

1-3-2019

Gradient Descent Self-tuning Control of Flexible Space Manipulator After Capturing Operation

Cheng Jing

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; ;2. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China;

Chen Li

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; ;2. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Gradient Descent Self-tuning Control of Flexible Space Manipulator After Capturing Operation

Abstract

Abstract: The flexible vibration is generated after *all-flexible space manipulator capturing a satellite*, and the collision leads to unsteadiness of system. For the unstable composite system, *the self-turning control algorithm based on hybrid trajectory* is designed in this paper. The theory of gradient descent is used for parameter adaptive rate design to realize the real time adjustment of the PID control parameters. A supervised controller is designed through Lyapunov function to generate the stability and H_∞ tracking characteristic of the system. The hybrid trajectory is generated based on the concept of virtual force, which is used to accomplish *integrated control* of joint movement and vibration abatement. At last, the effectiveness of the proposed control scheme is demonstrated through numerical simulation.

Keywords

all-flexible space manipulator, capturing operation, hybrid trajectory, self-turning PID control

Recommended Citation

Cheng Jing, Chen Li. Gradient Descent Self-tuning Control of Flexible Space Manipulator After Capturing Operation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1869-1876.

柔性空间机械臂捕获卫星后梯度下降自校正控制

程靖^{1,2}, 陈力^{1,2}

(1. 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116; 2. 福建省高端装备制造协同创新中心, 福建 福州 350116)

摘要: 全柔性空间机械臂捕获卫星后会产生柔性振动, 同时导致系统处于不稳定状态。本文针对不稳定的混合体系统, 提出了基于混合轨迹的自校正控制算法, 以完成镇定运动控制。该方案利用梯度下降法思想, 设计了参数的自适应律, 实时调节PID控制器控制参数。根据李雅普诺夫函数, 设计了监督控制器以保证控制系统的稳定性, 使其具有 H_∞ 跟踪特性。之后, 基于虚拟力概念生成混合轨迹, 用于实现关节运动及柔性振动抑制的一体化控制。最后, 通过数值仿真实验证明了上述控制方案的有效性。

关键词: 全柔性空间机械臂; 捕获操作; 混合轨迹; 自校正PID控制

中图分类号: TP241

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1869-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805032

Gradient Descent Self-tuning Control of Flexible Space Manipulator After Capturing Operation

Cheng Jing^{1,2}, Chen Li^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2. Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China)

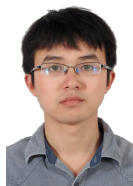
Abstract: The flexible vibration is generated after *all-flexible space manipulator capturing a satellite*, and the collision leads to unsteadiness of system. For the unstable composite system, *the self-turning control algorithm based on hybrid trajectory* is designed in this paper. The theory of gradient descent is used for parameter adaptive rate design to realize the real time adjustment of the PID control parameters. A supervised controller is designed through Lyapunov function to generate the stability and H_∞ tracking characteristic of the system. The hybrid trajectory is generated based on the concept of virtual force, which is used to accomplish *integrated control* of joint movement and vibration abatement. At last, the effectiveness of the proposed control scheme is demonstrated through numerical simulation.

Keywords: all-flexible space manipulator; capturing operation; hybrid trajectory; self-turning PID control

引言

近年来, 随着航天科技的发展, 空间机械臂的

应用受到了国内外研究机构的广泛重视^[1-5]。空间机械臂系统在太空中可用于接收补给舱, 空间站舱段组装, 抓取失效卫星等, 与其他在轨服务系统相比具有明显优势。在太空失重环境下, 空间机械臂与漂浮基座存在强耦合作用, 使得地面成熟控制方案难以直接应用。在执行太空任务的过程中, 捕获操作是其重要环节。目前空间机械臂系统是朝着轻质量、大柔性及大负载的方向发展^[6], 在运动过



收稿日期: 2016-07-05 修回日期: 2016-08-30;
基金项目: 国家自然科学基金(11372073, 11072061), 福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台(2014H21010011);
作者简介: 程靖(1989-), 男, 江西赣州, 博士生, 研究方向为空间机器人系统动力学与控制; 陈力(1961-), 男, 江西九江, 博士, 教授, 博导, 研究方向为空间机器人动力学与控制、多体系统动力学。

<http://www.china-simulation.com>

• 1869 •

程中产生的柔性振动不可忽略。完成捕获操作后的空间机械臂系统,不仅存在运动状态的不稳定,而且柔性臂杆会产生柔性振动,这对空间仪器设备是不利的。因此,提出能够抑制柔性振动并使系统恢复稳定状态的控制方案是非常必要的。

在控制方案的设计过程中,如果系统存在参数不确定情况,将会很大程度影响系统的轨迹跟踪控制精度。Senda等^[7]针对漂浮基空间机器人系统抓持未知载荷情况,提出了一种自适应控制方案。黄攀峰等^[8]利用最小二乘法,提出了基于机械臂运动的组合航天器惯性参数的在轨辨识方法,辨识任务包括质量、质心和惯性张量。洪在地等^[9]针对刚柔耦合空间机器人系统,运用非线性解耦反馈控制理论实现了机械臂末端轨迹跟踪控制。王从庆等^[10]建立了刚柔耦合空间机器人基于最小关节力矩优化的混沌动力学方程,并设计了末端轨迹跟踪的鲁棒PD补偿控制。洪昭斌等^[11]利用奇异摄动法将刚柔耦合空间机器人系统动力学方程分解后,再进行抑振控制算法的设计,这样增加了控制算法的复杂度。上述研究中不涉及捕获碰撞过程,捕获操作过程不仅存在动量动量矩的交换,同时会导致柔性臂的颤振,使得控制设计更加困难。Papadopoulos和Paraskevas^[12]研究了捕获过程中不同的碰撞点对冲击效应的影响,找出了减小碰撞冲击对关节及基座影响的抓取方案,而没有考虑碰撞后系统需要进行稳定控制的问题。孙汉旭等^[13]分析了刚性空间机器人的碰撞运动。Dimitar和Kazuya^[14]利用偏置动量法,提出了对碰撞结束后的联合体系统的控制方案,使系统恢复稳定,但是需要获得精确的系统参数为基础。

