

柔性关节空间机械臂奇异摄动模糊 PID 控制仿真研究^①

刘福才^② 刘 林 徐智颖

(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 建立了空间微重力和地面重力两种工况下的柔性关节空间机械臂模型,为空间机械臂末端轨迹跟踪控制设计了基于奇异摄动的模糊 PID 控制器。奇异摄动法将空间机械臂系统降阶为快子系统和慢子系统,再分别对子系统进行控制。快子系统采用力矩反馈的形式,慢子系统则采用模糊 PID 控制的形式。模糊部分主要实现对 PID 的 3 个参数的实时调整。仿真结果表明基于奇异摄动模糊 PID 控制器可以在以上两种工况下均可实现较好跟踪。

关键词 空间机械臂, 柔性关节, 模糊 PID, 奇异摄动

0 引 言

现今世界上很多国家都在发展太空研究,都希望在太空中建设自己。在建设过程中,空间机械臂成为人们青睐的得力助手,同时,由于太空环境恶劣及机械臂制作材料、搭建机构等因素会给机械臂工作带来不良影响,所以,空间机械臂使用的安全性及空间机械臂的控制精准度受到广泛关注^[1]。空间机械臂的工作环境、空间机械臂的制作材料、机构搭建等都会影响机械臂工作的安全性。空间机械臂机构本身存在的关节间隙、关节臂杆柔性会影响其工作精度,其中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]。

本文是对柔性关节空间机械臂末端轨迹跟踪控制问题做仿真研究。建立地面重力及空间微重力两种工况下的空间机械臂模型,为轨迹跟踪控制设计基于奇异摄动的模糊 PID 控制器进行仿真研究。

1 相关研究

国内外很多学者对机械臂控制问题进行实验或

仿真研究。Sweet 等人^[3]通过实验发现关节柔性会影响机械臂的工作精度。Kandroodi 等人^[4]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。陈明金等人^[5]利用反步控制柔性关节机械臂的位置和力控制进行了控制研究。施琳琳等人^[6]为柔性关节机械臂设计了基于神经网络的反演滑模控制器,该研究先对系统进行降阶,再对子系统进行控制,仿真结果表明控制器的有效性。王雪竹等人^[7]为柔性关节机械臂设计了带有观测器的自适应反步控制器,并进行了仿真研究。李成刚等人^[8]为柔性关节机械臂设计了神经网络自适应反演控制器,利用神经网络逼近系统未知项,以此实现轨迹跟踪控制。刘福才等人^[9]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。刘福才等人^[10]为柔性关节机械臂设计了基于奇异摄动的自抗扰控制器,但是存在模型补偿,会比较依赖于模型。邱恒等人^[11]对于不能建立精确模型的摇操作机械臂设计了模糊 PD 控制器,利用模糊控制对 PD 参数进行调整,从而实现对机械臂的较准确控制,同时进行实验和仿真研究,研究结果表明控制器控制性能良好。张程等人^[12]对于地面环

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;E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2018-10-11)

境下的机械臂设计了一种结合自适应、模糊、鲁棒等 3 种控制算法的控制器,并进行了轨迹跟踪控制仿真研究。

空间机构均需在地面进行试验,性能指标满足要求后再送入空间进行服役。王文魁^[13]在文中提到,目前有悬吊、气浮、自由落体等方法模拟微重力环境,但不能实现长时有效的模拟,现有大部分理论研究均是以研究空间微重力工况下的机构运动行为,没有考虑重力改变给机构运动行为带来的影响。

但目前大多数理论研究均是仅针对空间漂浮状态下的机械臂控制进行的。没有同时考虑地面调试和空间应用两种环境下的轨迹控制研究。有一些对两种工况下的轨迹控制均有研究,但控制器较复杂,约束较多,不适合应用于实际中。本文设计的基于奇异摄动模糊 PID 控制器可同时实现两阶段控制,结构简单易于实现,且 PID 控制器具有一定的工业应用基础。本文针对机械臂末端轨迹跟踪问题进行研究,分别建立了地面重力环境和空间微重力环境下的柔性关节空间机械臂模型,然后结合模糊算法、奇异摄动法、PID 控制法,为柔性关节空间机械臂设计基于奇异摄动的模糊 PID 控制器,并进行了仿真研究,仿真结果证实本文设计的控制器可同时实现在地面重力环境和空间微重力环境下的机械臂末端轨迹跟踪控制,并与奇异摄动 PD 控制方法仿真结果进行了比较。

