄动 PD 控制方法仿真结果进行了比较。

1 相关工作

国内外学者针对柔性关节带来的一系列问题进

行了诸多研究。Sweet^[3]等通过实验发现关节柔性是设计机械臂高精度轨迹跟踪控制器的障碍。现今已有大量文献提出了多种减小关节柔性带来振动影响的控制方法。主要有解耦控制和积分反步法、奇异摄动法、基于无源性理论的控制方法等。其中奇异摄动法是将柔性关节机械臂系统分为快子系统和慢子系统。然后分别进行控制,得到较好的控制效果。Alireza^[4]等设计了自适应模糊控制器对冗余度机械臂进行轨迹跟踪控制,主要目的是最小化沿轨迹的每个点的末端误差,使末端执行器能够精确跟踪预定轨迹。收敛速率大大改善,并且仿真结果验证了所提出的方法的效率。Benosman^[5]等对平面多连杆柔性臂进行了消除振动的关节轨迹控制。针对慢关节运动和快关节运动以因果控制为基础使用两种方案进行控制,并以二连杆为例,进行了数值模拟和实验结果验证。张晓东^[6]等采用结合自适应模糊和逐步逆向设计的控制方法,通过实验验证了控制器实现了良好的跟踪效果。张奇^[7]等为柔性关节机械臂设计了基于无源理论的控制,有效提高了控制精度,并减小了振动。Fareh^[8]等针对二连杆柔性机械臂跟踪理想轨迹在关节空间提出了一种

① 国家自然科学基金(51605415), 载人航天预先研究项目(040301)和河北省自然科学基金(F2015203362, F2016203494)资助项目。
② 男,1966年生,博士,教授,博士生导师;研究方向:空间机构运动行为分析与控制技术;联系人, E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2017-05-17)

分布式控制策略。分布式控制策略将系统分解为两个子系统,并利用 Lyapunov 方法证明了所得到的跟踪误差的稳定性。而且进行了仿真研究,验证了方法的有效性。Kandroodi^[9]等针对柔性关节机械臂的轨迹跟踪和振动抑制提出了滑模变结构控制和反控制方法。为了配合反控制的使用,在模型中引入了混沌动力学。最后利用柔性关节实验验证了方法的有效性。但是没有同时考虑地面装调和空间在轨应用两个阶段的情况。陈志勇^[10]等基于奇异摄动方法,为慢变子系统设计了增广自适应控制算法。刘福才^[11]等为柔性关节机械臂设计了基于奇异摄动的自适应鲁棒控制,对地面和空间的情况都进行了考虑,但是空间阶段时是假设机械臂基座固定情况下进行研究的。刘福才^[12]等为柔性关节机械臂设计了基于奇异摄动的自抗扰控制器,同样也是假设空间基座固定情况下进行研究的。

进行空间在轨服役的空间机构都需要先在地面进行装调实验。王文魁^[13]在论文中提到,目前自由落体、水槽等方法能够模拟微重力环境,但不能进行长时有效地模拟,并且悬吊、气浮等方法真实性相对较差。现有大部分文献中并没有考虑重力改变所带来的影响下的柔性关节空间机械臂的运动行为。

关节柔性的存在会给控制增加难度,单纯的 PD 控制并不能得到很好的控制效果。从奇异摄动法的应用方面可知,对柔性关节的控制如仅有位置和速度等反馈则难以达到控制效果,所以需要引入力矩反馈,以此实现更好的控制效果。本文采用奇异摄动法与自适应 PD 控制相结合的方法对重力环境变化的空间机械臂进行轨迹跟踪控制。自适应 PD 控制是一种相对简单并且适用性较强的算法,在带有柔性关节空间机械臂的控制中,该算法还没有得到应用。

2 系统模型建立

根据 Spong 提出的由扭转弹簧作为电机和机械臂关节之间连接机制的简化模型^[14],并假设该扭转弹簧是线性的,具有常值弹性系数。柔性关节机械臂以及柔性关节局部示意图如图 1 和图 2 所示。

