

自由浮动空间柔性机械臂在轨操作刚性载荷的组合控制

王从庆^{1,2} 裴希伍¹ 吴鹏飞¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安, 710054)

摘要: 针对自由浮动空间柔性机械臂, 讨论了在笛卡尔坐标系中机械臂对刚性载荷的轨迹跟踪控制和连杆柔性振动主动控制问题。基于拉格朗日法、假设模态法和系统动量守恒定律, 推导了一种自由浮动空间柔性机械臂在轨操作刚性载荷的动力学方程。在此基础上, 采用奇异摄动法将系统分解为慢变和快变两种尺度时标的子系统, 设计模糊终端滑模控制器和 Backstepping 控制器分别对两个子系统进行控制, 由此得到的组合控制使得机械臂按期望轨迹对刚性载荷进行精确在轨操作, 同时抑制了柔性连杆的弹性振动。通过数字仿真验证了上述方法的有效性。

关键词: 空间柔性机械臂; 动力学建模; 奇异摄动; 模糊终端滑模控制; 振动抑制

中图分类号: TP41; TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)04-0452-06

Composite Control of On-Orbit Operation of Free-floating Space Flexible Manipulator with Rigid Load

Wang Congqing^{1,2}, Pei Xiwu¹, Wu Pengfei¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710054, China)

Abstract: Aiming at a free-floating space flexible manipulator with a rigid load on-orbit, the trajectory tracking control of the load and an active vibration suppression of the flexible manipulator are studied in Cartesian space. On the basis of the assumed modes method, the Lagrange principle and the momentum conservation law, the dynamics modeling of a free-floating space flexible manipulator with a rigid load on-orbit is derived. Furthermore, a slow subsystem and a fast subsystem are separated based on the two-time scale singular perturbation method in which a fuzzy terminal sliding mode control method and a Backstepping control method are adopted in each subsystem respectively. Using this combined control method, the manipulator can track the expected trajectory accurately and its flexible vibration can be suppressed during manipulating the rigid load. Finally, the simulation results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: space flexible manipulator; dynamic modeling; singular perturbation; fuzzy terminal sliding mode control; vibration suppression

空间柔性机械臂因具有耗能小、操作空间大、负载重等优点而在空间探索中得到广泛的应用。柔性机械臂在运动时产生弹性振动, 影响了机械臂的

末端控制精度和整个机械臂系统的稳定性。因此, 必须对空间柔性机械臂的弹性振动进行有效地控制。众多学者在空间机械臂在轨捕获非合作目标方

基金项目: 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室基金(201002)资助项目。

收稿日期: 2011-10-11; **修订日期:** 2011-12-22

通讯作者: 王从庆, 男, 博士, 教授, 1960年生, E-mail: wangcq@nuaa.edu.cn。

面做了广泛的研究,文献[1~4]研究了空间机器人捕获偏离轨道卫星的控制策略,文献[5,6]给出了空间机械臂对卫星自动捕获实验室平台的搭建。文献[7,8]针对空间柔性机械臂系统,采用拉格朗日、Kane 等不同方法进行了动力学建模。然而空间柔性机械臂在运动中会产生扭曲、弹性、剪切等变形,常规的动力学建模方法和PD 控制策略已不能满足空间多柔体机械臂在轨控制的要求。文献[9,10]利用奇异摄动法将柔性机械臂系统分解为慢变子系统和快变子系统,分别进行控制器设计,实现了关节角的轨迹跟踪和弹性形变的振动抑制。但目前的研究主要是针对空间操作臂的轨迹跟踪与抑振控制,所采用的奇异摄动法没有考虑机械臂末端抓取有效载荷时,机械臂末端和载荷之间的运动约束以及力的相互作用关系,也没有讨论空间柔性机械臂如何按期望规划对载荷进行抓取、搬运等在轨操作问题。本文研究自由浮动空间三连杆柔性机械臂在平面内对刚性载荷的在轨操作问题,考虑末端执行器和载荷之间力的关系,建立柔性机械臂和载荷组成的系统的非线性动力学模型,引入奇异摄动方法将系统分解为快变和慢变两尺度时标系统,针对不确定性和外界扰动,在慢变子系统中,采用模糊终端滑模控制对载荷进行轨迹跟踪控制;在快变子系统中,采用Backstepping 控制对柔性杆件的振动进行主动抑制,同时实现机械臂对载荷抓取力的有效控制。最后进行数值仿真分析。

