高技术通讯 2020 年 第30卷 第10期:1078~1084

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2020.10.010

考虑重力影响的柔性关节空间机械臂自适应迭代学习控制①

孟玲聪②　刘福才③　赵文娜　刘剑鸣

(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　针对不同重力环境条件下柔性关节空间机械臂的末端轨迹跟踪问题,为提高其跟踪精度和系统抗干扰能力,提出一种基于奇异摄动理论的自适应迭代学习控制。首先建立了地面重力条件下和空间微重力条件下柔性关节机械臂的动力学模型,这2种模型考虑了摩擦带来的影响。利用奇异摄动法将系统分为快变子系统和慢变子系统。针对快变子系统设计速度反馈控制率,来抑制柔性关节带来的弹性振动。针对慢变子系统设计自适应迭代学习控制,该控制方法是在PD反馈结构的基础上增加了一个迭代项,可以很好地处理未知参数和扰动,提高整个系统的稳定性和抗干扰能力。仿真结果表明,该方法可以使柔性关节空间机械臂在不同重力环境下都具有良好的轨迹跟踪效果和抖动抑制能力,验证了该方法的有效性。

关键词　空间机械臂;柔性关节;重力;迭代学习;自适应

0　引　言

随着人们对空间的不断探索,对空间控制技术的要求也在不断提高。空间机械臂是在恶劣的太空中执行空间任务的重要工具,因此引起了科学家们的广泛关注和深入研究。空间机械臂作为航天员出舱和空间站的重要辅助工具,可以执行空间对接、垃圾清理和设备维修等各种各样的空间任务。目前空间机械臂大多都采用电机加谐波减速器作为驱动部件,这种减速器具有减速比大、负载能力强、传动效率高等优点。但谐波减速器也会给空间机械臂带来关节柔性,以至于产生滞后、非线性耦合和高频振动等控制问题[1,2]。

1　相关研究

近年来,国内外研究学者对柔性关节空间机械臂的控制问题做出了大量实验和仿真研究,取得了诸多研究成果。吴昊等人[3]针对空间机械臂的系统未建模动态和时滞影响,设计了一种鲁棒自适应滑模控制器,并验证了该方法的有效性。黄登峰和陈力[4]利用奇异摄动理论的方法,为2个子系统分别设计了模糊逻辑控制和最优控制,实现了轨迹跟踪控制和振动抑制。Ulrich 等人[5]通过奇异摄动法并采用基于笛卡尔坐标的控制方案,设计了改进的简单自适应控制器(MSAC)。王漪梦等人[6]设计了一种基于干扰观测器的双位置闭环控制方案,有效抑制了柔性关节带来的弹性振动。刘福才等人[7]提出了一种基于奇异摄动理论的自抗扰控制方法,通过仿真验证,该方法能实现较高精度的轨迹跟踪,但比较依赖于精确的数学模型。Krikochoritis[8]基于非线性控制理论和反馈线性化技术,设计了一种由动态神经网络实现的控制器。杨森和陈力[9]基于奇异摄动理论设计了2级滑模控制器,实现对柔性关节机械臂轨迹跟踪控制,并引入边界层厚度可

① 载人航天领域预研(2016040301)和河北省自然科学基金(F2019203505)资助项目。
② 男,1995年生,硕士生;研究方向:空间机器人控制;E-mail: 1067025123@qq.com
③ 通信作者,E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2019-10-24)

变的饱和函数来解决系统的振荡问题。

在空间环境中工作的柔性关节机械臂,必须在地面进行调试,因此不能忽略重力对空间机械臂的影响。顾义坤和刘宏[10]在考虑重力环境下,利用自回归小波神经网络具有良好的学习能力和快速收敛能力,提出了自适应神经网络动态面控制。针对系统的参数不确定和未知外界扰动等影响,该方法可以使柔性关节机械臂达到很好的轨迹跟踪效果。戎新萍等人[11]针对柔性关节机械臂带来的残余振动问题,提出了一种基于解耦的振动抑制方法。通过模糊补偿对机械臂进行解耦并在此基础上加入零振荡整形器,仿真结果表明该方法可以很好地抑制柔性关节带来的弹性振动。