为克服上述难点,文中基于欧拉-伯努利梁假设,建立了柔性空间机械臂系统的动力学模型。基于碰撞理论,分析了空间机械臂系统受到冲击后的碰撞响应。卫星与空间机器人系统在捕获操作后形成的混合体系统处于不稳定的状态,并且柔性臂的高频振动不可忽略。因此,基于表征载体姿态、关节运动及柔性振动的混合轨迹,设计了自校正控制

方案。该方案由主控制器及监督控制器组成,基于梯度下降法设计了主控制器的参数自适应率,同时监督控制器保证了 H_∞ 轨迹跟踪性能。该方案避免了传统奇异摄动方法需要对动力学方程在不同时间尺度下进行分解,而且结构简单,计算量小,易于实现。最后,通过数值仿真分析,验证了所提控制方案的有效性。

1 接触碰撞后混合体系统动力学模型

考虑平面结构的全柔性空间机械臂系统及目标卫星系统如图1所示。空间机械臂系统由漂浮载体,柔性上臂及柔性前臂组成,各部分通过转动铰连接。以任意位置 O 为原点,建立惯性坐标系 XOY 。设上臂及前臂为均质杆,长度为 l_i ,密度为 ρ_i ,抗弯刚度为 EI_i ($i=1,2$)。载体质量为 m_0 ,转动惯量为 I_0 , l_0 为 O_0 、 O_1 连线的长度。负载质心为 O_r ,质量为 m_r ,转动惯量为 I_r , O_r 到捕获接触点的距离为 d_r 。

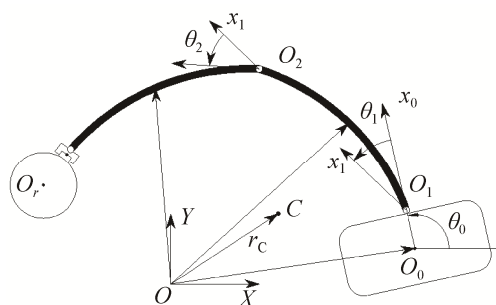


图1 自由漂浮空间机器人系统及目标系统
Fig. 1 Space robot system and target system

根据欧拉-伯努利梁假设,柔性上臂及柔性前臂在 t 时刻的弯曲振动量可利用假设模态法表示为:

$$v_i = \sum_{j=1}^2 \psi_{ij} \phi_j \quad (1)$$

式中: ψ_{ij} ($i=1,2$)分别为上臂及前臂的第 j ($j=1,2$)阶模态坐标; ϕ_j 为模态函数。

忽略微弱重力梯度的影响,并利用拉格朗日第二类方程,可以获得捕获操作前柔性空间机器人系

统载体位置不受控, 姿态受控的动力学方程为:

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + Kq = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ \tau \\ 0_{4 \times 1} \end{bmatrix} + J^T F \quad (2)$$

式中: $q = [q_b^T \quad q_\theta^T \quad q_\psi^T]^T$ 为柔性空间机器人系统的广义坐标向量, $q_b = [x_0 \quad y_0]^T$, $q_\theta = [\theta_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T$, $q_\psi = [\psi_{11} \quad \psi_{12} \quad \psi_{21} \quad \psi_{22}]^T$ 为柔性杆模态坐标向量。 $M \in \mathbf{R}^{9 \times 9}$ 为柔性空间机器人系统对称、正定的惯量矩阵, $Hq \in \mathbf{R}^{9 \times 1}$ 表示为科氏力、离心力的列矢量。 $\tau \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为载体姿态及关节铰输入力矩。 $J \in \mathbf{R}^{3 \times 9}$ 为末端执行器的运动雅各比矩阵。刚度矩阵 $K = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_\psi \end{bmatrix}$, $K_\psi = \text{diag}(K_{11} \quad K_{12} \quad K_{21} \quad K_{22})$ 。 $F \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 为机械臂末端执行器受到的冲击力。

将被捕获目标卫星视作刚体, 采用牛顿-欧拉法可获得其动力学方程为:

$$M_r \ddot{q}_r = J_r^T F' \quad (3)$$

式中: $q_r = [x_r \quad y_r \quad \theta_r]^T$ 为目标质心的位置坐标及姿态角列向量, $M_r \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是被捕获目标卫星对称、正定的惯性矩阵, J_r 为接触点对应的运动雅各比矩阵。 F' 为目标上接触点受到的反作用力。

捕获操作过程中, 接触点间产生相互作用力, 根据力传递关系, 并联立式(2)及式(3)得:

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + Kq = \tau_M - J^T (J_r^T)^{-1} M_r \ddot{q}_r \quad (4)$$

式中: $\tau_M = [0_{1 \times 2} \quad \tau^T \quad 0_{4 \times 1}]^T$ 。

在短暂的接触碰撞过程中, 假设系统广义坐标不变, 广义速度及广义加速度发生突变, 并且在接触持续时间内系统不开启控制, 根据冲量定理^[15], 对上式积分并整理后可以得到:

$$M[\dot{q}(t_0 + \Delta t) - \dot{q}(t_0)] + J^T (J_r^T)^{-1} M_r (\dot{q}_r(t_0 + \Delta t) - \dot{q}_r(t_0)) = 0 \quad (5)$$

