

不同重力环境下含铰间间隙空间机械臂 FOTSMC 轨迹跟踪控制^①

刘福才^{②*} 夏 威* 兰 会* 秦 利* 侯甜甜* **

(* 燕山大学西校区工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

(** 北京交通大学海滨学院电子信息与控制工程系 沧州 061100)

摘 要 空间机械臂需要在空间微重力环境下服役,但是装配、调试与控制器设计、验证都需要在地面进行,设计好的控制器即使在地面调试结果理想,在空间微重力环境下应用时仍达不到良好的精度和效果。由于关节铰间间隙的存在不可避免导致空间机械臂精度和可靠性降低。针对这一问题,本文构造了分数阶终端滑模控制器(FOTSMC),使得含铰间间隙空间机械臂在不改变控制器参数的前提下,可以适应不同重力环境。同时利用李亚普诺夫稳定性定理可以保证系统的稳定性,并通过仿真实验验证了该控制策略可以有效地抑制外部扰动和间隙带来的非线性内部扰动,使得系统可以对期望轨迹进行准确快速跟踪。

关键词 空间机械臂,重力环境,铰间间隙,分数阶,终端滑模

0 引 言

随着人类对空间研究、开发的不断深入,空间机构应用越来越广泛。空间机构具有在地面重力环境下装调,在空间微重力环境下应用的特点,不同重力环境会导致空间机构运动行为的差异。文献[1]指出了空间机构运动所需的驱动力与运动副界面所处重力环境相关。空间机构受到铰间间隙与微重力相互耦合所带来的影响,会导致定位不准、抖震、失稳、失控等情况产生。例如美国哈勃太空望远镜入轨后,由于间隙导致的太阳能电池板“卡死滑动”周期运动,导致系统振荡^[2]。中国东方红三号卫星太阳能电池阵铰间间隙带来的震颤,也影响了系统稳定性^[3]。文献[4]指出含间隙可展机构在不同重力环境下动力学行为有较大差别。文献[5]通过仿真实验得出,不同重力场下滚珠轴承的运动与摩擦力阈值有明显的不同。

空间机械臂作为空间机构中的重要组成部分,由于具有感知、机动和操作能力一体化,所承担的任务也逐渐深化与复杂,例如在轨燃料加注、航天器维护修复、功能模块更换与升级、在轨装配、轨道清理与转移、空间目标捕获等^[6-9]。在复杂的空间微重力环境中,空间机械臂执行在轨服务期间会受到各种因素的影响,诸如来自于空间环境超高真空、低温交变及微重力,机构自身所带来的摩擦、铰间间隙、柔性,以及重力释放带来的机构运动副接触面变化等因素,这些都会对空间机构操作造成不良影响。在实际应用中,重力环境变化会致使地面设计调试好的控制器在空间应用时达不到良好的精度和效果^[10],影响机械臂末端轨迹跟踪控制精度^[11]。通过空间机构地面模拟试验,吊丝、水浮、气浮等方式对机械臂系统进行了微重力环境模拟,但这些手段并不能完全消除重力对于机械臂系统的影响,与实际空间微重力环境有一定的差异^[12]。文献[13]对比了空间机械臂在地面模拟试验与空间在轨试验

① 863 计划(2013AA),国家自然科学基金青年基金(51605415)和河北省自然科学基金(F2015203362,F2016203494)资助项目。
② 男,1966 年生,博士,博士生导师,教授;研究方向:空间机构运动行为分析与控制;联系人,E-mail: lfc@ysu.edu.cn
(收稿日期:2018-02-28)

的定位精度实验结果,对比发现末端轨迹跟踪误差有较大差别。例如在 Z 轴方向,机械臂在地面悬吊试验的定位误差为 2 mm,而通过航天器在轨试验的定位误差则为 5.3 mm。

目前对于含铰间间隙空间机械臂的研究主要集中于建立精确的机构动力学模型以及通过各种附加机构提高运动学精度上。文献[14]针对含间隙服务机械臂的关节读数漂移问题,提出一种基于视觉标记物的在线校准方法。文献[15]针对含有铰间间隙的空间机械臂系统提出了一种数值分析方法,对其进行动力学分析。文献[16]建立了谐波齿轮传动情况下间隙机构模型,并分析了相应的动力学特性。文献[17]针对空间机械臂辅助对接任务中的复杂关节力矩控制问题,建立了含间隙、非线性刚度及啮合阻尼的多级行星齿轮传动复杂关节精细动力学模型。文献[18]搭建了气动加载试验平台,通过模拟实际运动副界面载荷,进行重力环境下空间机械臂关节界面磨损研究。

分析现有文献可以看出,从控制角度出发解决铰间间隙对空间机械臂所带来的动力学影响的研究相对较少。即使采用含有地面重力补偿项的控制器,在地面重力环境下参数调试合适后,去掉重力补偿项的控制器应用于空间机械臂模型,也会由于微小的负载或系统参数变化,导致混沌运动,使得实际应用中表现为强烈抖震、卡死、失控等现象^[19]。针对这一问题,文献[20]提出了一种基于自抗扰控制器的控制方法,将铰间间隙带来的碰撞视为干扰,从而可以实现不同重力环境下含铰间间隙空间机械臂的末端轨迹跟踪。由于传统的扩张状态观测器(extended state observer, ESO)在设计时,总是将扰动视为常量或者慢变量,对于铰间间隙带来的突变干扰可以采用大增益 ESO 来获得满意的效果,但是高增益同样会带来噪声放大的问题^[21],导致控制力矩会存在大幅突变。