1 空间柔性机械臂系统动力学建模

如图1所示,自由浮动空间柔性机械臂系统由航天器基座、三连杆柔性机械臂和刚性载荷组成:基座半径为 L_b ,载荷的半径为 L_c ,各连杆长度分别为 $L_1, L_2, L_3, \theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 为连杆的关节转角向

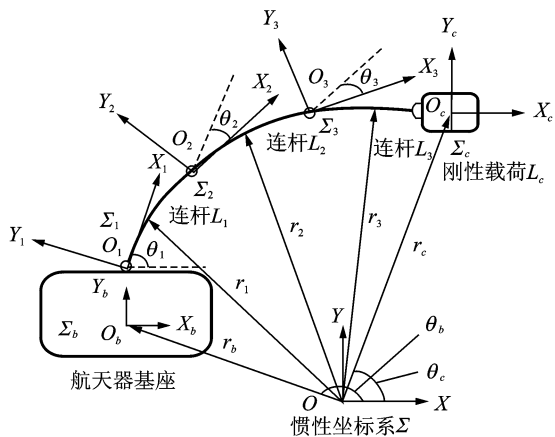


图1 自由浮动空间柔性机械臂系统平面坐标系

量, $\Sigma-OXY$ 为惯性坐标系, $\Sigma_b-O_bX_bY_b$ 为固定于基座质心的基座坐标系, $\Sigma_i-O_iX_iY_i$ 为固定于机械臂第 i 关节的附体坐标系($i=1,2,3$), $\Sigma_c-O_cX_cY_c$ 为固定于载荷质心的载荷坐标系。各连杆附体坐标系按照 Denavit-Hartenberg 方法建立, 载荷质心的位姿为 $\mathbf{X}_c = [x_c, y_c, \theta_c]^T$, 基座本体质心的位姿为 $\mathbf{X}_b = [x_b, y_b, \theta_b]^T$ 。 $\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_c, \mathbf{r}_i$ ($i=1,2,3$) 为惯性坐标系原点到本体坐标系原点、载荷坐标系原点和各连杆质心的位置矢量。

忽略柔性杆轴向变形, 将其作为 Euler-Bernoulli 梁来处理, 基于假设模态法描述连杆的弹性形变为

$$\omega_i(x_i, t) = \sum_{j=1}^n \sin(j\pi x_i/L_i) \mathbf{Q}_{ij}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}_{ij}(t)$ 为模态坐标; x_i 为柔性连杆附体坐标系中 X_i 方向坐标, 本文取 $n=2$ 。

系统总动能为

$$T = \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_b^2 + \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}_c^2 + \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left(I_i \dot{\theta}_i^2 + \int_0^{L_i} \rho_i v_i^2 dx_i \right) \quad (2)$$

式中: ρ_i 为第 i 个连杆的线密度; v_b, v_i, v_c 分别为本体质心、第 i 个连杆上任一点和载荷质心的速度。

系统总势能为

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_0^{L_i} EI \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_i} \right)^2 dx_i \quad (3)$$

式中: EI 为连杆的弹性模量。

则拉格朗日函数 $L=T-U$, 求得系统的总动能、弹性势能, 代入拉格朗日方程经过复杂的推导和计算, 可得到描述关节转角和连杆模态坐标的动力学方程为

$$\mathbf{M}_{11} \ddot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{M}_{12} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{M}_{13} \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{D}_{11} \dot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{D}_{12} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{D}_{13} \dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{21} \ddot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{M}_{22} \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{M}_{23} \ddot{\mathbf{Q}} + \mathbf{D}_{21} \dot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{D}_{22} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K} \mathbf{Q} = 0 \quad (5)$$