上述对空间机械臂的控制方法只考虑了地面重力环境下或空间微重力下其中的一种情况。然而空间机械臂在太空执行任务之前,必须经历地面装调阶段。因此从地面到空间重力的改变,会引起柔性关节机械臂的运动学和动力学模型发生变化,造成系统的控制误差。现阶段对于空间微重力环境的模拟手段,诸如水槽、悬吊、气浮等并不能完全消除重力的影响。Edward 等人[12]对比了空间机械臂在地面模拟实验与空间在轨实验的定位精度实验结果,对比发现两者末端轨迹跟踪误差有较大差别。例如在 Y 轴方向,机械臂在地面悬吊实验的定位误差为 2 mm,而通过航天器在轨实验的定位误差则为 5.3 mm。因此这对柔性关节空间机械臂控制器的设计有了更高的要求,以便适应重力引起的模型变化。

针对这一问题,本文提出了一种基于奇异摄动理论的自适应迭代学习控制方法。首先分别建立地面装调阶段和空间应用阶段下的柔性关节空间机械臂动力学模型,除考虑重力因素之外,也考虑了摩擦力、系统未建模误差和外部扰动的因素。然后按时间尺度将系统划分为快变子系统和慢变子系统,分别对 2 个子系统设计控制器。针对快变子系统设计速度反馈控制率,以抑制柔性关节带来的弹性振动。针对慢变子系统设计自适应迭代学习控制,迭代学习控制通过对误差的反复修正实现柔性关节空间机械臂的末端轨迹跟踪。控制器中又加入自适应率,可以补偿系统的未建模动态和外部扰动,以达到更好的控制精度。

2 系统模型建立

本文采用图 1 所示的 2 自由度柔性关节机械臂,其柔性关节部分采用由 Spong[13]提出的经典简化模型,将柔性关节等效为由电机和连杆连接的具有常值系数的线性扭转弹簧(如图 2 所示)。

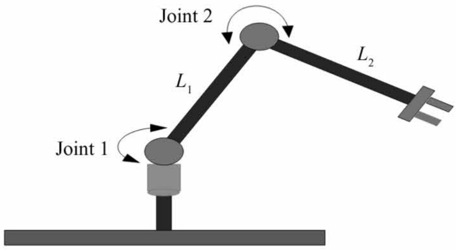


图 1　二连杆柔性关节空间机械臂

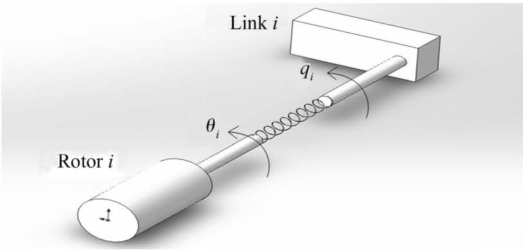


图 2　柔性关节简化模型

根据欧拉-拉格朗日方程和 Spong 提出的理论可推导出 2 自由度柔性关节机械臂的动力学模型:

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{J}_m\ddot{\boldsymbol{\theta}}_m+\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\tau}_m\\&\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\tau}+\boldsymbol{d}\\&\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta}_m-\boldsymbol{q})\end{aligned}\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{\theta}_m$ 为电机角位移矢量,$\boldsymbol{q}$ 为关节角位移矢量,$\boldsymbol{\tau}$ 为空间机械臂的输入控制力矩,$\boldsymbol{\tau}_m$ 为电机产生的驱动力矩,$\boldsymbol{d}$ 为系统的未建模误差和外部扰动,$\boldsymbol{J}_m$ 为电机转动惯量,$\boldsymbol{K}$ 为柔性关节刚度矩阵。$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\in\boldsymbol{R}^{n\times n}$为系统的惯性矩阵,$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}\in\boldsymbol{R}^{n\times n}$ 为哥式力和离心力矩阵,杆的动力学和执行机构动力学通过弹性力矩项 $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta}_m-\boldsymbol{q})$偶合。

然而在实际的机械臂系统中,摩擦力矩项不可以忽略。本文选取的摩擦力模型如下:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{F}=&r_1[\tanh(r_2\dot{\boldsymbol{q}})-\tanh(r_3\dot{\boldsymbol{q}})]+r_4\tanh(r_5\dot{\boldsymbol{q}})\\&+r_6\dot{\boldsymbol{q}}\end{aligned}\tag{2}$$