针对这种情况,本文使用分数阶终端滑模控制(fractional orders terminal sliding mode control, FOTSMC)方法对地面重力环境下装调和空间重力环境下应用两种情况下含间隙机械臂进行控制,结合了分数阶控制理论与滑模控制理论的特点^[22]。

其中终端滑模可以在有系统不确定性存在的情况下有限时间内将跟踪误差收敛到零,并且抑制突变干扰;分数阶算子具有遗传特性和记忆特性,增加了 2 个可以调节的自由度^[23],可以进一步提高系统的控制品质与末端精度。文中通过李雅普诺夫理论证明采用分数阶终端滑模(FOTSMC)控制器的系统全局渐进稳定性,并在存在外部干扰并且模拟实际关节输出力矩大小有限情况下,与有外界干扰的 PD 与自抗扰控制方式进行 Matlab 仿真实验对比,验证了本文提出控制器的优越性。

1 系统模型建立

1.1 含铰间间隙机械臂系统描述

基座固定含铰间间隙空间机械臂如图 1 所示。

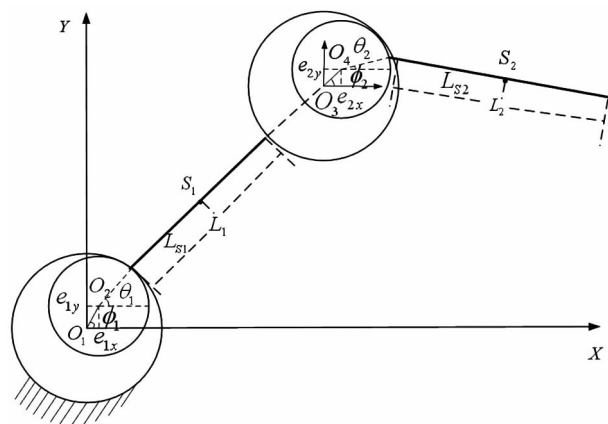


图 1 基座固定含铰间间隙空间机械臂模型

图中,机械臂连杆与基座、连杆与连杆之间均以旋转铰链连接,为方便描述,对铰间间隙进行了夸张放大。图中 S_1 和 S_2 分别为连杆 1 和连杆 2 的质心, O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 分别为轴套 1、轴颈 1、轴套 2、轴颈 2 的质心。以每个轴套质心为原点建立坐标系, (e_{ix}, e_{iy}) 为轴颈中心相对于轴套中心的位置坐标, e_i 为间隙矢量,即偏心距, ϕ_i 为轴颈中心相对 OX 坐标轴的角度, δ_i 为穿刺深度, θ_i 为机械臂相对 OX 坐标轴的旋转角度。具体表达式为

$$e_i = \sqrt{e_{ix}^2 + e_{iy}^2} \quad (1)$$

$$\phi_i = \arctan \frac{e_{iy}}{e_{ix}} \quad (2)$$

$$\delta_i = e_i - r_i \quad (3)$$

式(3)中, r_i 为轴套与轴径半径之差。

轴套 1 位于固定基座上, 坐标系 OXY 以轴套 1 质心位置为原点建立。并定义轴套 1、轴颈 1、轴套 2 和轴颈 2 的半径分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 。连杆 1 和连杆 2 的臂长分别为 L_1 和 L_2 、质量分别为 m_1 和 m_2 , 作用在其上的驱动力矩分别为 T_1 和 T_2 。连杆质心到轴颈质心的距离为 L_{Si} (其中 $i=1, 2$)。

1.2 接触碰撞分析

假定间隙铰运动过程中, 轴颈为刚体 (不发生变形), 轴套为柔性体 (可发生变形)^[24], 下面进行铰间间隙中轴径与轴套的接触碰撞力分析。

(1) 碰撞接触判定

间隙铰轴径与轴套碰撞根据 $\text{sign}(\delta_i)$ 值的正负进行判定, 当 $\delta_i < 0$ 时, 代表轴径在轴套间隙内自由运动, 两者没有接触; $\delta_i = 0$ 时, 两者恰好接触不产生相互作用力; $\delta_i > 0$ 时, 两者接触并且发生形变。