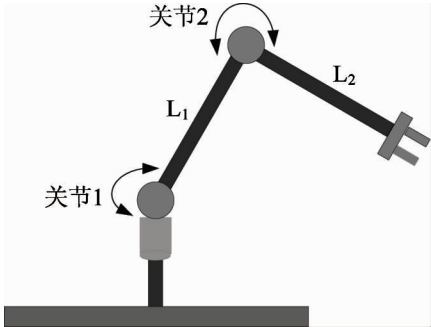


图 1 柔性关节机械臂

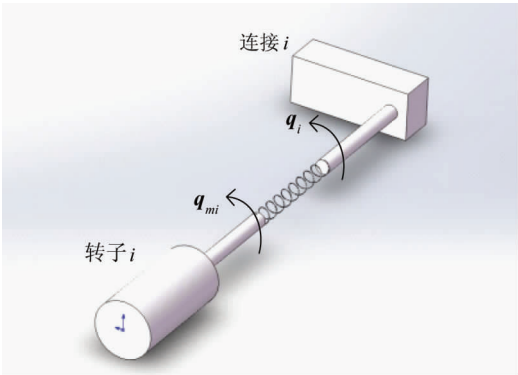


图 2 柔性关节简化模型

图 2 中, q 为关节的角度矢量, q_m 为电机转子的角位移矢量,根据 Spong 理论得到的微重力环境下柔性关节机械臂欠驱动形式的动力学模型如下:

$$\begin{aligned} J_m \ddot{q}_m + \tau &= \tau_m \\ M(q) \begin{bmatrix} \ddot{q}_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + C(q, \dot{q}) \begin{bmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \\ \tau &= k(q_m - q) \end{aligned} \tag{1}$$

式中, $q_b \in R^3$ 表示基座的位置和姿态, $q - q_m$ 为连接轴的振动矢量。 J_m 表示电机惯量矩阵,是正定矩阵。 k 是正定对称矩阵,表示柔性关节刚度。 τ 为控制力矩, τ_m 为由电机产生的驱动力矩。 $M(q) \in R^{(n+3) \times (n+3)}$ 为系统惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in R^{(n+3) \times (n+3)}$ 为离心力和哥氏力矩阵,执行机构动力学和杆的动力学通过弹性力矩项 $k(q_m - q)$ 耦合。

地面装调时,装置会受到重力影响,所以在建立动力学模型时应该将装置的重力势能考虑在内。地面装调阶段的模型如下:

$$\begin{aligned} J_m \ddot{q}_m + \tau &= \tau_m \\ M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G &= \tau \\ \tau &= k(q_m - q) \end{aligned} \tag{2}$$

式中, $G(q) \in \mathbf{R}^n$ 为重力载荷向量矩阵, 可写成如下形式:

$$G = \varphi(q)g \quad (3)$$

3 控制器设计与稳定性分析

首先, 依据奇异摄动理论将系统分为快子系统和慢子系统, 再分别对快变子系统和慢变子系统设计控制器, 实现对系统的控制^[15,16]:

$$\tau_m = \tau_s + \tau_f \quad (4)$$

式中, τ_f 为快变子系统控制力矩, 在突变情况下, 由其提供快速响应, 减小弹性振动。 τ_s 为慢变子系统控制力矩, 作用于准稳态系统。

由式(1)或式(2), 可得关节力矩 τ 的方程:

$$J_m k^{-1} \ddot{\tau} + \tau = \tau_s + \tau_f - J_m \ddot{q} \quad (5)$$

设计快变子系统控制器:

$$\tau_f = -K_v \dot{\tau} \quad (6)$$

对于慢变子系统设计自适应 PD 控制器:

$$\tau_s = -K_p e - K_d \dot{e} + m \times \dot{\hat{g}} \quad (7)$$

式中, 关节角度误差 $e = q_d - q$, 关节角度误差变化率 $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$, q_d 是期望的角度位置矢量。设计自适应律:

$$\dot{\hat{g}} = -\Gamma^{-1} \varphi(q) \eta \quad (8)$$

用 Lyapunov 稳定性理论, 判别系统稳定性, 不同重力环境下系统的闭环方程:

$$M(q) \ddot{e} + C(q, \dot{q}) \dot{e} + K_p e + K_d \dot{e} = -d \quad (9)$$

其中: $d = M(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + m \times \dot{\hat{g}}$ 。

选取 Lyapunov 函数:

$$V(e, \dot{e}) = 1/2 \dot{e}^T M(q) \dot{e} + 1/2 e^T K_p e + \alpha e^T M(q) f(e) \quad (10)$$

其中: $f(e) = \frac{e}{1 + \|e\|} = \beta e$, $0 < \alpha < 1$ 。然后计算 $V(e, \dot{e})$, 并将闭环方程带入。求得:

$$\begin{aligned} V(e, \dot{e}) &= -\dot{e}^T K_d \dot{e} - \alpha f(e)^T K_p e - \alpha f(e)^T K_d \dot{e} \\ &\quad + \alpha \dot{e}^T M(q) \dot{f}(e) + \alpha \dot{e}^T C(q, \dot{q}) f(e) \\ &\quad - (\dot{e}^T + \alpha f(e)^T) d \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$d = M(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + m \times \dot{\hat{g}}$$

$$\begin{aligned} &\leq \sup(\|M(q)\| \|\ddot{q}_d\| + \|C(q, \dot{q})\| \|\dot{q}_d\| \\ &\quad + \|m \times \dot{\hat{g}}\|) + \sup(k_c \|q_d\|) \|\dot{e}\| \end{aligned}$$

因为

$$\begin{aligned} \dot{e}^T C(q, \dot{q}) f(e) &= \dot{e}^T C(q, \dot{q}_d + \dot{e}) f(e) \\ &\leq \beta \sup(k_{c1} \|\dot{q}_d\|) \|e\| \|\dot{e}\| \\ &\quad + k_{c2} \|\dot{e}\|^2 \\ &= \beta \gamma_3 \|e\| \|\dot{e}\| + \gamma_4 \|\dot{e}\|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\|e\| \|\dot{e}\| \leq \frac{e^2 + \dot{e}^2}{2} \quad (13)$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{V}(e, \dot{e}) &\leq -(\lambda_{\min}(K_d) - \gamma_5 - \frac{\alpha \beta \gamma_6}{2}) \|\dot{e}\|^2 + \gamma_1 \|e\| \\ &\quad - \alpha \beta (\lambda_{\min}(K_p) - \frac{\gamma_6}{2}) \|e\|^2 + \alpha \beta \gamma_1 \|e\| \end{aligned} \quad (14)$$

其中:

$$\gamma_5 = 2\alpha \beta \lambda_{\max}(M(q)) + \gamma_2 + \alpha \gamma_4$$

$$\gamma_6 = -\lambda_{\min}(k_d) + \gamma_2 + \gamma_3$$

由不等式定理得

$$\begin{aligned} &-(\lambda_{\min}(K_d) - \gamma_5 - \frac{\alpha \beta \gamma_6}{2}) \|\dot{e}\|^2 + \gamma_1 \|e\| \\ &\leq \frac{\gamma_1^2}{\frac{1}{2}(\lambda_{\min}(K_d) - \gamma_5 - \frac{\alpha \beta \gamma_6}{2})} - \frac{1}{4}(\lambda_{\min}(K_d) \\ &\quad - \gamma_5 - \frac{\alpha \beta \gamma_6}{2}) \|\dot{e}\|^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &-(\lambda_{\min}(K_p) - \frac{\gamma_6}{2}) \|e\|^2 + \gamma_1 \|e\| \\ &\leq \frac{\gamma_1^2}{(\lambda_{\min}(K_p) - \frac{\gamma_6}{2})} - \frac{1}{4}(\lambda_{\min}(K_p) - \frac{\gamma_6}{2}) \|e\|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