式中，$r_i > 0$，$i = 1,2,\cdots,6$。在地面装调阶段应该考虑重力对空间机械臂带来的影响，因此在拉格朗日函数中加入了连杆的重力势能，可推导出柔性关节空间机械臂的动力学模型：

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{J}_m \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}_m \\ &\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G} + \boldsymbol{F} = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{q}) + \boldsymbol{d} \end{aligned} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{q})g$ 为重力载荷向量矩阵，$\boldsymbol{F} \in R^2$ 为摩擦力矩矩阵。空间微重力条件下可忽略重力的影响，令 $g = 0$，式(3)即为空间阶段柔性关节机械臂的动力学模型。

3 控制器设计

根据奇异摄动理论按时间尺度将机械臂系统分为快变子系统和慢变子系统，快变子系统针对系统的柔性关节部分，慢变子系统针对系统的刚性部分，然后分别对 2 个子系统进行控制器设计。系统的总和控制力矩[14]如下：

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_f + \boldsymbol{\tau}_s \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{\tau}_f$ 为快变控制力矩，其作用是在突变情况下提供快速响应，以抑制系统的弹性振动。$\boldsymbol{\tau}_s$ 为慢变控制力矩，用于补偿系统的总和扰动，以实现系统的末端轨迹跟踪。

由式(1)和式(3)可得到关节力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 的方程：

$$\boldsymbol{J}_m \boldsymbol{K}^{-1} \ddot{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_f + \boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{J}_m \ddot{\boldsymbol{q}} \tag{5}$$

引入参数 ε，取 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{K}_\varepsilon / \varepsilon^2$，其中 $\boldsymbol{K}_\varepsilon$ 为正定对角阵，ε 越小表示关节刚度越大，并选取：

$$\boldsymbol{\tau}_f = -\boldsymbol{K}_v \dot{\boldsymbol{\tau}} = -\varepsilon \boldsymbol{K}_2 \dot{\boldsymbol{\tau}} \tag{6}$$

该式就为系统的快变控制力矩。结合式(6)，式(5)可以改写为

$$\varepsilon^2 \boldsymbol{J}_m \ddot{\boldsymbol{\tau}} + \varepsilon \boldsymbol{K}_\varepsilon \boldsymbol{K}_2 \dot{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{K}_\varepsilon \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{K}_\varepsilon(\boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{J}_m \ddot{\boldsymbol{q}}) \tag{7}$$

令 $\varepsilon = 0$，得到关节力矩准稳态表达式：

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{J}_m \ddot{\boldsymbol{q}} \tag{8}$$

将式(8)带入式(3)中得到系统准稳态方程：

$$\bar{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G} + \boldsymbol{F} = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{d} \tag{9}$$

式中，$\bar{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{J}_m$。

针对慢变子系统设计自适应迭代学习控制器[15]，将式(9)进一步转化为如下形式：

$$\begin{aligned} &\bar{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}_k(t))\ddot{\boldsymbol{q}}_k(t) + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_k(t), \dot{\boldsymbol{q}}_k(t))\dot{\boldsymbol{q}}_k(t) \\ &\quad + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}_k(t)) + \boldsymbol{F}_k(\boldsymbol{q}_k(t)) = \boldsymbol{\tau}_{sk}(t) + \boldsymbol{d}_k(t) \end{aligned} \tag{10}$$

式中，k 为迭代学习次数，$\boldsymbol{q}_k(t)$、$\dot{\boldsymbol{q}}_k(t)$、$\ddot{\boldsymbol{q}}_k(t)$ 分别第 k 次迭代学习的关节角位移、关节角速度、关节角加速度。指定期望轨迹 $\boldsymbol{q}_d(t)$、$\dot{\boldsymbol{q}}_d(t)$、$\ddot{\boldsymbol{q}}_d(t)$、$\boldsymbol{e}_k(t) = \boldsymbol{q}_d(t) - \boldsymbol{q}_k(t)$，$\dot{\boldsymbol{e}}_k(t) = \dot{\boldsymbol{q}}_d(t) - \dot{\boldsymbol{q}}_k(t)$，且假设初始值 $\boldsymbol{e}_k(t) = \dot{\boldsymbol{e}}_k(t) = 0$。