(2) 碰撞接触力分析

间隙铰内轴径与轴套的碰撞力示意图如图 2 所示, 图中 F_{ni} 为法向接触力, F_{ti} 为切向摩擦力; 设 F_{Ci} 为两者合力, 则表达式为

$$F_{Ci} = \sqrt{F_{ni}^2 + F_{ti}^2} \quad (4)$$

式中, F_{Cxi} 、 F_{Cyi} 分别表示 F_{Ci} 在 x 轴与 y 轴的分量。

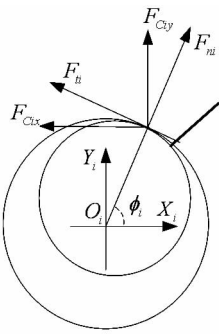


图 2 碰撞力示意图

法向接触力 F_{ni} 表达式为

$$F_{ni} = K_i \delta_i^m + C_{ni} \dot{\delta}_i \quad (5)$$

式中, K_i 为第 i 个间隙铰刚度系数, C_{ni} 为第 i 个间隙铰法向阻尼系数, m 为非线性弹簧接触力系数。

切向摩擦力 F_{ti} 表达式为

$$F_{ti} = -f_i F_{ni} \text{sign}(v_{ti}) \quad (6)$$

式中, f_i 为第 i 个间隙铰滑动摩擦因数, v_{ti} 为第 i 个间隙铰切向相对速度。

因此可得碰撞接触力表达式为:

$$\begin{cases} F_{Cix} = \text{sign}(\delta_i) (F_{ni} \cos \phi_i + F_{ti} \sin \phi_i) \\ F_{Ciy} = \text{sign}(\delta_i) (F_{ni} \sin \phi_i - F_{ti} \cos \phi_i) \end{cases} \quad (7)$$

1.3 含铰间间隙机械臂模型建立

带间隙 2 自由度机械臂为 6 自由度, 分别为 $e_{1x} - e_{1y} - \theta_1, e_{2x} - e_{2y} - \theta_2$ 。

因此可得, 连杆 1 质心方程:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{S1} \\ \ddot{y}_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{e}_{1x} \\ \ddot{e}_{1y} \end{bmatrix} + L_{S1} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

连杆 2 质心方程:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{S2} \\ \ddot{y}_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{e}_{1x} \\ \ddot{e}_{1y} \end{bmatrix} + L_1 \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{e}_{2x} \\ \ddot{e}_{2y} \end{bmatrix} + L_{S2} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

对式(8)、式(9)求二阶导可得, 连杆 1 与连杆 2 质心加速度方程:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{S1} \\ \ddot{y}_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{e}_{1x} \\ \ddot{e}_{1y} \end{bmatrix} - L_{S1} \dot{\theta}_1^2 \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} + L_{S1} \ddot{\theta}_1 \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{S2} \\ \ddot{y}_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{e}_{1x} \\ \ddot{e}_{1y} \end{bmatrix} + L_1 \dot{\theta}_1^2 \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 \\ -\sin \theta_1 \end{bmatrix} + L_1 \ddot{\theta}_1 \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{e}_{2x} \\ \ddot{e}_{2y} \end{bmatrix} + L_{S2} \dot{\theta}_2^2 \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \\ -\sin \theta_2 \end{bmatrix} + L_{S2} \ddot{\theta}_2 \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

在发生碰撞的时刻, 碰撞点位置轴颈相对于轴套的切向和法向速度:

$$\begin{cases} v_{2t} = -\dot{e}_{2x} \sin \phi_2 + \dot{e}_{2y} \cos \phi_2 + (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) R_4 - \dot{\theta}_1 e_2 \\ v_{1t} = -\dot{e}_{1x} \sin \phi_1 + \dot{e}_{1y} \cos \phi_1 + \dot{\theta}_1 R_2 \\ v_{in} = \dot{e}_{ix} \cos \phi_i + \dot{e}_{iy} \sin \phi_i, \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (12)$$

根据牛顿第二定理, 可得:

$$\begin{cases} -F_{C1x} + F_{C2x} = m_1 \ddot{x}_{S1} \\ -F_{C1y} + F_{C2y} - m_1 g = m_1 \ddot{y}_{S1} \end{cases} \quad (13)$$

由公式 $\tau = {}^S J \alpha + \omega \times ({}^S J \omega)$ 与式(13)可得:

$$\begin{aligned} T_1 + F_{C1x}R_2\sin\phi_1 - F_{C2x}[L_1\sin\theta_1 + e_{2y} + R_4\sin\phi_2] \\ - F_{C1y}R_2\cos\phi_1 + F_{C2y}[L_1\cos\theta_1 + e_{2x} + R_4\cos\phi_2] \\ - m_1gL_{S_1}\cos\theta_1 = J_{O_2}\ddot{\theta}_1 \end{aligned} \tag{14}$$

同理,对于连杆 2 可得:

$$T_2 + F_{C2x}R_4\sin\phi_2 - F_{C2y}R_4\cos\phi_2 - m_2gL_{S_2}\cos\theta_2 = J_{O_4}\ddot{\theta}_2 \tag{15}$$

将方程整理成矩阵形式表示如下:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{Q} \tag{16}$$