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 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:

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

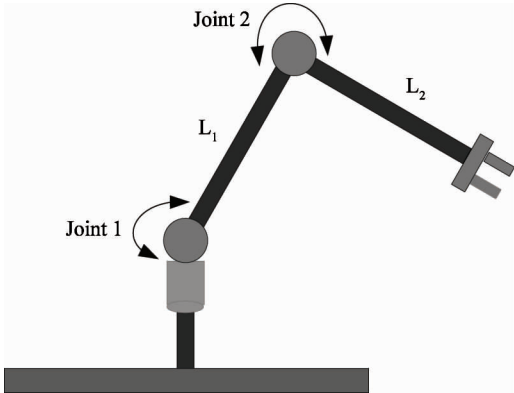


图 1 柔性关节机械臂

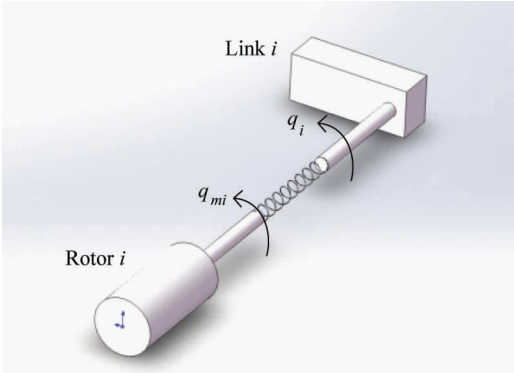


图 2 柔性关节简化模型

式中, $q_b \in R^3$ 表示基座位置和姿态, $q - q_m$ 为连接轴振动矢量。 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, $G(q) \in R^n$ 为重力载荷向量矩阵,可写成如下形式:

$$G = \varphi(q)g \tag{3}$$

3 控制器设计

基于考虑柔性关节后对提高系统复杂性及阶数

的影响,所以本文采取奇异摄动法对系统进行降阶,再进一步对系统进行设计。下面对奇异摄动法作简要介绍。

奇异摄动主要思想就是对原有系统进行降阶,将原系统看成是由快子系统和慢子系统两个子系统组成的系统,奇异摄动作用的系统状态方程如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\varepsilon}), & \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \boldsymbol{\varepsilon} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\varepsilon}), & \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0 \end{cases} \quad (4)$$

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]:

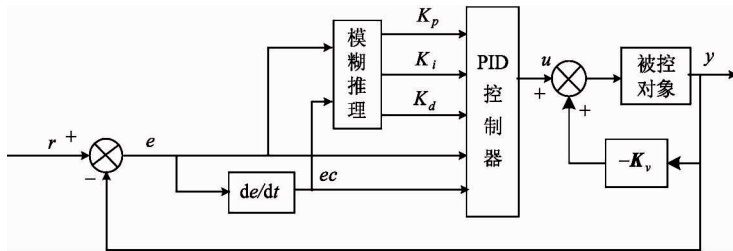


图3 基于奇异摄动的模糊PID控制结构

模糊PID控制器是以误差和误差变化率作为输入,以比例积分微分项的参数调整值作为输出。比例参数影响系统的快速性,比例参数越大响应越快,但是比例参数过大容易引起系统的不稳定或系统超调。积分部分消除系统稳态误差,积分参数越大越有利于消除误差,但过大容易引起系统不稳定。微分部分主要用来处理系统的动态性,减小滞后带来的影响,微分参数过大容易引起系统不稳定,随着系统实时变化,可以利用模糊控制器实现对PID参数的调整。