该机械臂的准稳态系统具有以下 4 个特性。

(1) $\bar{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{q}_k) \in \boldsymbol{R}^{n \times n}$ 为正定且有界的矩阵。

(2) $\dot{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{q}_k) - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k)$ 为对称矩阵，且 $x^{\mathrm{T}}(\dot{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{q}_k) - 2\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k))x = 0$，$\forall x \in \boldsymbol{R}^n$。

(3) $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}_k(t)) + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_k(t), \dot{\boldsymbol{q}}_k(t))\dot{\boldsymbol{q}}_k(t) = \boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k)\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(t)$，$\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k) \in \boldsymbol{R}^{n \times (m-1)}$ 为已知矩阵，$\boldsymbol{\xi}(t) \in \boldsymbol{R}^{m-1}$ 为未知向量。

(4) $\| \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k) \| \leqslant k_c \| \dot{\boldsymbol{q}}_k \|$，$\| \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}_k) \| < k_g$，$\forall t \in [0, T]$，$k_c$ 和 k_g 为正实数。

设计自适应迭代学习控制率如下：

$$\boldsymbol{\tau}_{sk}(t) = \boldsymbol{K}_p \boldsymbol{e}_k(t) + \boldsymbol{K}_D \dot{\boldsymbol{e}}_k(t) + \boldsymbol{\varphi}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k, \dot{\boldsymbol{e}}_k)\hat{\boldsymbol{\theta}}_k(t) \tag{11}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_k(t) = \hat{\boldsymbol{\theta}}_{k-1}(t) + \boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k, \dot{\boldsymbol{e}}_k)\dot{\boldsymbol{e}}_k(t) \tag{12}$$

式中 $\boldsymbol{K}_P$，$\boldsymbol{K}_D \in \boldsymbol{R}^{n \times n}$ 和 $\boldsymbol{\Gamma} \in \boldsymbol{R}^{m \times m}$ 为正定矩阵，$\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k, \dot{\boldsymbol{e}}_k) \in \boldsymbol{R}^{n \times n}$，且 $\boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k, \dot{\boldsymbol{e}}_k) \overset{\mathrm{def}}{=} [\boldsymbol{\Psi}(\boldsymbol{q}_k, \dot{\boldsymbol{q}}_k)\mathrm{sgn}(\dot{\boldsymbol{e}}_k)]$，$\boldsymbol{e}_k(t)$，$\dot{\boldsymbol{e}}_k(t)$ 有界，且 $\lim_{n \to \infty} \boldsymbol{e}_k(t) = \lim_{n \to \infty} \dot{\boldsymbol{e}}_k(t) = 0$，$\forall t \in [0, \mathrm{T}]$。

式(10)系统在迭代学习控制律式(11)和自适应率式(12)的控制下，对于有限的时间 $\forall t \in [0, \mathrm{T}]$，随着迭代学习次数 $k(k \in Z_+)$ 的增加，$\boldsymbol{e}_k(t)$ 和 $\dot{\boldsymbol{e}}_k(t)$ 最终收敛到 0。

4 仿真结果及分析

为验证自适应迭代学习控制对柔性关节机械臂的控制效果，本文选取边长 5 m 的逆时针运动的正方形作为跟踪轨迹。正方形的 4 个角轨迹易发生突变，对控制器的要求更高，更容易观察柔性关节机械臂的末端轨迹跟踪和振动抑制情况。系统模型部分参数为 $\boldsymbol{K} = \mathrm{diag}\{500\}$，$\boldsymbol{J}_m = \mathrm{diag}\{1\}$。控制器参数为 $\boldsymbol{K}_P = \mathrm{diag}\{500\}$，$\boldsymbol{K}_D = \mathrm{diag}\{300\}$，$\boldsymbol{\Gamma} = \mathrm{diag}\{2\}$，

$\boldsymbol{K}_V=\mathrm{diag}\{0.15\}$。机械臂参数如表 1 所示,关节摩擦参数如表 2 所示。

表 1　平面二连杆空间机械臂仿真参数

杆号	a_i（m）	b_i（m）	m_i（kg）	I_i（$\mathrm{kg\cdot m^2}$）
1	2.25	2.25	1.5075	2.5439
2	2.25	2.25	1.5075	2.5439