式中, $\ddot{\mathbf{q}}$ 为广义加速度矩阵, $\mathbf{H}$ 为广义质量矩阵, $\mathbf{Q}$ 为广义力矩阵。其中,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \ddot{e}_{1x} & \ddot{e}_{1y} & \ddot{\theta}_1 & \ddot{e}_{2x} & \ddot{e}_{2y} & \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}^T$$
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_{S_1}\sin\theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & L_{S_1}\cos\theta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{O_2} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -L_1\sin\theta_1 & 1 & 0 & -L_{S_2}\sin\theta_2 \\ 0 & 1 & L_1\cos\theta_1 & 0 & 1 & L_{S_2}\cos\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{O_4} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Q} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6]^T$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{-F_{C1x} + F_{C2x}}{m_1} + L_{S_1}\dot{\theta}_1^2\cos\theta_1 \\ a_2 &= \frac{-F_{C1y} + F_{C2y}}{m_1} - g + L_{S_1}\dot{\theta}_1^2\sin\theta_1 \\ a_3 &= T_1 + F_{C1x}R_2\sin\phi_1 - F_{C1y}R_2\cos\phi_1 \\ &\quad - m_1gL_{S_1}\cos\theta_1 \\ &\quad - F_{C2x}[L_1\sin\theta_1 + e_{2y} + R_4\sin\phi_2] \\ &\quad + F_{C2y}[L_1\cos\theta_1 + e_{2x} + R_4\cos\phi_2] \\ a_4 &= \frac{-F_{C2x}}{m_2} + L_1\dot{\theta}_1^2\cos\theta_1 + L_{S_2}\dot{\theta}_2^2\cos\theta_2 \\ a_5 &= \frac{-F_{C2y}}{m_2} - g + L_1\dot{\theta}_1^2\sin\theta_1 + L_{S_2}\dot{\theta}_2^2\sin\theta_2 \\ a_6 &= T_2 + F_{C2x}R_4\sin\phi_2 - F_{C2y}R_4\cos\phi_2 \\ &\quad - m_2gL_{S_2}\cos\theta_2 \end{aligned}$$

2 控制器设计

空间机械臂系统动力学模型通常可以被描述成如下所示:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{d}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \tag{17}$$

将其简化为

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D} = \boldsymbol{\tau} \tag{18}$$

式中, $\mathbf{H}$ 为广义质量矩阵; $\mathbf{B}$ 为哥氏力与离心力矩阵; $\mathbf{D} = \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{d}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$ 为重力矢量、摩擦力矢量、建模不确定干扰、外来扰动之和,假定 $\mathbf{D}$ 有界; $\mathbf{q}$ 为机械臂关节角度矢量; $\boldsymbol{\tau}$ 为实际驱动力矩。

定义其名义模型如下:

$$\mathbf{H}_n\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_n\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}_n \tag{19}$$

定义轨迹跟踪误差矢量如下:

$$\begin{cases} \mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} \end{cases} \tag{20}$$

式中, $\mathbf{q}_d$ 、 $\dot{\mathbf{q}}_d$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}_d$ 为期望的位置、速度、加速度矩阵,并假设 $\mathbf{e}$ 、 $\dot{\mathbf{e}}$ 、 $\ddot{\mathbf{e}}$ 均有界。

系统总的不确定性为

$$\mathbf{L} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_n \tag{21}$$

并且符合条件:

$$\|\mathbf{D}^{\alpha+1}(\mathbf{L})\| \leq \delta \tag{22}$$

式中, δ 是一个已知的正常数。

定义滑模面如下:

$$\mathbf{s} = \mathbf{D}^{\alpha}(\ddot{\mathbf{e}}) + \lambda\mathbf{e}^{m/n} \tag{23}$$

式中, m 、 n 为正奇数,同时满足 $m < n < 2m$ 。

设计分数阶终端滑模控制器如下:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}_n\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{B}_n\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}_n(\mathbf{D}^{-1-\alpha}(\lambda\frac{m}{n}\mathbf{e}^{\frac{m}{n}-1}\dot{\mathbf{e}}) \\ + \mathbf{D}^{-1-\alpha}(\mathbf{K}\mathbf{s} + \mathbf{K}\text{sign}(\mathbf{s}) + \boldsymbol{\delta})) \end{aligned} \tag{24}$$

式中, $\mathbf{D}^{\alpha}$ 为分数阶 Caputo 算子,表示 α 阶次微分; $\mathbf{K}$ 为滑模增益矩阵; λ 为滑模面倾斜常量矩阵; $\text{sign}()$ 为符号函数。

3 控制器稳定性证明

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{s}^2 \tag{25}$$

对其求导可得:

$$\dot{V} = \mathbf{s}\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}(\mathbf{D}^{\alpha+1}\ddot{\mathbf{e}} + \lambda\frac{m}{n}\mathbf{e}^{\frac{m}{n}-1}\dot{\mathbf{e}})$$

$$\begin{aligned}
&= s(D^{\alpha+1}(\dot{q}_d + H_n^{-1}B_n\dot{q} + H_n^{-1} - L) + \lambda \frac{m}{n}e^{\frac{m}{n}-1}\dot{e}) \\
&= s(D^{\alpha+1}(-D^{-\alpha-1}(\lambda \frac{m}{n}e^{\frac{m}{n}-1}\dot{e}) \\
&\quad - D^{-1-\alpha}(Ks + K\text{sign}(s) + \delta) - L) + \lambda \frac{m}{n}e^{\frac{m}{n}-1}\dot{e}) \\
&= s(-Ks - K\text{sign}(s)) = -K(s^2 + |s|) \leq 0
\end{aligned} \tag{26}$$

因此 $\dot{V}$ 为负定。

考虑到滑模趋近律直接使用符号函数 $\text{sign}(\cdot)$ 可能引起抖振,因此选择幂次趋近律为

$$\dot{s} = -K_s \left| \frac{s}{\gamma} \right|^\sigma \text{sign}\left(\frac{s}{\gamma}\right) \tag{27}$$