$\Delta t \rightarrow 0$ 为碰撞持续时间。捕获操作结束后, 根据接触点的运动关系可以获得如下关系式:

$$J\dot{q} = J_r \dot{q}_r \quad (6)$$

由式(5)及式(6)可解得系统捕获操作结束后的广义速度值:

$$\dot{q}(t_0 + \Delta t) = L^{-1} [M\dot{q}(t_0) + J^T (J_r^T)^{-1} M_r \dot{q}_r(t_0)] \quad (7)$$

式中: $L = M + J^T (J_r^T)^{-1} M_r (J_r^T)^{-1} J$ 。通过上述推导可获得接触碰撞后混合体系统的瞬时运动状态。

为获得捕获操作后混合体系统动力模型, 将式(6)对时间求导, 移项并整理得:

$$\ddot{q}_r = J_r^{-1} J \ddot{q} + J_r^{-1} (\dot{J} - \dot{J}_r J_r^{-1} J) \dot{q} \quad (8)$$

将式(6)、式(8)代入式(4)可以得到:

$$M_c \ddot{q} + H_c \dot{q} + Kq = \tau_M \quad (9)$$

式中:

$$M_c = M + J^T (J_r^T)^{-1} M_r J_r^{-1} J, \\ H_c = H + J^T (J_r^T)^{-1} M_r J_r^{-1} (\dot{J} - \dot{J}_r J_r^{-1} J)。$$

2 基于混合轨迹的自校正控制设计

由(9)式的前两行元素解出 \ddot{q}_b , 并代入下部, 得到如下形式的动力学方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{11} & \bar{M}_{12} \\ \bar{M}_{21} & \bar{M}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_\theta \\ \ddot{q}_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{H}_{11} & \bar{H}_{12} \\ \bar{H}_{21} & \bar{H}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_\theta \\ \dot{q}_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ 0_{4 \times 3} & K_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_\theta \\ q_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0_{4 \times 1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

上述分块形式的动力学方程中: $\bar{M}_{11}, \bar{H}_{11} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, $\bar{M}_{12}, \bar{M}_{21}^T, \bar{H}_{12}, \bar{H}_{21}^T \in \mathbf{R}^{3 \times 4}$, $\bar{M}_{22}, \bar{H}_{22}, K_\psi \in \mathbf{R}^{4 \times 4}$ 。

为了进行关节运动控制设计, 式(10)下部可写为如下形式:

$$\bar{M}_{21} \ddot{q}_\theta + \bar{M}_{22} \ddot{q}_\psi + \bar{H}_{21} \dot{q}_\theta + \bar{H}_{22} \dot{q}_\psi + K_\psi q_\psi = 0 \quad (11)$$

从上式中解出 \ddot{q}_ψ 并代入式(10)上部可得:

$$\bar{M}_{11} \ddot{q}_\theta - \bar{M}_{12} \bar{M}_{22}^{-1} (\bar{M}_{21} \ddot{q}_\theta + \bar{H}_{21} \dot{q}_\theta + \bar{H}_{22} \dot{q}_\psi + K_\psi q_\psi) + \bar{H}_{11} \dot{q}_\theta + \bar{H}_{12} \dot{q}_\psi = \tau \quad (12)$$

上式可简写为:

$$\bar{M}_\theta \ddot{q}_\theta + \bar{N}_\theta = \tau \quad (13)$$

式中: $\bar{M}_\theta = \bar{M}_{11} - \bar{M}_{12} \bar{M}_{22}^{-1} \bar{M}_{21}$, \bar{M}_θ 是对称、正定、有界矩阵, 并且有 \bar{M}_θ^{-1} 存在。

$$\bar{N}_\theta = -\bar{M}_{12} \bar{M}_{22}^{-1} (\bar{H}_{21} \dot{q}_\theta + \bar{H}_{22} \dot{q}_\psi + K_\psi q_\psi) + \bar{H}_{11} \dot{q}_\theta + \bar{H}_{12} \dot{q}_\psi$$

定义系统的跟踪误差为:

$$e = q_\theta - q_d \quad (14)$$

式中： q_d 为载体姿态及关节角的终端期望轨迹。

设计如下基于模型的理想控制输入为：

$$\bar{\tau} = \bar{M}_\theta(\ddot{q}_d + \kappa_1 \dot{e} + \kappa_2 e) + \bar{N}_\theta \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)中得到如下闭环系统：

$$\ddot{e} + \kappa_1 \dot{e} + \kappa_2 e = 0 \quad (16)$$

适当选取 κ_1 、 κ_2 即可保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ 。

由于实际的空间机器人系统参数难以精确获得，因此不可避免存在模型误差。式(13)可表示为：

$$\hat{M}_\theta \ddot{q}_\theta + \hat{N}_\theta = \tau + \xi \quad (17)$$

式中： $\xi = -\Delta \bar{M}_\theta \ddot{q}_\theta - \Delta \bar{N}_\theta$ ， $\hat{M}_\theta = \bar{M}_\theta - \Delta \bar{M}_\theta$ ， $\hat{N}_\theta = \bar{N}_\theta - \Delta \bar{N}_\theta$ ， \hat{M}_θ 、 \hat{N}_θ 称为系统名义模型， $\Delta \bar{M}_\theta$ 、 $\Delta \bar{N}_\theta$ 为模型误差。