表 2　摩擦系数

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
0.5	150	50	2	100	0.5

为了更好地验证自适应迭代学习的控制效果,将其与基于奇异摄动法的 PD 控制作仿真对比。基于奇异摄动法的 PD 控制器参数选取为:$\boldsymbol{K}_P=\mathrm{diag}\{500\}$,$\boldsymbol{K}_D=\mathrm{diag}\{300\}$,$\boldsymbol{K}_V=\mathrm{diag}\{0.15\}$,其控制律为 $\boldsymbol{\tau}_m=\boldsymbol{K}_P e+\boldsymbol{K}_D\dot{e}-\boldsymbol{K}_V\dot{\boldsymbol{\tau}}$。

从上述仿真结果(见图 3 ~ 图 5)来看,柔性关节空间机械臂在地面阶段不能实现基本的轨迹跟踪,且具有较大的位置误差,可见基于奇异摄动 PD 控制在地面阶段是不可控制的,到空间后 PD 控制器就可以应用了。在地面 PD 控制器应含有重力补偿项,而空间模型的动力学方程中已经没有重力项了,所以 PD 控制的适应性差,并不能同时实现地面和空间状态下的轨迹跟踪。基于奇异摄动自适应迭代学习控制仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示。

由图 3 和图 5 对比得,由奇异摄动自适应迭代学习控制器控制的柔性关节空间机械臂在空间工况下和地面装调阶段都能达到较好的轨迹跟踪效果。

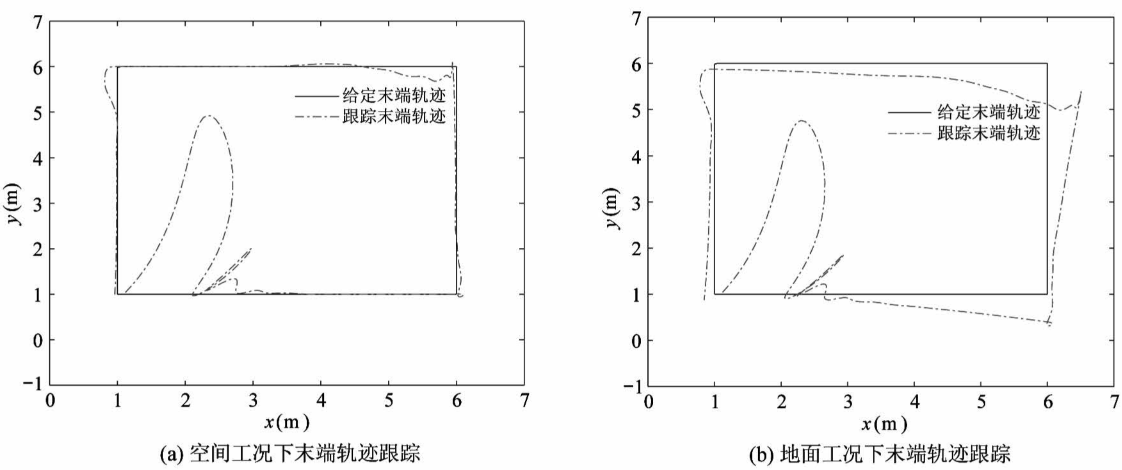


图 3　基于奇异摄动 PD 控制末端轨迹跟踪

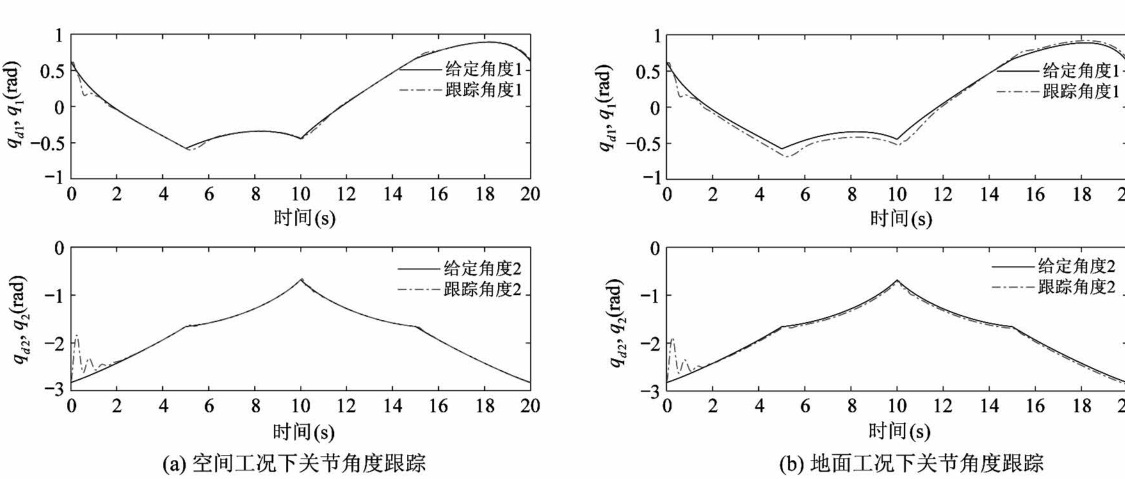
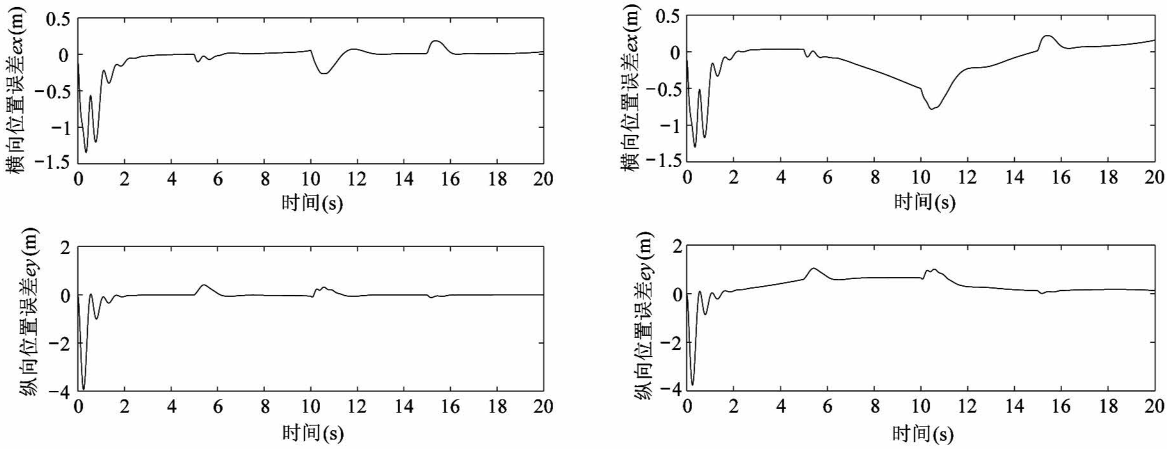
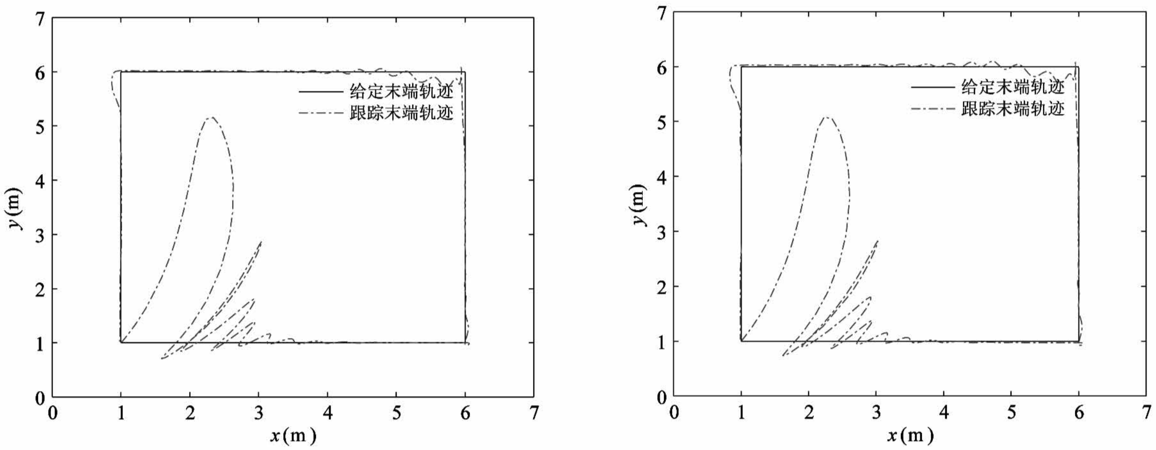