模糊控制器以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,以参数调整值 k_p, k_i, k_d 作为输出。本文为每个变量选择了7个模糊状态,即负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,分别用NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB表示。输入误差及误差变化率的论域选为 $[-6, 6]$,输出3个调整量的论域选为 $[-4.5, 4.5]$ 。隶属度函数选择三角隶属度函数。解模糊方法有最大隶属度法、重心法等。本文选用的解模糊方法是重心法,重心法在输入变化较小时也会有相应的输出。具体表达式如式(8)所示:

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_f \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{\tau}_f$ 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。 $\boldsymbol{\tau}_s$ 为慢变子系统控制力矩,作用于准稳态系统

由式(1)或式(2),可得关节力矩的方程:

$$\mathbf{J}_m \mathbf{k}^{-1} \ddot{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_f - \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

设计快变子系统控制器:

$$\boldsymbol{\tau}_f = -\mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\tau}} \quad (7)$$

针对慢变子系统本章采用模糊PID控制器对柔性关节机械臂进行控制,控制框图如图3所示。

$$u = \sum_{i=1}^m \frac{x_i \cdot \mu_N(x_i)}{\mu_N(x_i)} \quad (8)$$

式中, x_i 为变量值, μ_N 为隶属度函数。

PID部分的参数值按照如式(9)所示形式进行更新:

$$\begin{cases} K_p = K_p^0 + (E, EC)_p \\ K_i = K_i^0 + (E, EC)_i \\ K_d = K_d^0 + (E, EC)_d \end{cases} \quad (9)$$

式中, K_p^0, K_i^0, K_d^0 为PID参数的初始值, $(E, EC)_p, (E, EC)_i, (E, EC)_d$ 是根据误差及误差变化率经模糊推理得到的参数调整值。

4 仿真研究

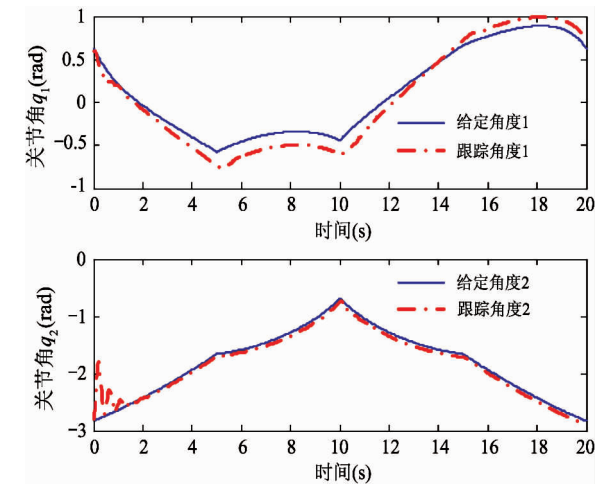
为验证控制效果,选择以(1,1)为起点,边长为5 m逆时针运动的正方形轨迹,便于观察在正方形4个角轨迹突变处的跟踪情况。相关参数: $\mathbf{K} = \text{diag}\{500\}$, $\mathbf{J}_m = \text{diag}\{1\}$ 。控制器参数选择: $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{75\}$,PID环节参数初值选取为:比例环节参数 $\mathbf{K}_p^0 = \text{diag}\{500\}$,积分环节参数 $\mathbf{K}_i^0 = \text{diag}\{5\}$,微分环节

参数 $K_d^0 = \text{diag}\{300\}$ 。对应误差和误差变化率的量化因子 $K_1 = \text{diag}\{1\}$, $K_2 = \text{diag}\{1\}$, 对应 PID 比例积分微分 3 个参数调整值的比例因子分别为 $K_a = \text{diag}\{10\}$, $K_b = \text{diag}\{1\}$, $K_c = \text{diag}\{5\}$ 。机械臂系统参数值如表 1 所示。

表 1 机械臂系统参数表

杆件号	$a_i(\text{m})$	$b_i(\text{m})$	$m_i(\text{kg})$	$I_i(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
1	2.25	2.25	1.5	2.54
2	2.25	2.25	1.5	2.54