综上, 有

$$\dot{V}(e, \dot{e}) \leq -\zeta_1 \|\dot{e}\|^2 - \zeta_2 \|e\|^2 + \eta \quad (17)$$

由于 α 可取很小的值, 因此总可以找到足够大的 K_p 和 K_d , 以保证 $\zeta_1 > 0, \zeta_2 > 0$ 。使得 e 和 $\dot{e}$ 按指数收敛到半径 $r_i (i=1, 2)$ 的封闭球。

图3为柔性关节空间机械臂基于奇异摄动自适应 PD 控制结构框图。

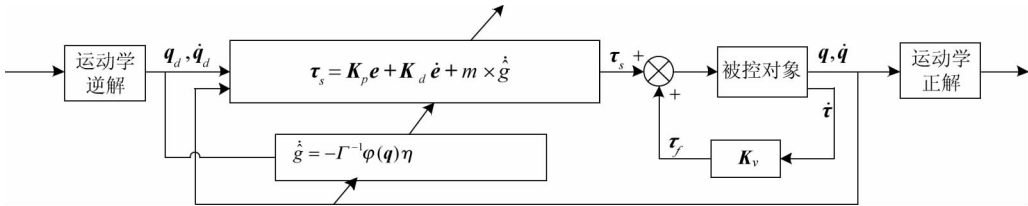


图 3 柔性关节空间机械臂基于奇异摄动自适应 PD 控制结构框图

4 仿真研究

对本文提出的两个阶段的模型进行了仿真研究,表 1 为仿真时机械臂杆的参数取值。

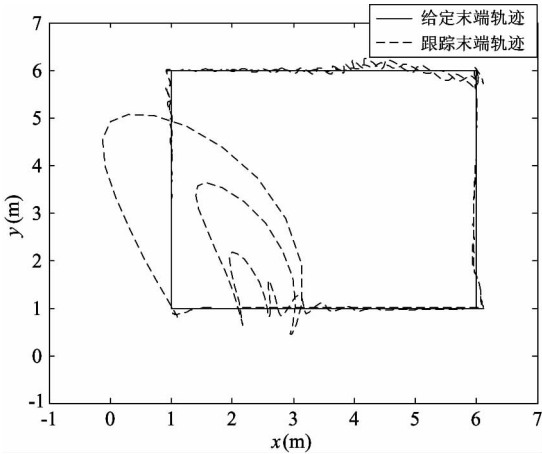
表 1 平面二连杆柔性关节空间机械臂仿真参数				
杆件号	a_i (m)	b_i (m)	m_i (kg)	I_i (kg · m ²)
1	2.25	2.25	1.5	2.54
2	2.25	2.25	1.5	2.54

选择以(1,1)为起点边长为 5m 逆时针运动的正方形轨迹,正方形与圆或直线等形状的轨迹相比,其控制要求更高,并且便于观察在正方形四个角轨迹突变处的跟踪情况。

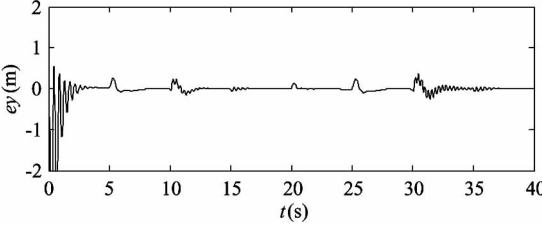
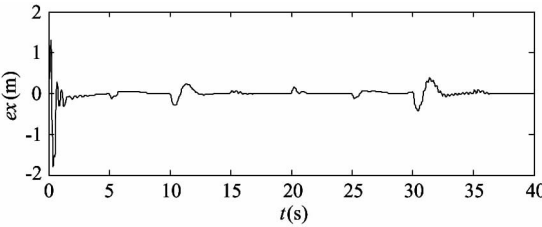
相关参数: $K = diag\{500\}$, $J_m = diag\{1\}$ 。控制器参数选择: $K_v = diag\{75\}$, $\Gamma = diag\{5\}$ 比例环节参数 $K_p = diag\{500\}$, 微分环节参数 $k_d = diag\{300\}$ 。