图 4　基于奇异摄动 PD 控制关节角度跟踪



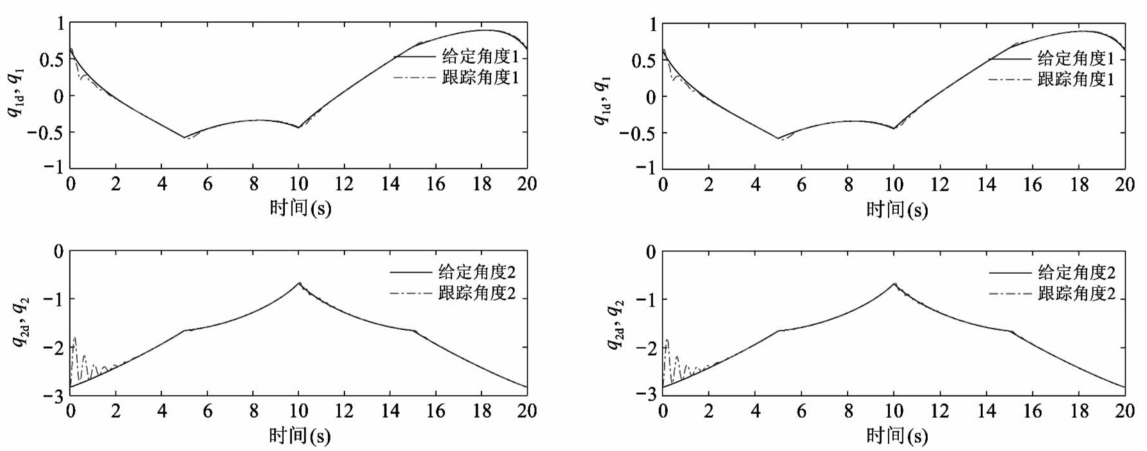
(a) 空间工况下位置误差　　(b) 地面工况下位置误差

图 5　基于奇异摄动 PD 控制误差曲线



(a) 空间阶段末端轨迹跟踪　　(b) 地面工况下末端轨迹跟踪

图 6　基于奇异摄动自适应迭代学习控制轨迹跟踪



(a) 空间阶段下关节角度跟踪　　(b) 地面工况下关节角度跟踪

图 7　基于奇异摄动自适应迭代学习控制关节角度跟踪

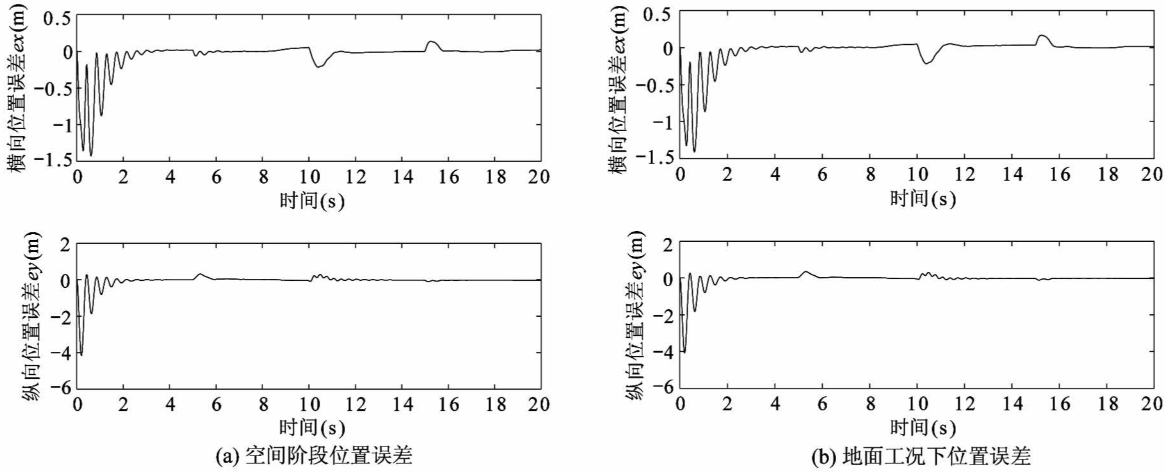


图 8　基于奇异摄动自适应迭代学习控制误差曲线

对比图 5 和图 8 可以看出,相比于奇异摄动 PD 控制,在地面阶段下自适应迭代学习控制的空间机械臂误差波动小,跟踪精度高。

5　结　论

本文针对柔性关节空间机械臂在空间和地面 2 种不同重力环境下,由于模型变化而引起的控制问题,设计了一种自适应迭代学习控制器并与基于奇异摄动 PD 控制进行了对比。仿真结果表明,柔性关节空间机械臂在自适应迭代学习控制下,能够适应重力的变化,在 2 种环境下都能达到较好的跟踪效果。但是在轨迹突变处,控制器力矩发生突变而引起较大的抖动。在振动抑制能力方面,该控制器表现出不足之处。因此接下来将对能同时实现轨迹跟踪和彻底消除柔性关节带来弹性振动的控制器作进一步研究。

参考文献

[1] Yim J G, Yeon J S, Park J H, et al. Robust control using recursive design method for flexible joint robot manipulator[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007: 3805-3810

[2] Sasiadek J Z, Green A, Ulrich S, et al. Nonparametric identification and control of flexible joint robot manipulator[C]//Internatioal Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2014: 221-228

[3] 吴昊,毛新涛,刘鹭航,等. 柔性关节空间机械臂的自适应滑模控制[J]. 宇航学报,2019,40(6):703-710

[4] 黄登峰,陈力. 柔性关节空间机械臂的模糊控制及抑振最优控制[J]. 系统仿真学报,2012,24(12):2530-2534

[5] Ulrich S, Sasiadek J Z, Barkana I. Modelig and direct adaptivre control of a flexible joint manipulator[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(1): 25-39

[6] 王漪梦,吴斌,周挺. 基于干扰观测器的空间机械臂柔性关节振动抑制[J]. 自动化与仪器仪表,2019(3):147-150

[7] 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

[8] Krikochoritis T E. Control of flexible joint robots using neural networks[J]. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 2001, 18(2): 269-280

[9] 杨淼,陈力. 边界层厚度可变的柔性关节空间机器人两级滑模控制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 9(19): 1-6

[10] 顾义坤,刘宏. 柔性关节机械臂自适应神经网络动态面控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 64-69

[11] 戎新萍,张得礼,王小平. 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究[J]. 机电工程,2015,32(1):14-20