式中: \mathbf{M}_{ij} ($i=1,2; j=1,2,3$) 为广义质量矩阵; \mathbf{D}_{ij} ($i=1,2; j=1,2,3$) 为阻尼矩阵; $\mathbf{Q} = (\mathbf{Q}_1^T, \mathbf{Q}_2^T, \mathbf{Q}_3^T)^T$, $\mathbf{Q}_1 = (Q_{11}, Q_{12})^T$, $\mathbf{Q}_2 = (Q_{21}, Q_{22})^T$, $\mathbf{Q}_3 = (Q_{31}, Q_{32})^T$ 分别为连杆 L_1, L_2, L_3 弹性形变的模态坐标; \mathbf{K} 为刚度矩阵; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 为连杆驱动力矩向量; \mathbf{J} 为动力学系统的雅可比矩阵; \mathbf{F} 为末端执行器的广义作用力。

根据 Newton-Euler 方程, 载荷的动力学方程

为

$$\mathbf{M}(\mathbf{X}_c)\ddot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{C}(\mathbf{X}_c, \dot{\mathbf{X}}_c) = \mathbf{F}_0 = \mathbf{G}\mathbf{F} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{X}_c)$ 为载荷的惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{X}_c, \dot{\mathbf{X}}_c)$ 为载荷的哥氏力矢量和向心力矢量; $\mathbf{F}_0 = [\mathbf{f}_0^T, \mathbf{N}_0^T]^T \in \mathbf{R}^3$ 为末端执行器作用在刚性载荷上的合力和合力矩; \mathbf{G} 定义为抓取矩阵。由式(6)可得^[11]

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_g \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F}_m = \mathbf{G}^+ \mathbf{F}_0$ 为操作力, \mathbf{G}^+ 为 \mathbf{G} 的伪逆; \mathbf{F}_g 为抓取力, 操作力为末端执行器驱动载荷运动的驱动力; 抓取力为防止载荷相对于机械臂末端执行器滑动和破坏与末端执行器接触状态的末端执行器作用力。

刚性载荷的速度 $\dot{\mathbf{X}}_c = \mathbf{J}_b \dot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{J}_q \dot{\theta}$, 其中: $\mathbf{J}_b, \mathbf{J}_q$ 分别为载荷相对于本体的雅可比矩阵和相对于关节的雅可比矩阵^[12]。由式(4~7)和系统的动量守恒定律^[12]推导得

$$\ddot{\mathbf{Q}} = -\mathbf{N}_2^{-1}(\mathbf{N}_1 \ddot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{N}_3 \dot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{N}_4 \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{N}_5 \mathbf{Q}) \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{M}_2 \dot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{M}_3 \dot{\mathbf{Q}} + \mathbf{M}_4 \mathbf{Q} + \mathbf{M}_5 = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g \quad (9)$$

式中: $\mathbf{M}_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为整理后的以载荷姿态为变量的空间柔性机械臂系统的系数矩阵, 式(8)为柔性连杆的振动方程, 式(9)即为系统的动力学方程。

2 两尺度时标奇异摄动法分解

本文采用奇异摄动法^[13], 将柔性空间机械臂系统降阶分解为一个关于载荷轨迹跟踪的慢变时标子系统和一个描述柔性杆件振动的快变时标子系统。定义 $\varepsilon^2 = \lambda_{\min}^{-1}(\mathbf{K})$, \mathbf{K} 为机械臂系统的刚度矩阵, 引入新变量 $\varepsilon^2 \xi = \mathbf{Q}$, $\bar{\mathbf{K}} = \varepsilon^2 \mathbf{K}$, 代入式(8, 9)。令 $\varepsilon = 0$, 得到慢变子系统

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{g} = \mathbf{u}_r \quad (10)$$

式中: $\mathbf{u}_r = \mathbf{Z}(\tau_s - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g)$, τ_s 为慢变系统输入; $\mathbf{C}, \mathbf{g}, \mathbf{Z}$ 为整理后的系数矩阵。