与利用基于奇异摄动的 PD 控制器的控制结果进行比较。相应的仿真结果如图 4 和图 5 所示。

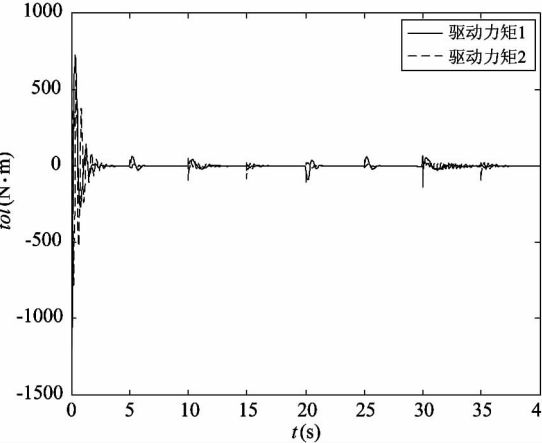
从图 4(a)和图 5(a)可知,基于奇异摄动的自适应 PD 控制在地面调试阶段和空间漂浮阶段都能较好地跟踪,在转角处会出现较大误差,在刚开始运动时,因为惯性的存在,会使机械臂存在较大抖动,产生较大误差。从图 4(b)和图 5(b)可知,在转角处最大的跟踪误差约为 0.3m。在其他位置时误差相对较小。从图 4(c)和图 5(c)可知,关节驱动力矩在转角处出现略大峰值。有一定的抖动,说明控制器没有很好地抑制抖动影响。并且可知空间阶段的控制力矩比地面阶段的力矩小很多。这一对比结果符合实际情况,空间微重力环境下,机构处于悬浮状态,内部的相互作用力偏小,所以,需要的驱动力矩也偏小些。