将控制效果与基于奇异摄动的 PD 控制器进行比较。PD 控制器参数值选取为:比例环节参数 K_p

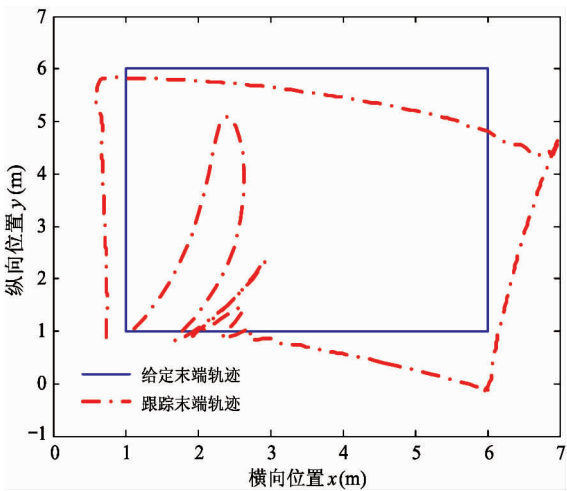


(a) 两个关节角度矢量跟踪情况

$= \text{diag}\{500\}$, 微分环节参数 $K_d = \text{diag}\{300\}$ 。基于奇异摄动的 PD 控制器表达式为 $\tau = K_p e + K_d \dot{e} - K_v \dot{\tau}$ 。

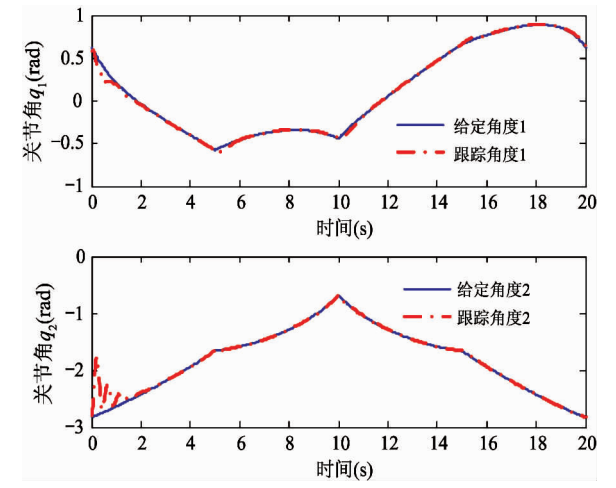
奇异摄动的 PD 控制及奇异摄动的模糊 PID 控制器的仿真结果如图 4 ~ 图 8 所示。

由图 4 和图 5 对比可知,基于奇异摄动的 PD 控制器在空间服役工况下可以完成一定精度的轨迹跟踪控制。但是在地面调试工况下,文中设计的基于奇异摄动 PD 控制器不能实现基本的轨迹跟踪控制,也就是说基于奇异摄动的 PD 控制器不能同时实现柔性关节空间机械臂在空间服役和地面调试两种工况下的轨迹跟踪控制。