式中, $\gamma > 0$ 为滑模切换层厚度放缩参数, $0 < \sigma < 1$ 为幂次趋近律。

令 $V = \frac{1}{2}s^2$, 则

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= s\dot{s} = -K_s s \left| \frac{s}{\gamma} \right|^\sigma \text{sign}\left(\frac{s}{\gamma}\right) \\
&= -K_s \gamma \left| \frac{s}{\gamma} \right| \text{sign}(s) \left| \frac{s}{\gamma} \right|^\sigma \text{sign}\left(\frac{s}{\gamma}\right) \\
&= -K_s \gamma \left| \frac{s}{\gamma} \right|^{\sigma+1} < 0
\end{aligned} \tag{28}$$

更换趋近律之后,运动轨迹滑模面邻域内将最终到达滑模面,即满足局部到达条件,仍然可以保证系统的渐进稳定性。

4 仿真研究

为了验证控制器的有效性,本文使用 Matlab 进行了仿真。将 FOTSMC 控制器,与自抗扰控制器^[19]及 PID 控制器进行对比。为了证明控制器的抗扰能力,在 2~4 s 添加了幅值较大且短时变化剧烈的随机干扰量作为外部干扰,如图 3 所示。

设定含铰间隙 2 自由度机械臂模型参数如下。

$L_1 = L_2 = 1 \text{ m}$; $L_{S_1} = L_{S_2} = 0.5 \text{ m}$; $R_1 = R_3 = 0.006 \text{ m}$; $R_2 = R_4 = 0.005 \text{ m}$; $m_1 = m_2 = 1.09 \text{ kg}$; $J_{O_2} = J_{O_4} = 0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $h = 1.5$; $f_i = 0.05$; $C_{in} = 175 \text{ N} \cdot \text{s/m}$; $K_i = 1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

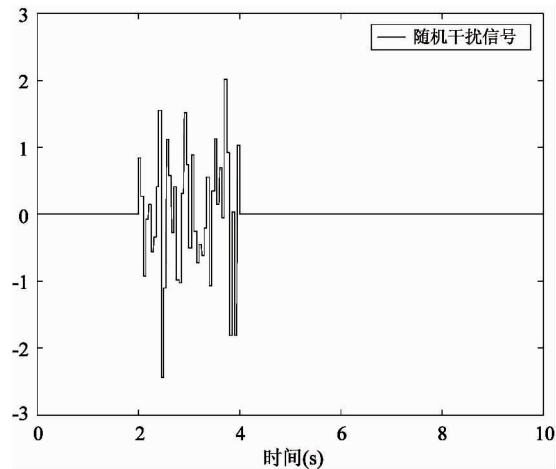


图3 外部随机干扰信号

系统初始条件给定为 $(0.000001, 0.000001, -0.6, 0.000001, 0.000001, 1.4)$, 机械臂的期望运动轨迹为

$$\begin{cases} x_d = 0.28 \cos\left(\frac{\pi(t+5.5)}{4}\right) + 0.52 \\ y_d = 0.15 \sin\left(\frac{\pi(t+5.5)}{4}\right) + 0.38 \end{cases} \tag{29}$$

4.1 空间微重力环境

仿真中为了模拟机械臂空间微重力环境下运行状况,设 $g = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$, 仿真结果如下所示。其中图 4 为使用 PID 控制器控制下空间机械臂末端轨迹,图 5 为 ADRC 控制器控制下空间机械臂末端轨迹,图 6 为 FOTSMC 控制器控制下空间机械臂末端轨迹,图 7、图 8 分别为 3 种控制器的关节 1 与关节 2 关节角度跟踪误差。