为了能够控制存在参数不确定的控制机器人系统，提出如下具有 H_∞ 跟踪特性的自适应PID控制方案为：

$$\tau = \tau_a + \tau_\infty \quad (18)$$

自适应PID控制器部分设计如下：

$$\tau_a = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{d}{dt} e \quad (19)$$

式中：

$$K_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2}, K_{p3})、K_i = \text{diag}(K_{i1}, K_{i2}, K_{i3})、K_d = \text{diag}(K_{d1}, K_{d2}, K_{d3})$$

是正定的对角增益矩阵。

根据变结构控制理论，定义如下形式的滑模面：

$$s(t) = \lambda_2 \int_0^t e dt + \lambda_1 e + \dot{e} \quad (20)$$

式中： $\lambda_1 = \text{diag}(\lambda_{1j}, \lambda_{1j}, \lambda_{1j})$ 、 $\lambda_2 = \text{diag}(\lambda_{2j}, \lambda_{2j}, \lambda_{2j})$ 。分别为对角增益矩阵，且 λ_2 、 λ_1 、 $I_{3 \times 3}$ 对角线对应元素为Hurwitz多项式的系数。为了保证系统在有限时间内到达滑模面并稳定，即 $s(t) = 0$ ，根据李雅普诺夫函数稳定性理论可得如下可达性条件：

$$s^T(t) \hat{M}_\theta s(t) < 0 \quad (21)$$

式(21)即保证了 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$ 。因此，自适应控制器参数的调节应使 $s^T(t) \hat{M}_\theta s(t)$ 尽量小，以获得更快的收敛速度，减小误差。

定义目标函数为 $s^T(t) \hat{M}_\theta s(t)$ 。联立式(17)及式

(20)可得：

$$\dot{s}(t) = \lambda_2 e + \lambda_1 \dot{e} + \ddot{q}_d - \hat{M}_\theta^{-1}(\tau - \hat{N}_\theta + \xi) \quad (22)$$

根据式(18)及式(22)可将目标函数重写为：

$$s^T(t) \hat{M}_\theta s(t) = -s^T(\tau_a + \tau_\infty) + s^T \hat{M}_\theta (\lambda_2 e + \lambda_1 \dot{e} + \ddot{q}_d) + s^T(\hat{N}_\theta - \xi) \quad (23)$$

利用梯度下降法思想^[16-17]，可得自适应控制器部分控制参数自适应率为：

$$\begin{aligned} \dot{K}_{pj} &= -\mu_p \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial K_{pj}} = \\ & -\mu_p \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial \tau_a} \frac{\partial \tau_a}{\partial K_{pj}} = \mu_p s_j(t) e_j(t) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{ij} &= -\mu_i \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial K_{ij}} = \\ & -\mu_i \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial \tau_a} \frac{\partial \tau_a}{\partial K_{ij}} = \mu_i s_j(t) \int_0^t e_j(t) dt \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{dj} &= -\mu_d \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial K_{dj}} = -\mu_d \frac{\partial s^T \hat{M}_\theta s}{\partial \tau_a} \frac{\partial \tau_a}{\partial K_{dj}} = \\ & \mu_d s_j(t) \frac{d}{dt} e_j(t), \quad (j=1,2,3) \end{aligned} \quad (26)$$

式中： μ_p 、 μ_i 、 μ_d 是学习率。

上述自校正控制方案设计中未考虑系统的稳定性，为了保证系统的稳定性及较好的跟踪性能，设计如下监督控制部分。

自适应控制器与理想控制器之间的误差表示为：

$$\Delta \tau = \bar{\tau} - \tau_a \quad (27)$$

设计如下监督控制部分：

$$\tau_\infty = (2A^2)^{-1}(A + I_{3 \times 3})s(t) \quad (28)$$

式中： $A = \text{diag}(\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3)$ 为正定对角矩阵。

采用上述控制器式(18)可以获得 H_∞ 跟踪性能，证明如下。

定义李雅普诺夫函数为：

$$V = \frac{1}{2} s^T(t) s(t) \quad (29)$$

式(29)对时间求导得：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T(t)\dot{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{s}^T(t)(\lambda_2 \mathbf{e} + \lambda_1 \dot{\mathbf{e}} + \ddot{\mathbf{e}}) = \mathbf{s}^T(t)\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1}[\bar{\boldsymbol{\tau}} - \boldsymbol{\tau}_a - \boldsymbol{\tau}_\infty] = \mathbf{s}^T(t)\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1}[\Delta\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_\infty] = \mathbf{s}^T(t)\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1}[\Delta\boldsymbol{\tau} - (2\mathbf{A}^2)^{-1}(\mathbf{A} + \mathbf{I})\mathbf{s}(t)] \leq \\ & \lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1})[\mathbf{s}^T(t)\Delta\boldsymbol{\tau} - \mathbf{s}^T(t)(2\mathbf{A}^2)^{-1}(\mathbf{A} + \mathbf{I})\mathbf{s}(t)] = \lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1})\sum_{i=1}^3[s_i(t)\Delta\tau_i - s_i^2(t)\frac{2\Lambda_i^2}{\Lambda_i^2 + 1}] = \\ & \lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1})\sum_{i=1}^3[\frac{\Lambda_i^2\Delta\tau_i^2}{2} - \frac{s_i^2(t)}{2} - \frac{1}{2}(\frac{s_i^2(t)}{\Lambda_i^2} - \Lambda_i(t)\Delta\tau_i)^2] \leq \lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1})\sum_{i=1}^3[\frac{\Lambda_i^2(t)\Delta\tau_i^2}{2} - \frac{s_i^2(t)}{2}] \end{aligned} \quad (30)$$