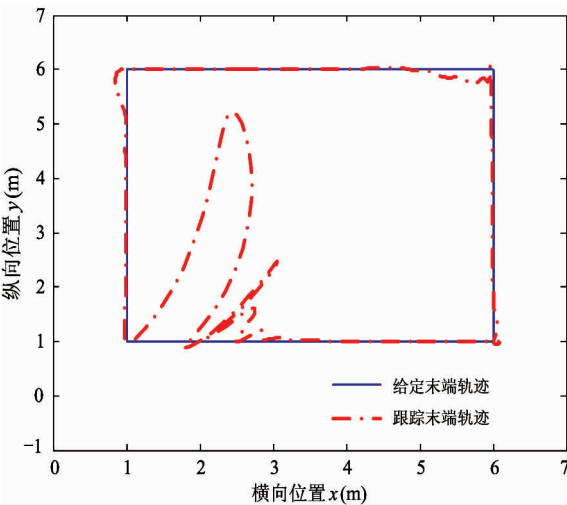


(b) 末端轨迹跟踪情况

图 4 地面工况下基于奇异摄动的 PD 控制结果



(a) 两个关节角度矢量跟踪情况



(b) 末端轨迹跟踪情况

图 5 空间工况下基于奇异摄动的 PD 控制结果

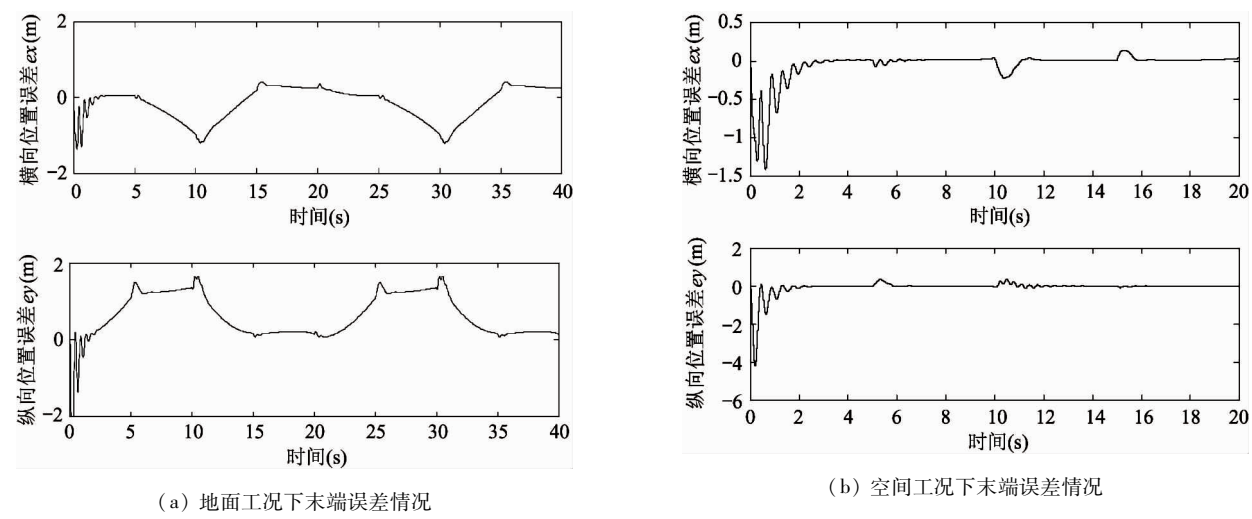


图 6 基于奇异摄动的 PD 控制器末端误差情况