(a) 末端轨迹跟踪图

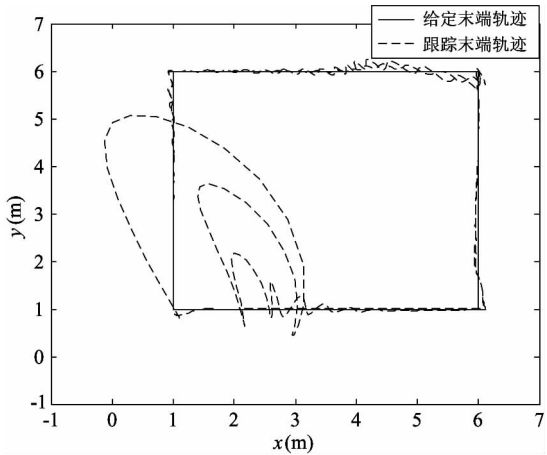


(b) 位置误差图

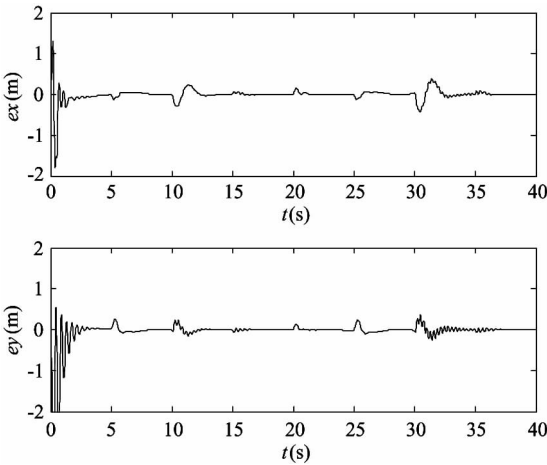


(c) 关节驱动力矩

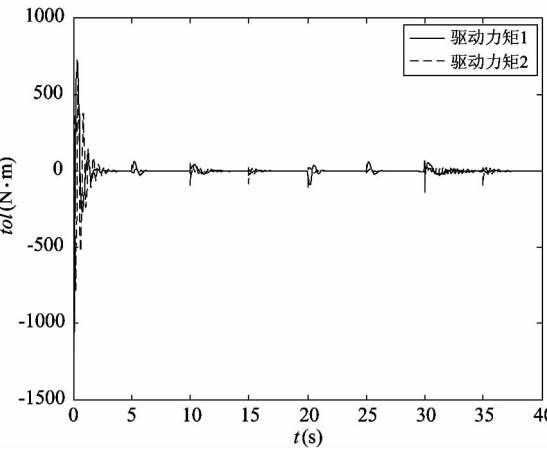
图 4 地面阶段奇异摄动自适应 PD 仿真图



(a) 末端轨迹跟踪图



(b) 位置误差图



(c) 关节驱动力矩

图5 空间阶段奇异摄动自适应 PD 仿真图

采用基于奇异摄动 PD 控制器对被控对象进行控制的得到的仿真结果如图 6 和图 7 所示。设计的控制率如下：

$$\tau_s = -K_p e - K_d \dot{e} + K_v \dot{\tau} \quad (18)$$

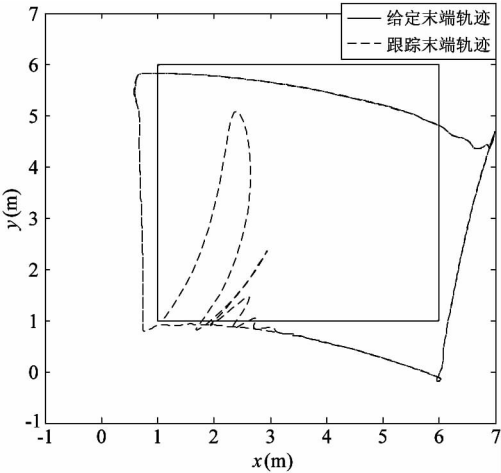


图6 地面阶段奇异摄动 PD 仿真图

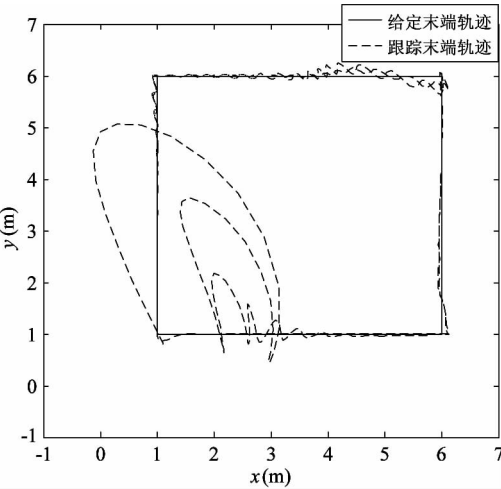


图7 空间阶段奇异摄动 PD 仿真图

由图 6 和图 7 可知,基于奇异摄动 PD 控制器只能实现空间漂浮状态下的轨迹跟踪控制,不能同时实现地面装调阶段的控制。由于自适应律仅是对于重力项的估计,所以本文中有自适应的控制器和无自适应的控制器相比仅是能否同时实现两阶段的控制。图 5(a)和图 7 的变化趋势及误差大小是基本相同的。