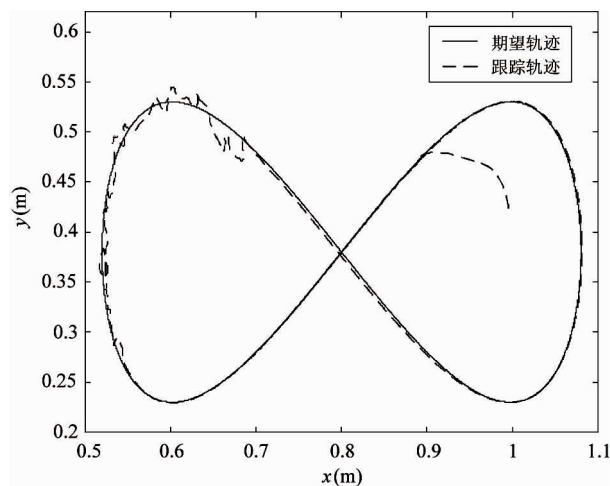


图4 PID 控制器末端轨迹跟踪

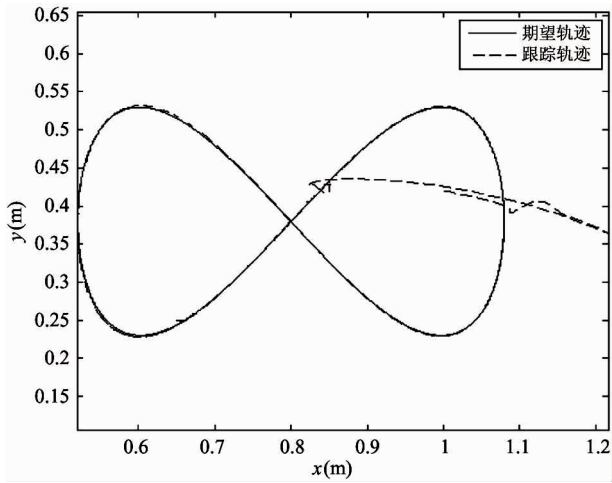


图 5 ADRC 控制器末端轨迹跟踪

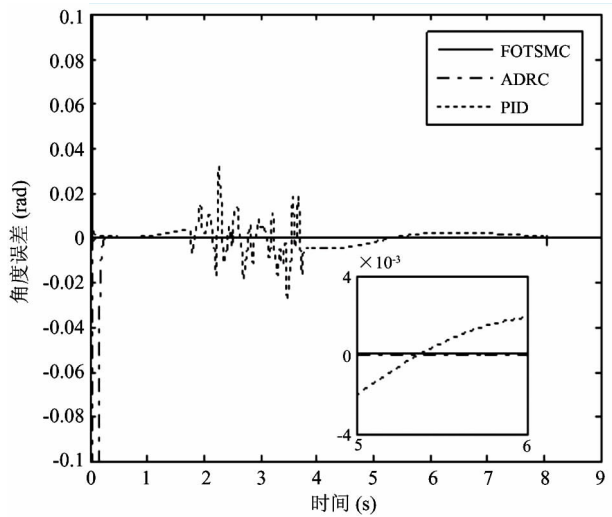


图 8 关节 2 角度跟踪误差

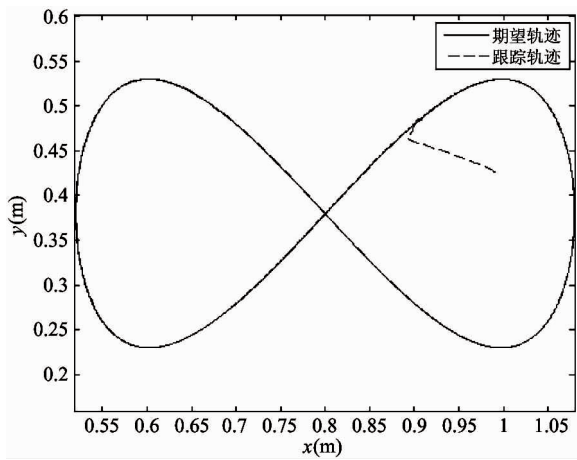


图 6 FOTSMC 控制器末端轨迹跟踪

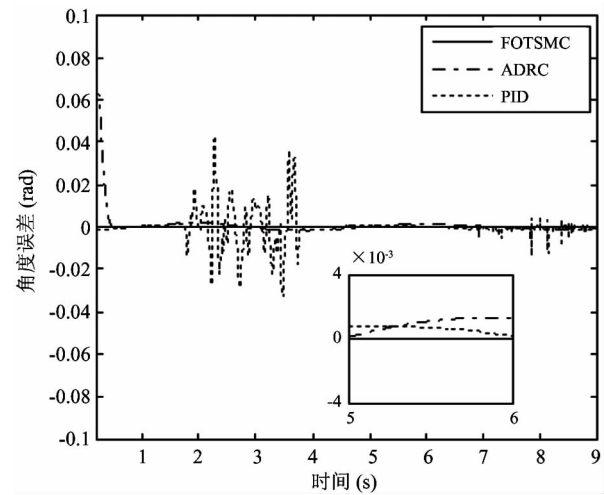


图 7 关节 1 角度跟踪误差

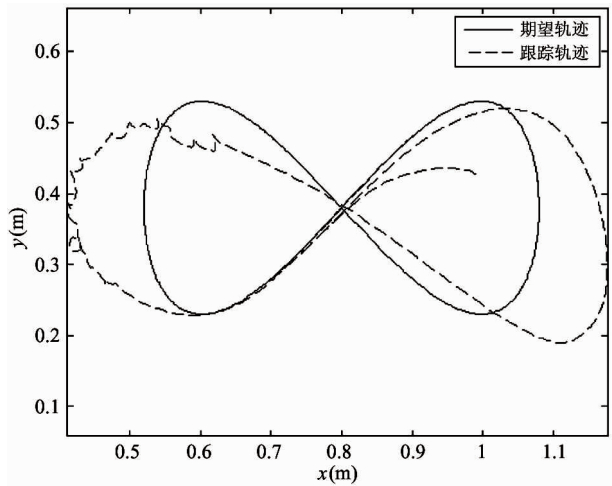


图 9 PID 控制器末端轨迹跟踪

从图 4 ~ 图 6 对比可以看出,在存在干扰的情况下 ADRC 控制器与 FOTSMC 控制器抗扰动效果明显优于 PID 控制器。ADRC 控制器可以有效地克服扰动,但是跟踪速度较慢。由图 7 和图 8 中可以看出,FOTSMC 控制器跟踪误差小于 ADRC 和 PID 控制器。

4.2 地面装调重力环境

本文的目的在于验证调节好的控制器,在不进行参数改变的情况下,就可以适应不同的重力环境。因此,3 种控制器的参数均不做改变,模拟地面装调环境,将重力加速度设为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,仿真如图 9 ~ 图 13 所示。