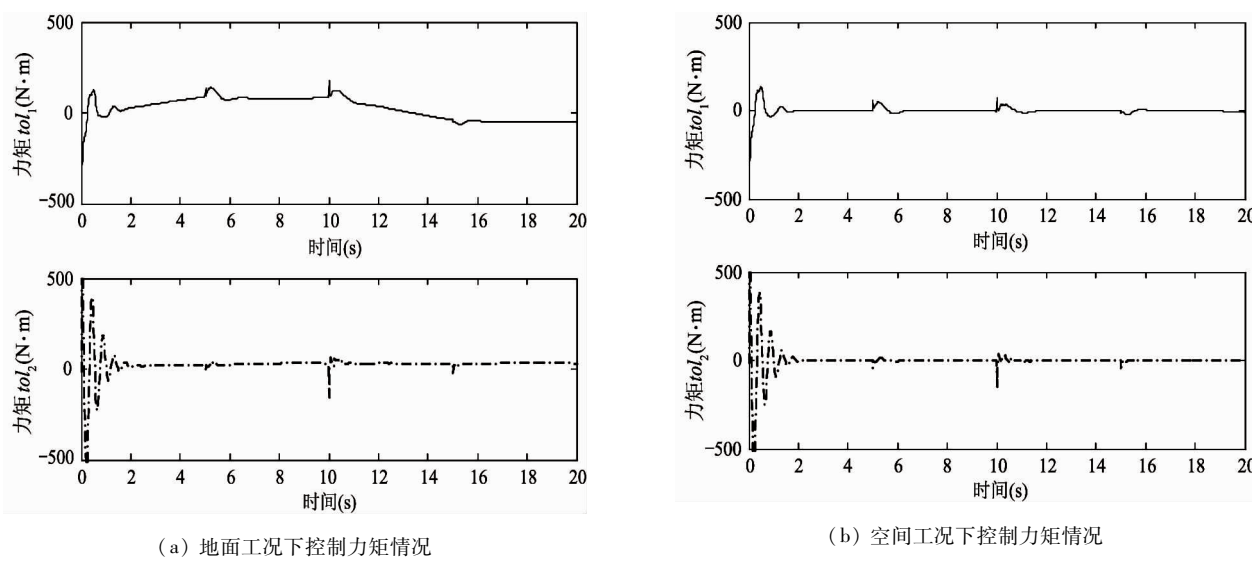


图 7 基于奇异摄动的 PD 控制器控制力矩情况

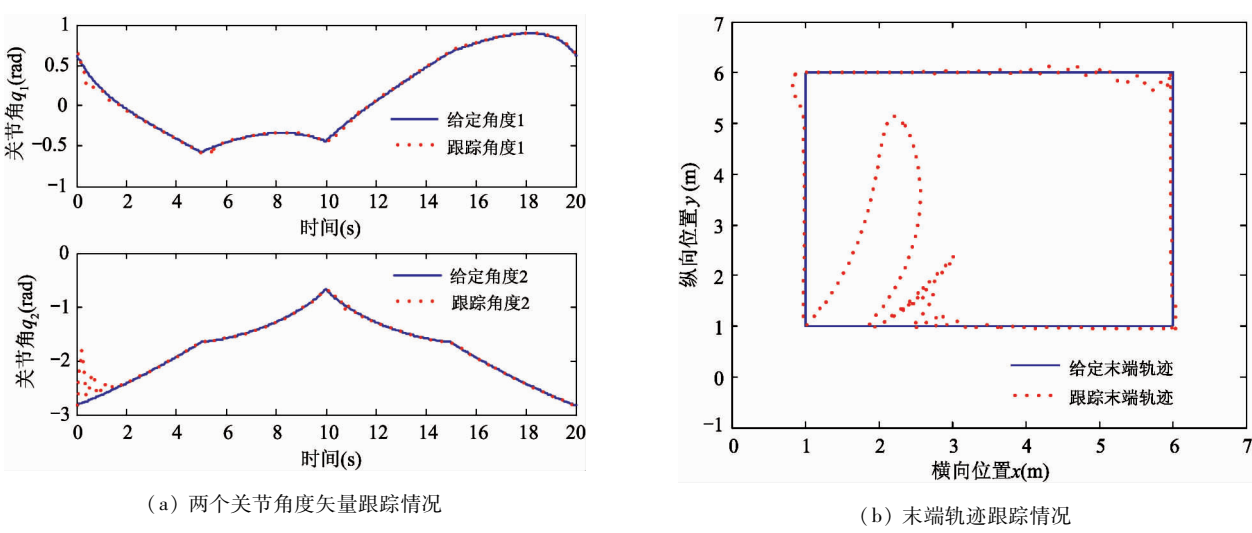
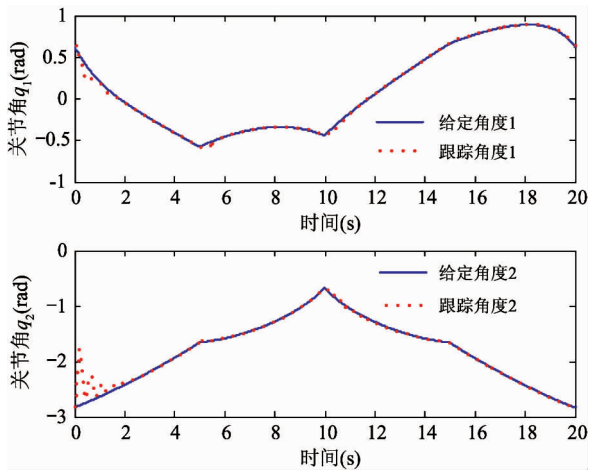
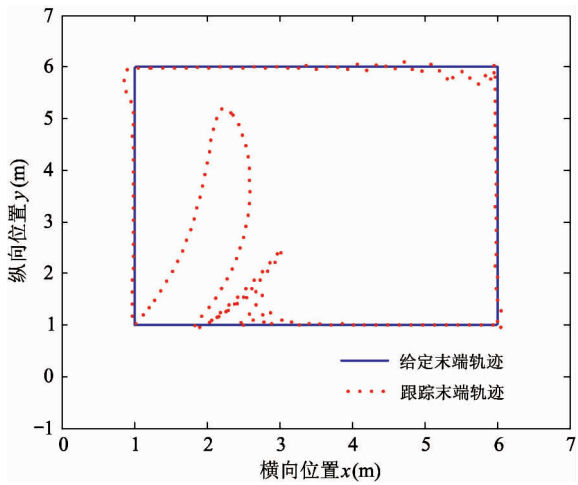