引入快变时间尺度 $z = t/\varepsilon$, 令 $\varepsilon = 0$, 得到快变子系统

$$\frac{d^2 \tilde{\mathbf{Q}}}{dz^2} = \frac{\tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{Q}}}{\varepsilon^2} + \mathbf{u}_f \quad (11)$$

式中: $\mathbf{u}_f = \mathbf{f}_f + \mathbf{b}(\tau_f - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g)$, 其中 \mathbf{f}_f, \mathbf{b} 为整理后的系数矩阵, τ_f 为慢变系统输入; 变量上加“~”表示快变分量。

3 组合控制器设计

由于系统使用两种时间尺度分解, 可以分别对

子系统进行控制器设计。

3.1 载荷轨迹跟踪的模糊终端滑模控制

本文采用快速终端滑模控制来实现载荷轨迹的跟踪控制。慢变子系统(10)改写为

$$\ddot{\mathbf{X}}_c = \mathbf{f} + \mathbf{u}_s + \mathbf{d}_s \quad (12)$$

式中: $\mathbf{f} = -\mathbf{M}_1^{-1}(\mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}_c + \mathbf{g})$; $\mathbf{u}_s = \mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{u}_r$; $\mathbf{d}_s = 0.02 \sin(2t)[1, 1, 1]^T$ 为外界扰动, 假设 $\mathbf{f} = \hat{\mathbf{f}} + \Delta \mathbf{f}$, 其中 $\hat{\mathbf{f}}$ 为 \mathbf{f} 的估计, $\Delta \mathbf{f}$ 为模型不确定性。 \mathbf{F} 为 $\Delta \mathbf{f}$ 的上界, $|\Delta \mathbf{f}| \leq \mathbf{F}$ 。

定义误差向量 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{X}_c^d(t) - \mathbf{X}_c(t)$, 其中 $\mathbf{X}_c^d(t)$ 为期望轨迹, 选取快速滑模面: $\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e}^{q/p} = 0$, 其中: $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)^T$, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, $\lambda_i > 0 (i=1, 2, 3)$ 为常数, $p > q$ 为正奇数。则有

$$\dot{\mathbf{s}} = \ddot{\mathbf{e}} + \Lambda (q/p) \mathbf{e}^{q/p-1} \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f} + \mathbf{u}_s + \mathbf{d}_s - \ddot{\mathbf{X}}_c^d + \Lambda (q/p) \mathbf{e}^{q/p-1} \dot{\mathbf{e}} \quad (13)$$

选取控制律

$$\mathbf{u}_s = -\hat{\mathbf{f}} + \ddot{\mathbf{X}}_c^d - \Lambda (q/p) \mathbf{e}^{q/p-1} \dot{\mathbf{e}} - \mathbf{K}_v \cdot \text{sgn}(\mathbf{s}) \quad (14)$$

式中: $\text{sgn}(\mathbf{s})$ 为符号函数, \mathbf{K}_v 为正定对角常数, 且 $\mathbf{K}_v \geq \mathbf{F}$ 。

把式(14)写为

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{\text{eq}} + \mathbf{u}_{\text{sw}} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{u}_{\text{eq}} = -\hat{\mathbf{f}} + \ddot{\mathbf{X}}_c^d - \Lambda (q/p) \mathbf{e}^{q/p-1} \dot{\mathbf{e}}$ 为等效控制, $\mathbf{u}_{\text{sw}} = -\mathbf{K}_v \cdot \text{sgn}(\mathbf{s})$ 为切换控制。

令

$$\mathbf{u}_{\text{sw}} = -\mathbf{K}_v \cdot \text{sgn}(\mathbf{s}) = \mathbf{K}_v \cdot \Delta \mathbf{u} \quad (16)$$