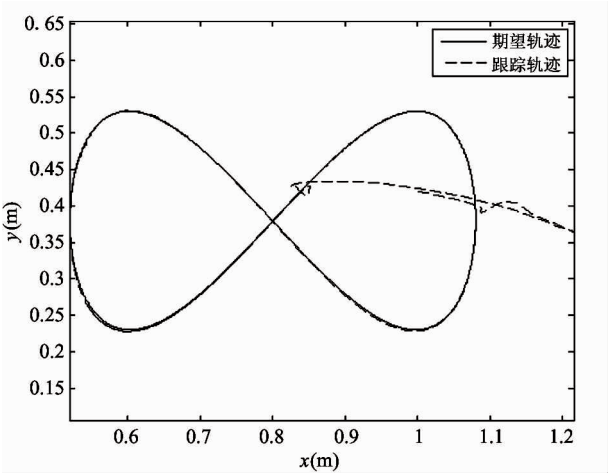


图 10 ADRC 控制器末端轨迹跟踪

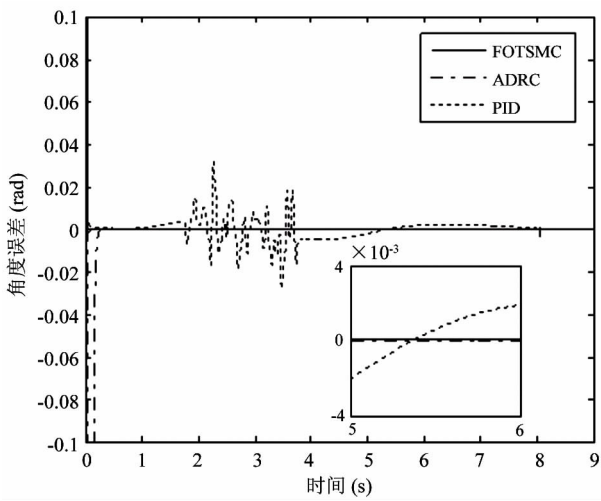


图 13 关节 2 角度跟踪误差

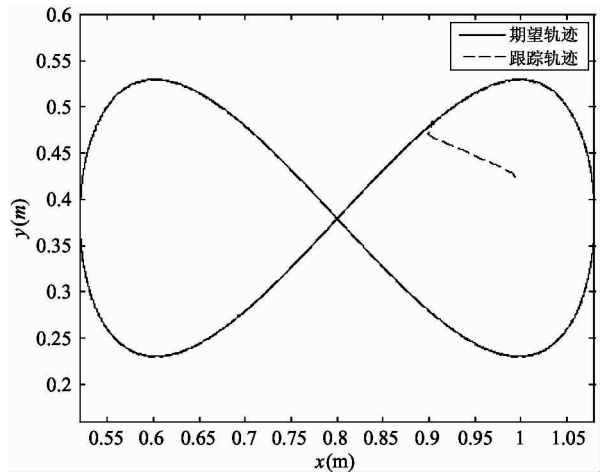


图 11 FOTSMC 控制器末端轨迹跟踪

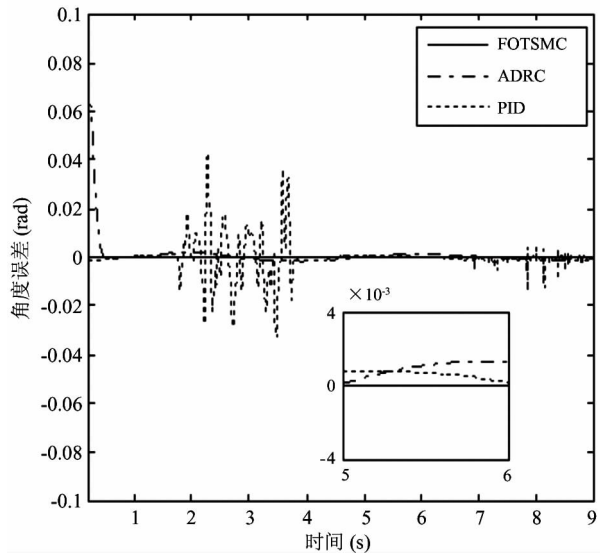


图 12 关节 1 角度跟踪误差

在图 9 中,不添加重力补偿项的 PID 控制器已经不能完全跟踪上预定轨迹;在图 10 中,ADRC 控制器虽然可以在不同重力环境下很好地跟踪末端轨迹曲线,但起始阶段会产生很大的波动;在图 11 中,FOTSMC 控制器则可以在不同重力环境下对轨迹进行良好的跟踪,并且跟踪速度快。图 12 与图 13 为关节 1 与关节 2 的角度跟踪误差,FOTSMC 相对于 ADRC 控制器误差残留更小,PID 控制器误差很大。

5 结 论

针对不同重力环境下含铰间间隙空间机械臂轨迹跟踪问题,本文设计了 FOTSMC 控制器。该控制器可以在调试完毕后适应不同重力环境,即可以实现地面重力环境下装调及空间微重力环境下应用。