图 8 地面工况下奇异摄动模糊 PID 控制结果

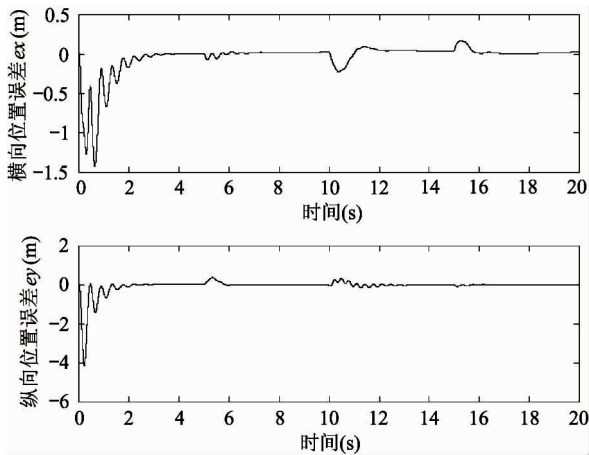


(a) 两个关节角度矢量跟踪情况

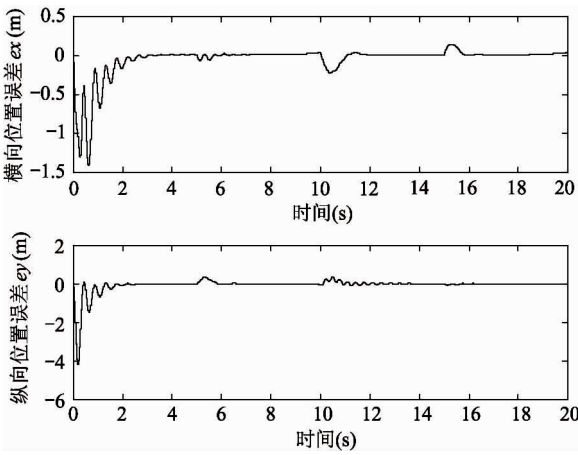


(b) 末端轨迹跟踪情况

图 9 空间工况下奇异摄动模糊 PID 控制结果

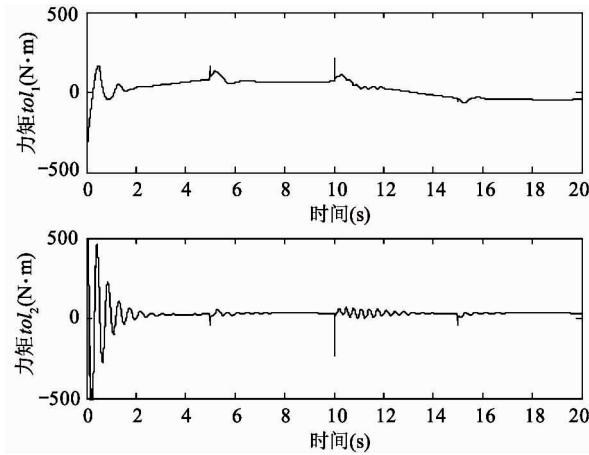


(a) 地面工况下末端误差情况

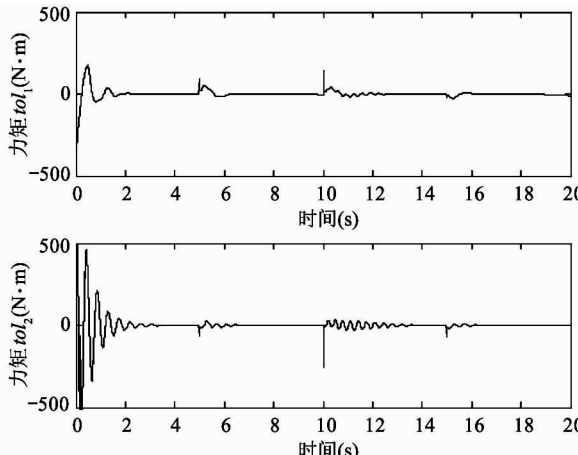


(b) 空间工况下末端误差情况

图 10 基于奇异摄动模糊 PID 控制器末端误差情况



(a) 地面工况下控制力矩情况



(b) 空间工况下控制力矩情况

图 11 基于奇异摄动模糊 PID 控制器控制力矩情况

由图 8 和图 9 可知,本章所设计的基于奇异摄动的模糊 PID 控制器可以同时实现地面和空间两种工况下的轨迹跟踪控制。对比图 6 和图 10 的末端误差图可知,稳定后基于奇异摄动的模糊 PID 控制器的末端控制误差远小于基于奇异摄动的 PD 控制器,尤其是在地面工况下。

由图 7 和图 11 可知,地面调试阶段在转角处的力矩值比空间服役阶段更大些,地面阶段的力矩值大多数情况下都偏大于空间阶段力矩值,并且在转角处力矩会出现突变的情况,因为在转角处不再像 4 条边那样光滑的轨迹,所以转角处会出现一个比较明显的力矩变化。

5 结 论

本文结合奇异摄动法、模糊控制法、PID 控制法等 3 种方法,设计了基于奇异摄动的模糊 PID 控制器,实现了对柔性关节空间机械臂在地面和空间两种工况下的运动行为控制,并进行了仿真研究,且与基于奇异摄动的 PD 控制器的仿真结果进行对比。对比结果表明,基于奇异摄动的模糊 PID 控制器在两种工况下的控制效果良好。在正常的空间状态下,机械臂是处于漂浮状态的。所以,下一步将对基座漂浮状态下的机械臂进行更接近实际情况的控制研究。

参考文献

[1] Masanori N, Takahiro M, Kyoichil K, et al. MFD robot arm and its flight experiment[C]. In: Proceedings of the

6th International 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. 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] 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
- [5] 陈明金, 李树荣, 曹乾磊. 时滞柔性关节机械臂自适应位置/力控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2): 217-223
- [6] 施琳琳, 陈强. 基于神经网络柔性关节机械臂反演滑模控制[J]. 控制工程, 2017, 24(11): 2268-2273
- [7] 王雪竹, 李洪谊, 王越超, 等. 柔性关节机器人高精度自适应反步法控制[J]. 信息与控制, 2016, 45(1): 1-7