[12] Edward F C, Mark S B, van Schoor M C, et al. Measurement of the modal parameters of a space structure in zero gravity[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynam-*

ics, 1995,18(3):385-394
[13] Spong M W. Modeling and control of elastic joint robots [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*,1987,109(4):310-319
[14] 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
[15] Tayebi A. Adaptive iterative learning control for robot manipulators[J]. *Automatica*,2004, 40(7): 1195-1203

Adaptive iterative learning control of flexible joint space manipulator in different gravity environment

Meng Lingcong, Liu Fucai, Zhao Wenna, Liu Jianming
(Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

In order to improve the tracking accuracy and anti-jamming ability of flexible joint space manipulator, an adaptive iterative learning control based on singular perturbation theory is proposed for different gravity conditions. Firstly, the dynamic models of flexible joint manipulator under ground gravity and space microgravity are established, which consider the influence of friction. The system is divided into fast subsystem and slow subsystem by singular perturbation method. A speed feedback control rate is designed for the fast variable subsystem to suppress the elastic vibration caused by flexible joints. An adaptive iterative learning control is designed for slow-varying subsystems. The control method adds an iteration term on the basis of PD feedback structure, which can deal with unknown parameters and disturbances well, and improve the stability and anti-interference ability of the whole system. The simulation results show that this method can make the flexible joint space manipulator have good trajectory tracking effect and jitter suppression ability in different gravity environments, and verify the effectiveness of this method.

Key words: space manipulator, flexible-joint, gravity, iterative learning, self-adaption