式中 $\Delta \mathbf{u} = -\text{sgn}(\mathbf{s})$ 。

设计一个式(16)的模糊变换器, 选取 \mathbf{s} 为模糊输入, $\Delta \mathbf{u}$ 为输出。假设输入 \mathbf{s} 和输出 $\Delta \mathbf{u}$ 的模糊集分别为: $\{\underline{A}_i\}$ 和 $\{\underline{B}_i\}$ ($i = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$), \underline{A}_i 和 \underline{B}_i 对应的模糊语言变量分别为 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB。模糊集 \underline{A}_i 和 \underline{B}_i 的隶属函数分别采用三角形和单点形, 模糊规则: R_i : 若 \mathbf{s} 为 \underline{A}_i , 则 $\Delta \mathbf{u}$ 为 \underline{B}_i ($i = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$)。采用非模糊化决策方法, 可计算出模糊变换器的输出量

$$\mathbf{u}_{\text{sw}} = \mathbf{K}_v \cdot \Delta \mathbf{u} = \mathbf{K}_v \cdot \text{diag} \left(\frac{\sum_{i=-3}^3 \mu_{\underline{A}_i}(-i)}{\sum_{i=-3}^3 \mu_{\underline{A}_i}} \right) \quad (17)$$

式中: $\mu_{\underline{A}_i}$ 为第 i 条规则输入的隶属度; $(-i)$ 为第 i 条规则输出 $\Delta \mathbf{u}$ 的离散值。

3.2 快变子系统的 Backstepping 控制

本文通过两步递归设计快系统的 Lyapunov 能

量函数^[14],构造Backstepping抑振控制律。为讨论方便,略去变量的上标“~”,令 $\mathbf{x}_1=\mathbf{Q}, \mathbf{x}_2=\dot{\mathbf{Q}}$,则式(11)等价于

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2 \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_2 = \frac{A}{\hat{\epsilon}^2} \mathbf{x}_1 + \mathbf{u}_f + \mathbf{d}_f \quad (19)$$

式中: $\mathbf{d}_f=0.0001\sin(2t)[1,1,1,1,1,1]^T$ 为外界扰动项。

假设 x_2 为系统 $\dot{x}_1=x_2$ 的虚拟输入,选取 $x_2=\varphi_0(x_1)=-x_1$,Lyapunov函数 $v_0=0.5x_1^2$,则 $\dot{v}_0=-x_1^2$,即可保证在状态反馈 φ_0 作用下,系统渐近稳定到原点。

选取 $v_1=v_0+\frac{1}{2}(x_2-\varphi_0)^2=x_1^2+x_1x_2+\frac{1}{2}x_2^2$ 可得

$$\mathbf{u}_f = \varphi_1(x_1, x_2) = \frac{\partial \varphi_0}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial v_0}{\partial x_1} - k_1(x_2 - \varphi_0) - \frac{\hat{A}}{\hat{\epsilon}^2} x_1 = - (k_1 + 1)(x_1 + x_2) - \frac{\hat{A}}{\hat{\epsilon}^2} x_1 \quad (20)$$

式中: $k_1>0$ 为常数; $\frac{\hat{A}}{\hat{\epsilon}^2}$ 为 $\frac{A}{\epsilon^2}$ 的估计值。由式(11)和式(20)得,快变子系统控制律为

$$\tau_f = b^{-1}(\mathbf{u}_f - \mathbf{f}_f) + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g \quad (21)$$

3.3 抓取力控制

令 $\mathbf{e}_g = \mathbf{F}_g^d - \mathbf{F}_g$ 为抓取力误差, \mathbf{F}_g^d 为给定抓取力,抓取力采用积分控制

$$\tau_g = \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g = \mathbf{J}^T \left(\mathbf{F}_g^d + K_f \int \mathbf{e}_g dt \right) \quad (22)$$

对慢变子系统设计慢变控制律 $\tau_s = Z^{-1} \mathbf{M}_1 \mathbf{u}_s + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_g$,对快变子系统设计快变控制律 $\tau_f = b^{-1}(\mathbf{u}_f - \mathbf{f}_f) + \tau_g$,则可以同时保证刚性、柔性状态输出达到控制要求。