通过仿真,对于含铰间间隙空间机械臂而言,相比 PID 控制器,FOTSMC 控制器在地面装调和空间应用环境都可以快速有效地跟踪期望轨迹。而与 ADRC 控制器相比较,FOTSMC 控制器控制速度更快,轨迹跟踪误差更小,超调更小,同时对于外部扰动,也具有很强的鲁棒性。充分说明了 FOTSMC 控制器的良好性能。

参考文献

[1] 陈小前. 航天器在轨服务技术[M]. 北京:中国宇航出版社, 2009

- [2] 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
- [3] Thornton E, Foster R. Dynamic response of rapidly heated space structures [C]. In: Proceedings of the 33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Dallas, USA, 1992. 1185-1211
- [4] 马兴瑞, 王本利, 苟兴宇. 航天器动力学:若干问题进展及应用[M]. 北京:科学出版社, 2001
- [5] 阎绍泽, 陈鹿民, 季林红, 等. 含间隙铰的机械多系统动力学模型[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3):290-294
- [6] Obara S, Sato M. Numerical investigation of influence of gravity on the performance of ball bearings assembled in a space device[C]. In: Proceedings of the 2nd World Tribology Congress, Vienna, Austria, 2001
- [7] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68(8):1-26
- [8] 李新刚, 裴胜伟. 国外航天器在轨捕获技术综述[J]. 航天器工程, 2013(01):113-119
- [9] Crujssen H J, Ellenborek M, Henderson M. The European robotic arm: a high performance mechanism finally on its way to space [C]. In: Proceedings of the 42nd Aerospace Mechanism Symposium, Baltimore, USA, 2014. 319-315
- [10] Huang P, Wang M, Meng Z, et al. Attitude takeover control for post-capture of target spacecraft using space robot[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2016, 51:171-180
- [11] 刘福才, 高娟娟, 王跃灵. 重力对空间机械臂运动控制的影响[J]. 高技术通讯, 2012, 22(9):944-950
- [12] 刘福才, 侯甜甜, 秦利, 等. 不同重力环境下间隙对机械臂末端轨迹的影响[J]. 高技术通讯, 2014(10):1044 -1052
- [13] Crawley E F, Barlow M S, van Marthinus C, et al. Measurement of the modal parameters of a space structure in zero gravity [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(3):385-394
- [14] Matsunaga S. Micro-gravity experiments of space robotics and space-used mechanisms at Tokyo institute of technology[J]. *Journal of the Japan Society of Microgravity Application*, 2002, 19: 101-105
- [15] 王锋, 陈凯, 陈小平. 一种含间隙机械臂的在线校准方法[J]. 机器人, 2013, 35(5):521-526
- [16] Yang Z, Zheng F B. Dynamics analysis of space robot manipulator with joint clearance [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(7-8):1147-1155
- [17] 孙东阳, 陈国平, 王铁成. 谐波齿轮传动的含间隙机构的动力学分析[J]. 振动与冲击, 2014(23):160-164
- [18] 刘志全, 危清清, 王耀兵. 空间机械臂关节精细动力学模型的建立及关节力矩控制[J]. 宇航学报, 2014, 35(6):663-668
- [19] 刘福才, 贾亚飞, 刘爽爽. 气动加载系统的积分型线性自抗扰控制器[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8):1090 -1097
- [20] 秦利. 考虑重力效应的空间机器人系统建模与控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学电气工程学院, 2014
- [21] 刘福才, 侯甜甜, 秦利, 等. 考虑铰间间隙和重力影响的空间机械臂轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(5):665-673
- [22] Xiong S, Wang W, Liu X, et al. A novel extended state observer[J]. *Isa Transactions*, 2015, 58:309-317
- [23] Chang Y H, Wu C I, Chen H C, et al. Fractional order integer sliding-mode flux observer for direct field-oriented induction machines[J]. *International Journal of Innovative Computing Information & Control Ijicic*, 2012, 8(7):4851-4868
- [24] Flores P, Ambrósio J, Claro J C P, et al. A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41(3):247-261

FOTSMC trajectory tracking control of space robot arm with joint clearance under different gravity environment

Liu Fucui^{*}, Xia Wei^{*}, Lan Hui^{*}, Qin Li^{*}, Hou Tiantian^{**}

(^{*} Industrial Computer Control Engineering, Yanshan University, Key Lab of Hebei Province, Qinhuangdao 066004)

(^{**} Haibin College Electronic Information and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Cangzhou 061100)

Abstract

Space robot arm needs to be served under microgravity conditions in space, but the assembly and commissioning of space robot arm as well as the design and verification of controller need to be carried out under gravity environment. Therefore, even though the space robot arm works very well on the ground, the space robot arm is used under microgravity environment. At the same time, it is likely to cause end track deviation due to the existence of joint clearance, the accuracy and reliability of the space robot arm will be reduced further. To solve this problem, fractional orders terminal sliding mode control (FOTSMC) is designed in this paper, which enable the space manipulator with joint clearance to adapt to different gravity conditions without changing control parameters. And the Lyapunov stability theorem is employed to guarantee the stability of the system. The simulation results have shown that this control strategy can effectively suppress external disturbances and the nonlinear internal disturbance caused by the clearance, so that the system can track the desired trajectory accurately and quickly.

Key words: space robot arm, gravity environment, joint clearance, fractional order, terminal sliding mode