将式(30)沿区间[0,T]积分

$$\begin{aligned} V(T) - V(0) &\leq \lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1}) \\ & \sum_{i=1}^3[\frac{\Lambda_i^2(t)}{2}\int_0^T \Delta\tau_i^2(t)dt - \frac{1}{2}\int_0^T s_i^2(t)dt] \end{aligned} \quad (31)$$

由式(29)可知

$$V(0) = \frac{1}{2}\mathbf{s}^T(0)\mathbf{s}(0), \text{ 且 } V(T) > 0 \quad (32)$$

可得:

$$\sum_{i=1}^3\int_0^T s_i^2(t)dt \leq \frac{\sum_{i=1}^3 s_i^2(0)}{\lambda_{\max}(\hat{\mathbf{M}}_\theta^{-1})} + \sum_{i=1}^3 \Lambda_i^2(t)\int_0^T \Delta\tau_i^2(t)dt \quad (33)$$

即采用上述自适应控制及监督控制组合而成的自校正控制方案, 并利用式(24)~(26)的自适应率调节控制参数, 可保证系统获得期望 H_∞ 跟踪性能^[18]。

如果系统的初始条件为 $\mathbf{s}(0) = 0$, 则式(33)可表示为:

$$\sup_{\Delta\tau_i \in L_2(0,T)} \frac{\|s_i(t)\|}{\|\Delta\tau_i\|} \leq \Lambda_i \quad (34)$$

式中: Λ_i 表示控制性能指标, Λ_i 越小, 则系统具有越好的跟踪性能。

然而上述控制方案仅能完成载体姿态及关节运动镇定控制, 无法完成对柔性杆的振动抑制。因此, 下面我们设计可以表征载体姿态, 关节运动及柔性振动的混合轨迹, 用于完成载体姿态、关节运动控制及柔性振动抑制的一体化控制方案。

定义能同时表征系统刚性运动和柔性振动的混合轨迹为 \mathbf{q}_h , 混合轨迹与期望轨迹之间的误差为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_h = \mathbf{q}_h - \mathbf{q}_d. \text{ 通过如下二阶指令产生器生成 } \mathbf{e}_h: \\ \ddot{\mathbf{e}}_h + \mathbf{a}\dot{\mathbf{e}}_h + \mathbf{b}\mathbf{e}_h = \mathbf{F}_h \end{aligned} \quad (35)$$

式中: \mathbf{a} 、 \mathbf{b} 是正定对称常值矩阵, \mathbf{F}_h 为虚拟控制力。

则控制方案式(18)可修改为:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_r + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}_r dt + \mathbf{K}_d \frac{d}{dt} \mathbf{e}_r + \\ (2\mathbf{A}^2)^{-1}(\mathbf{A} + \mathbf{I}_{3 \times 3})\mathbf{s}_r(t) \end{aligned} \quad (36)$$

式中: $\mathbf{e}_r = \mathbf{q}_\theta - \mathbf{q}_h$ 为混合轨迹和实际轨迹之间的误差。并且 $\dot{K}_{pj} = \mu_p s_{rj}(t)e_{rj}(t)$, $\dot{K}_{ij} = \mu_i s_{rj}(t)\int_0^t de_{rj}(t)dt$, $\dot{K}_{dj} = \mu_d s_{rj}(t)\frac{d}{dt}e_{rj}(t)$, $\mathbf{s}_r(t) = \lambda_2 \int_0^t \mathbf{e}_r dt + \lambda_1 \mathbf{e}_r + \dot{\mathbf{e}}_r$ 。

联立式(13)、式(15)及式(36), 得到对应的误差方程为:

$$\ddot{\mathbf{e}}_r + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}}_r + \mathbf{K}_p \mathbf{e}_r = \mathbf{Z} \quad (37)$$

式中: $\mathbf{Z} = \bar{\boldsymbol{\tau}} - \boldsymbol{\tau}_h$ 。

将式(37)代入式(35)中, 可得实际的误差方程为:

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{a}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\mathbf{e} = \mathbf{F}_h + \mathbf{H}_p \mathbf{Z} \quad (38)$$

式中: $\mathbf{H}_p = \text{diag}(\mathbf{H}_{p1}, \mathbf{H}_{p2}, \mathbf{H}_{p3})$; $\mathbf{H}_{pi}(j\omega) = \frac{-\omega^2 + j\omega a_i + b_i}{-\omega^2 + j\omega \lambda_{i1} + \lambda_{i2}}$ ($i=1,2,3$); a_i, b_i ($i=1,2,3$) 分别为矩阵 \mathbf{a}, \mathbf{b} 的对角元素。

由式(38)可解得:

$$\ddot{\mathbf{q}}_\theta = \ddot{\mathbf{q}}_d - \mathbf{a}\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{b}\mathbf{e} + \mathbf{F}_h + \mathbf{H}_p \mathbf{Z} \quad (39)$$

将式(39)代入式(11)可解出 $\ddot{\mathbf{q}}_\psi$:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}_\psi = \hat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}[\hat{\mathbf{M}}_{21}(\mathbf{a}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\mathbf{e}) - \hat{\mathbf{H}}_{22}\dot{\mathbf{q}}_\psi - \mathbf{K}_\psi \mathbf{q}_\psi - \\ \hat{\mathbf{M}}_{21}\mathbf{F}_h - (\hat{\mathbf{M}}_{21}\ddot{\mathbf{q}}_d + \hat{\mathbf{M}}_{21}\mathbf{H}_p \mathbf{Z} + \hat{\mathbf{H}}_{21}\ddot{\mathbf{q}}_\theta)] \end{aligned} \quad (40)$$