- [8] 李成刚, 崔文, 尤晶晶, 等. 多连杆柔性关节机器人的神经网络自适应反演控制[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(7): 1095-1101
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 邱恒, 刘满禄, 张华. 基于模糊 PD 算法的三自由度机械臂遥操作双边控制[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(9): 11-16
- [12] 张程, 张卓. 自适应模糊鲁棒控制在机械臂系统中的应用研究[J]. 自动化应用, 2017(5): 126-128
- [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

Simulation study of flexible joint space manipulator with singularly perturbed fuzzy PID control

Liu Fucui, Liu Lin, Xu Zhiying

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

Abstract

A flexible joint space manipulator model is established under two conditions of space microgravity and ground gravity. The fuzzy PID controller based on the singularly perturbed is designed for the end track tracking control of the space manipulator. The singularly perturbed method reduces the space manipulator system to the fast subsystem and the slow subsystem, and then controls them respectively. The fast subsystem adopts the form of torque feed-back. The slow subsystem is in the form of fuzzy PID control. The fuzzy part mainly realizes real-time adjustment of the three parameters of PID. The simulation results show that the singularly perturbed fuzzy PID controller can achieve better tracking in two working conditions mentioned above.

Key words: space manipulator, flexible joint, fuzzy PID, singular perturbation