4 仿真分析

针对自由浮动空间柔性机械臂,进行了数值仿真。仿真要求机械臂抓持载荷按期望的轨迹运动,同时机械臂柔性振动得到抑制。仿真时间取10s,系统参数如下: $m_b=3000\text{ kg}, m_c=40\text{ kg}, m_1=2\text{ kg}, m_2=2\text{ kg}, m_3=2\text{ kg}; L_b=1.5\text{ m}, L_c=0.5\text{ m}, L_1=L_2=L_3=2\text{ m}, EI=200\text{ N}\cdot\text{m}^2, I_b=1000\text{ kg}\cdot\text{m}^2, I_c=15\text{ kg}\cdot\text{m}^2, I_1=I_2=I_3=1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。本体的初始位姿为 $X_b=(1.5, 0, 0)$,给定抓取力 $\mathbf{F}_g^d=(10, 0, 0)^T$ 。模型误差取 $\Delta f=0.1f$,即 $\hat{f}=0.9f$,

$\frac{\hat{A}}{\hat{\epsilon}^2}=0.9\frac{A}{\epsilon^2}$ 。载荷期望的运动轨迹为

$$\begin{cases} x_c^d(t) = 1.5 + 0.1\cos(2t) \\ y_c^d(t) = 1.7321 + 0.1\cos(2t) \\ \theta_c^d(t) = 0.1\cos(2t) \end{cases}$$

选取: $K_f=2\mathbf{E}_3, \Lambda=3\mathbf{E}_3, p=5, q=3, k_1=3, K_v=5$ 。

采用上述的组合控制方法,仿真实验结果如图2,3所示。

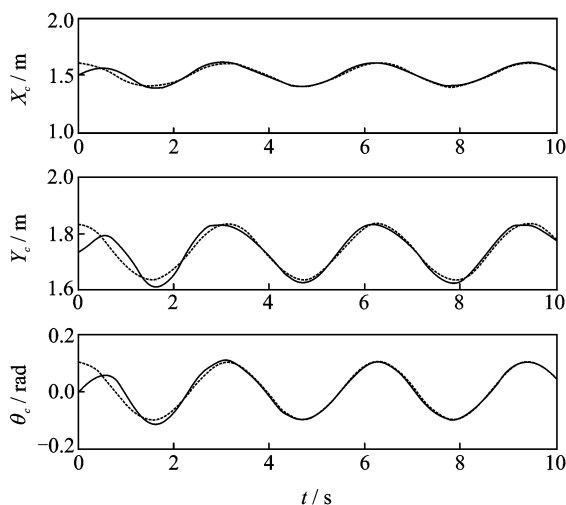


图2 载荷的期望轨迹(虚线)和实际轨迹(实线)(PD控制)

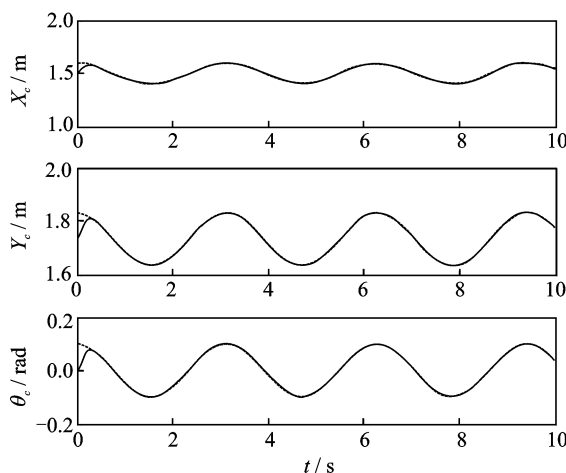


图3 载荷的期望轨迹(虚线)和实际轨迹(实线)(模糊终端滑模控制)

从图2,3中的曲线对比中可以看出,模糊终端滑模控制相对于PD控制,滑模面平滑且快速收敛到平衡状态,有效消除了切换面上的抖振现象,轨迹跟踪误差快速平稳地收敛到零,载荷快速跟踪上期望轨迹,系统的暂态性能良好,表明了本文使用的模糊快速终端滑模控制方法可以很好地实现