结合式(39)及式(40)可得柔性模态坐标、载体姿态角和机械臂关节角度期望状态的跟踪误差的状态方程如下:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}_h \mathbf{X} + \mathbf{B}_h \mathbf{F}_h + \mathbf{E} \quad (41)$$

式中: $\mathbf{Y} = [\mathbf{q}_\psi^T \quad \mathbf{e}^T \quad \dot{\mathbf{q}}_\psi^T \quad \dot{\mathbf{e}}^T]^T$,

$$\mathbf{A}_h = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 3} & \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -\hat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}\mathbf{K}_\psi & \hat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}\hat{\mathbf{M}}_{21}\mathbf{b} & -\hat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}\hat{\mathbf{H}}_{22} & \hat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}\hat{\mathbf{M}}_{21}\mathbf{a} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & -\mathbf{b} & \mathbf{0}_{3 \times 4} & -\mathbf{a} \end{pmatrix},$$

$$B_h = \begin{pmatrix} 0_{7 \times 3} \\ -\hat{M}_{22}^{-1} \hat{M}_{21} \\ I_{3 \times 3} \end{pmatrix},$$

$$E = \begin{pmatrix} 0_{7 \times 1} \\ -\hat{M}_{22}^{-1} (\hat{M}_{21} \dot{q}_d + \hat{M}_{21} H_P Z + \hat{H}_{21} \dot{q}_\theta) \\ H_P Z \end{pmatrix}.$$

E 为非线性时变矩阵, 视为扰动。利用线性二次最优控制算法设计控制输入, 以柔性振动、系统跟踪误差、减少能量消耗为优化目标, 构造性能指标函数为:

$$J_h = \frac{1}{2} \int_0^\infty (X^T Q_h X + F_h^T R_h F_h) dt \quad (42)$$

式中: $Q_h \in R^{14 \times 14}$ 及 $R_h \in R^{3 \times 3}$ 为正定常值矩阵。

则状态反馈最优控制为

$$F_h = -R_h^{-1} B_h^T G_h X \quad (43)$$

式中: G_h 为如下 Riccati 方程的解:

$$G_h A_h + A_h^T G_h - G_h B_h R_h^{-1} B_h^T G_h + Q_h = 0 \quad (44)$$

将式(44)代入式(41)中可得:

$$\dot{X} = (A_h - B_h R_h^{-1} B_h^T G_h) X + E \quad (45)$$

当 $E=0$ 该状态反馈最优控制可保证闭环系统稳定。

当 $E \neq 0$ 时, 设 $C = 2Q + A_h G_h + G_h A_h$, 并令 $\|D\|_s$ 、 $\|D\|_E$ 、 $\max \lambda(D)$ 、 $\min \lambda(D)$ 分别为矩阵 D 的谱范数 $\max[\lambda(DD^T)]^{1/2}$ 、欧里几德范数 $[(\sum |D_{ij}|^2)^{1/2}]$ 、最大特征值和最小特征值。则闭环系统(45)渐进稳定的充分条件是:

$$\frac{\|E\|_E}{\|X\|_E} \leq \mu = \frac{1}{2 \|C^{-1}\|_s \|G_h\|_s} = \frac{\min \lambda(C)}{2 \max \lambda(G_h)} \quad (46)$$

此时可选取 Lyapunov 函数 $V_r = X^T G_h X$, 则有^[19]:

$$\dot{V}_r \leq 0 \quad (47)$$

因此, 式(45)为稳定系统。

3 仿真算例

为了验证所提控制方案具对不稳定系统的镇定控制效果并能够抑制柔性振动, 以图1所示柔空间机器人系统及目标卫星系统为例, 适当选取控制

参数, 进行数值模拟仿真。空间机器人系统的惯性参数选取为: $l_0=1\text{m}$, $m_0=120\text{kg}$, $I_0=90\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $l_i=3\text{m}$, $EI_i=100\text{N}\cdot\text{m}^2$, $\rho_i=0.35\text{kg/m}$ ($i=1,2$)。目标系统的惯性参数选取为: $m_l=20\text{kg}$, $I_l=15\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $d_l=0.2\text{m}$ 。

设空间机器人系统捕获目标前初始构型为:

$$q_\theta = [100^\circ \quad 60^\circ \quad 30^\circ]^T$$

接触碰撞前自由目标系统的速度为:

$$\dot{q}_r = [0.1\text{m/s} \quad 0.1\text{m/s} \quad 0.35\text{rad/s}]^T$$

3.1 未开启控制时冲击效应数值模拟

为了直观显示柔性空间机器人系统受目标冲击后的冲击响应, 未开启控制时的仿真结果如图所示。

由图2~4为可知, 柔性空间机器人系统受到目标冲击后若不及时开启控制不仅会导致系统失去稳定, 同时会产生持续的高频振动。

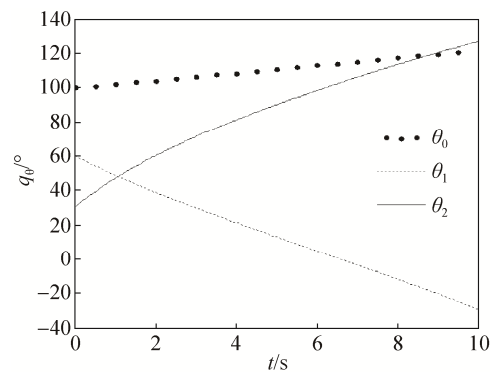


图2 未开启控制时载体姿态及关节角变化量
Fig. 2 Tracking trajectory of base attitude and joint angles without control