5 结 论

本文针对地面调试和空间漂浮两阶段柔性关节空间机械臂的跟踪问题,设计基于奇异摄动 PD 控制方法对柔性关节机械臂进行控制,并进行仿真研

究。仿真结果表明,地面有重力时实际轨迹无法跟踪上期望轨迹,在控制器中加入重力自适应项后,解决了该问题。并利用李亚普诺夫方法证明了控制系统的渐进稳定性。但基于奇异摄动的自适应 PD 控制不能有效地抑制了柔性关节带来的抖动,且跟踪精度不是很高,所以需要设计一种适用于地面调试和空间漂浮两种情况的高精度消除抖振的控制器进行深入研究。

参考文献

[1] Nagatomo M, Mitome T, Kawasaki K, et al. MFD robot arm and its flight experiment[C]. In: Proceedings of the 6th ASCE Specialty Conference and Exposition on Engineering, Construction, and Operations in Space, Albuquerque, USA, 1998. 319-324

[2] 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): 37-41

[3] Good M, Sweet L, Strobel K. Dynamic models for control system design of integrated robot and drive system[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 107(1): 53-59

[4] Tehrani A K, Barari M. Trajectory tracking of redundant manipulators using an adaptive fuzzy algorithm[C]. In: Proceedings of 2nd Australian Control Conference (AUCC), Sydney, Australia, 2012. 355-360

[5] Benosman M, Le Veyt G. Joint trajectory tracking for planar multi-link flexible manipulator: simulation and experiment for a two-link flexible manipulator[C]. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, USA, 2002. 2461-2466

[6] 张晓东, 贾庆轩, 孙汉旭, 等. 空间机器人柔性关节轨

迹控制研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1865-1870

[7] 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

[8] Raouf F, Maarouf S, Mohamad S. Tracking control of two-flexible-link manipulators using distributed control strategy[C]. In: Proceedings of the 2013 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Hammamet, Tunisia, 2013. 653-658

[9] Kandroodi M R, Fariva F, Pedram M Z, et al. Variable structure control and anti-control of flexible joint manipulator with experimental validation[C]. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM 2011), Istanbul, Turkey, 2011. 294-299

[10] 陈志勇, 陈力. 带有柔性补偿的柔性关节空间机器人的增广自适应控制及关节振动抑制[J]. 宇航学报, 2013, 34(12): 1599-1604

[11] 刘福才, 高静方, 李倩. 不同重力环境下的柔性关节空间机械臂自适应鲁棒控制[J]. 高技术通讯, 2015, 25(1): 61-69

[12] 刘福才, 李倩, 刘林. 柔性关节空间机械臂奇异摄动自抗扰控制仿真研究[J]. 高技术通讯, 2016, 26(6): 567-576

[13] 王文魁. 空间机构运动行为模拟概念研究[J]. 载人航天, 2013, 19(5): 59-66

[14] Spong M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, 109(4): 310-319

[15] 富立, 罗珍. 基于奇异摄动的捷联惯导伪圆锥误差补偿算法[J]. 高技术通讯, 2012, 22(3): 282-288

[16] 陈志勇, 陈力. 漂浮基带柔性铰空间机器人的动力学建模及奇异摄动控制研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(18): 2151-2155

Simulation study on the singular perturbation based adaptive PD control of flexible joint space manipulators

Liu Fucal, Liu Lin, Lan Hui, Zhao Xu

(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

The dynamic model of a flexible joint manipulator in the stages of space floating and ground debugging is established, and a singular perturbation based adaptive PD control algorithm for the manipulator's end track tracking control is designed to achieve the manipulator's end position tracking control in the space floating stage and the ground debugging stage. The singular perturbation method is used to divide the higher order system into two lower ones, i. e. a fast subsystem and a slow subsystem, and then the controllers for them are designed respectively. The control's stability analysis and simulation verification are conducted, and the results show that the designed control algorithm can well achieve the trajectory tracking control both in the stages of ground debugging and space floating.

Key words: free floating, flexible joint, space manipulator, adaptive, singular perturbation