机械臂对刚性载荷的有效在轨操作。

图4为抓取力变化曲线,积分控制可以保证抓取力的准确控制,实现机械臂末端执行器对刚性载荷的有效抓取。

图5~7分别为柔性连杆 L_1, L_2, L_3 的模态坐标变化曲线,时间 $t < 3$ s时,柔性振动未加控制, $3 \leq t < 10$ s时,加入抑振控制。

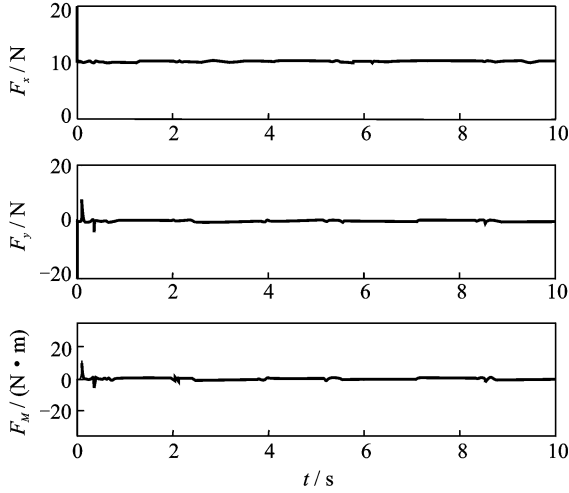


图4 抓取力变化曲线

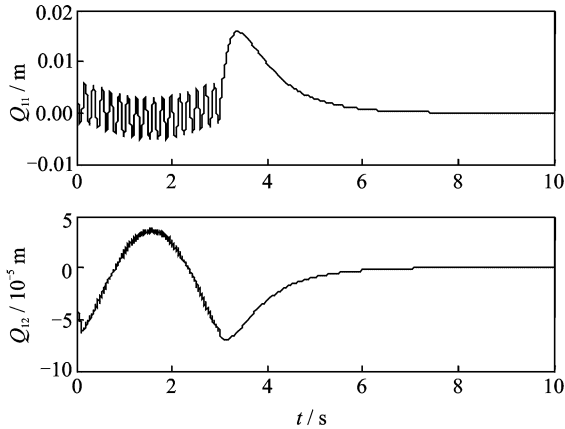


图5 柔性连杆 L_1 的模态坐标变化曲线

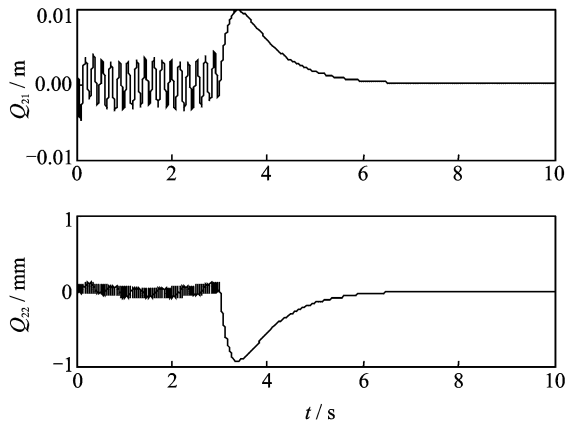


图6 柔性连杆 L_2 的模态坐标变化曲线

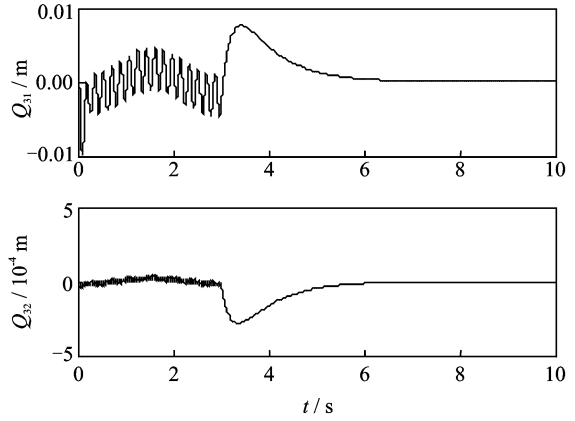


图7 柔性连杆 L_3 的模态坐标变化曲线

$t \leq 10$ s时,加入抑振控制。从曲线变化中可以看出未加控制时连杆模态坐标发散,加入Backstepping控制后,模态坐标在有限时间内收敛到零,表明了Backstepping控制可以有效抑制柔性振动。