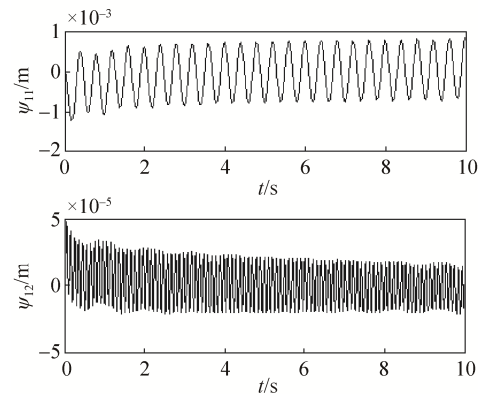


图3 未开启控制时柔性上臂模态坐标变化量
Fig. 3 Modal coordinate changes of the upper arm without control

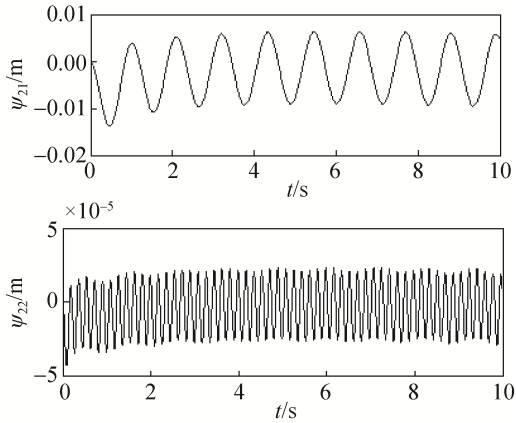


图 4 未开启控制时柔性前臂模态坐标变化量
Fig. 4 Modal coordinate changes of the forearm without control

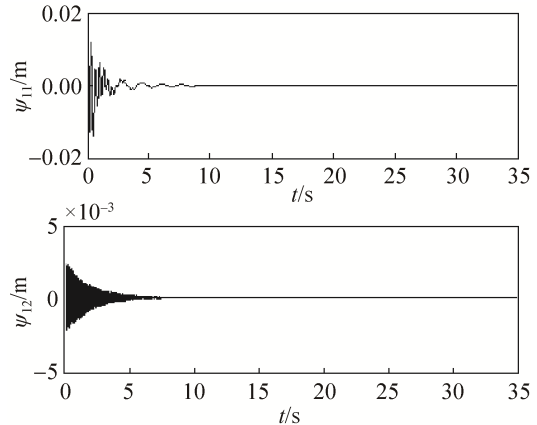


图 6 开启控制时柔性上臂模态坐标变化量
Fig. 6 Modal coordinate changes of the upper arm with control

3.2 开启控制后镇定运动过程

采用上述基于混合轨迹的自适应控制方案, 以完成关节运动及柔性振动的镇定控制。相关控制参数选取为: $\lambda_1 = 2I_{3 \times 3}$, $\lambda_2 = I_{3 \times 3}$, $a = 20I_{3 \times 3}$, $b = 101I_{3 \times 3}$, $A = 0.03I_{3 \times 3}$, $R_h = 0.1I_{3 \times 3}$, $Q_h = 15I_{3 \times 3}$, $\mu_p = 10$ 、 $\mu_l = 15$ 、 $\mu_d = 10$ 。

由图 5~7 为可知, 采用所提控制方案进行镇定控制后, 载体姿态及关节角恢复至稳定状态, 同时柔性振动也得到了有效抑制。

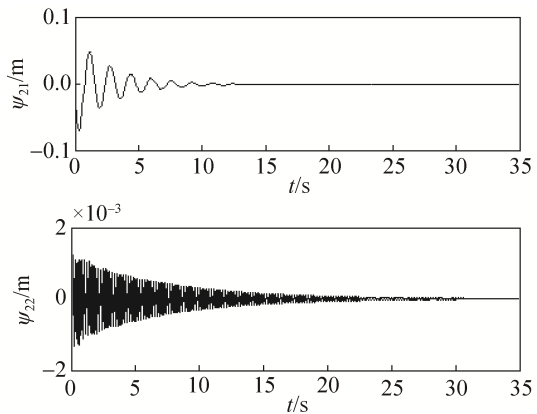


图 7 开启控制时柔性前臂模态坐标变化量
Fig. 7 Modal coordinate changes of the forearm with control

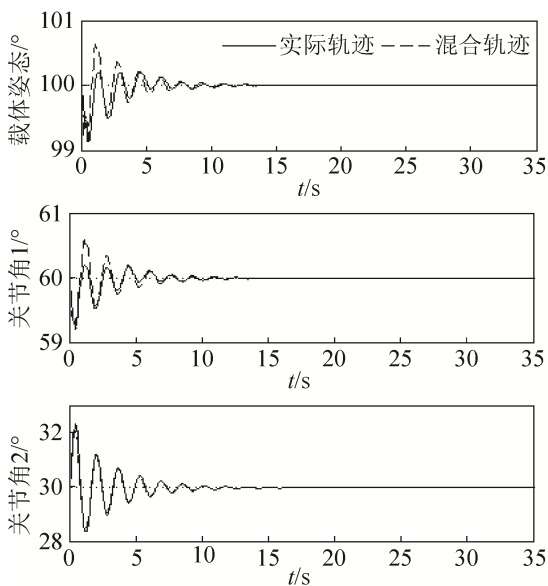


图 5 开启控制时载体姿态及关节角变化量
Fig. 5 Tracking trajectory of base attitude and joint angles with control