5 结束语

本文针对自由浮动空间柔性机械臂在轨操作刚性载荷的动力学控制问题,基于假设模态法、拉格朗日方程和动量守恒定律,推导了系统的动力学模型,然后用奇异摄动方法将系统分离为慢变和快变两种尺度时标的子系统,针对空间机器人系统中存在不确定性和外界扰动,慢变子系统使用模糊终端滑模控制来实现有效载荷的轨迹跟踪,快变子系统采用Backstepping控制来实现对柔性杆振动的有效抑制。通过与未加模糊控制的终端滑模控制和前3 s不对柔性振动实施控制的仿真实验进行比较,结果表明,本文提出的模糊终端滑模控制和Backstepping控制的组合控制算法可以同时达到机械臂对刚性载荷的在轨操作和柔性机械臂振动抑制的目的,实现了对整个系统的快速有效控制。

参考文献:

- [1] Murad Shibli. Unified modeling approach of kinematics, dynamics and control of a free-flying space robot interacting with a target[J]. Intelligent Control and Automation, 2011,2(2):8-23.
- [2] Kazuya Yoshida, Dimitar Dimitrov, Hiroki Nakanishi. On the capture of tumbling satellite by a space robot[C]//Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: [s. n.],2006:4127-4132.
- [3] Tomohisa Oki, Hiroki Nakanishi, Kazuya Yoshida.

- Whole-body motion control for capturing a tumbling, target by a free-floating space robot[C]//Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, USA: [s. n.], 2007:2256-2261.
- [4] Ioannis Rekleitis, Eric Martin. Autonomous capture of a tumbling satellite [J]. Journal of Field, Robotics, Special Issue on Space Robotics, 2007, 24(4):275-296.
- [5] Dimitrios Tzeranis, Yoshiyuki Ishijima, Steven Dubowsky. Manipulator of large flexible structural modules by space robots mounted on flexible structures[C]//The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in space Munich. Germany: [s. n.], 2005:670-675.
- [6] Ebrahimi A, Moosavian S A A. Dynamics of space free-flying robots with flexible pendages[J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2008, 4(4): 29-36.
- [7] Itsuhiro Yamano, Jin soo Kim. Cooperative control of 3D dual-flexible-arm robot[J]. Journal of Intelligent and Robotics systems, 2004, 39(1):1-15.
- [8] Sanz A, Etxebarria V. Experimental control of a two-DOF flexible robot manipulator by optimal and sliding methods[J]. Intelligent Robot System, 2006(46):95-100.
- [9] Yoshisada Murotsu, Showzow Tsujio, Kei Senda, et al. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot[J]. IEEE Control Systems, 1992, 12(3):51-57.
- [10] 梁捷, 陈力. 柔性空间机械臂系统的双环积分滑模控制[J]. 中国机械工程, 2011, 22(16):1906-1912.
Liang Jie, Chen Li. Dual-loop integral sliding mode control for flexible space manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(16):1906-1912.
- [11] Kiyoshi Nagai, Tsuneo Yoshikawa. Adaptive grasping by multifingered hands [J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 1993, 11(1):119-126.
- [12] 朱雷, 王从庆. 自由浮动冗余度空间机器人的姿态稳定控制[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(5):575-578.
Zhu Lei, Wang Congqing. Attitude stabilization control of a redundant free-floating space robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(5):575-578.
- [13] Siciliano B, Book W J. A singular perturbation approach to control of lightweight flexible manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1988, 7(4):79-90.
- [14] Khalil H K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.