4 结论

基于碰撞理论分析了柔性空间机器人系统受到冲击后的冲击响应, 以及柔性连杆的振动情况。针对惯性参量难以精确确定的情况, 基于混合轨迹的思想提出了自校正控制方案, 不仅完成了混合体系统关节运动的镇定控制, 并且抑制了柔性振动。该方案具有结构简单, 计算量小, 易于实际应用的优点。同时避免了传统的基于奇异摄动分解的抑振控制方案需要将系统动力学方程进行分解, 所提控制方案具有更好的鲁棒性, 并简化了控制设计过程。虽然文中的研究对象为做平面运动的空间机器人系统, 但是提出的控制方法、理论也可以推广应用于做三维运动的一般空间机器人系统。

参考文献:

- [1] Narikiyo T, Ohmiya M. Control of a planar space robot: Theory and experiments[J]. *Control Engineering (S0010-8049)*, 2006, 8(14): 875-883.
- [2] Diftler M A, Mehling J S, Aabdallah M E, et al. Robonaut2-the first humanoid robot in space[C]// *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai: IEEE, 2011: 2178-2183.
- [3] Kaiser C, Berg F, Delcura J M, et al. SMART-OLEV-An orbit life extension vehicle for servicing commercial spacecrafts in GEO[J]. *Acta Astronautica (S0094-5765)*, 2008, 63: 400-410.
- [4] Cheng J, Chen L. Decentralized Adaptive Neural Network Stabilization Control and Vibration Suppression of Flexible Robot Manipulator during Capture a Target[C]// *The 66rd International Astronautical Congress*, Jerusalem, 2015.
- [5] Pazelli T F, Terra M H, Siqueira A A, et al. Experimental investigation on adaptive robust controller design applied to a free-floating space manipulator[J]. *Control Engineering Practice (S0967-0661)*, 2011, 19(1): 395-408.
- [6] Abad A F, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. *Progress in Aerospace Sciences (S0376-0421)*, 2014, 68: 1-26.
- [7] Senda K, Nagaoka H. Adaptive control of free-flying space robot with position/attitude control system. *Journal of Guidance[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics (S0731-5090)*, 1999, 22(3): 488-490.
- [8] 王明, 黄攀峰, 常海涛, 等. 基于机械臂运动的组合航天器惯性参数在轨辨识[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(5): 811-816.
Wang Ming, Huang Panfeng, Chang Haitao, et al. On-Orbit Identification of Inertia Parameters of Compound Spacecraft Using Space Manipulator[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(5): 811-816.
- [9] 洪在地, 俞超, 陈力. 柔性臂漂浮基空间机器人建模与轨迹跟踪控制[J]. *机器人*, 2007, 29(1): 92-96.
Hong Zaidi, Yun Chao, Chen Li. Modeling and trajectory tracking control of a free-floating space robot with flexible manipulators[J]. *Robot*, 2007, 29(1):92-96.
- [10] 王从庆, 吴鹏飞, 周鑫. 基于最小关节力矩优化的自由浮动空间刚柔耦合机械臂混沌动力学建模与控制[J]. *物理学报*, 2012, 61(23): 230503.
Wang Congqing, Wu Pengfei, Zhou Xin. Control and modeling of chaotic dynamics for a free-floating rigid-flexible coupling space manipulator based on minimal joint torque's optimization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(23): 230503.
- [11] 洪昭斌, 陈力. 柔性空间机械臂基于奇异摄动法的鲁棒跟踪控制和柔性振动主动抑制[J]. *工程力学*, 2010, 27(8): 191-198.
Hong Zhaobin, Chen Li. Robust control and active vibration control of space flexible manipulator by singular perturbation approach[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(8): 191-198.
- [12] Papadopoulos E, Paraskevas I. Design and configuration control of space robots undergoing impacts[C]//6th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems. Loutraki: ESA, 2006: 17-26.
- [13] 陈刚, 贾庆轩, 孙汉旭. 空间机器人捕获目标过程中碰撞运动分析[J]. *机器人*, 2010, 32(3): 432-438.
Chen Gang, Jia Qingxuan, Sun Hanxu. Analysis on impact motion of space robot in the object capturing process[J]. *Robot*, 2010, 32(3): 432-438.
- [14] Dimitar N D, Kazuya Y. Utilization of the bias Momentum Approach for capturing a tumbling satellite[C]// *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. Sendai: IEEE, 2004: 3333-3338.
- [15] 程靖, 陈力. 空间漂浮基空间机器人捕获卫星过程冲击动力学建模及基于非线性滤波器的镇定运动控制[J]. *载人航天*, 2016, 22(1): 34-38.
Cheng Jing, Chen Li. Impact dynamic calming control based on nonlinear filter for free-floating space robot capturing a satellite[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(1): 34-38.
- [16] Shi C, Zhang G. A new method of PID control based on improved BP neural network[C]// *Proceeding of the 25th Chinese Control Conference*. Harbin: IEEE, 2014: 1167-1171.
- [17] Jung J, Leu V Q, Do T D, et al. Adaptive PID speed control design for permanent magnet synchronous motor drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993)*, 2015, 30(2): 900-908.
- [18] Ho H F, Wong Y K, Rad A B. Adaptive PID controller for nonlinear system with H_∞ tracking performance[C]// *Proceeding of International Conference of Physics and Control*. St. Peiersburg: IEEE, 2013: 1315-1319.
- [19] Patel R, Toda M, Sridhar B. Robustness of linear quadratic state feedback designs in the presence of system uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automation Control (S0018-9286)*, 1977, 2(6): 945-949.