

文章编号: 1000-4750(2012)02-0216-06

柔性空间机械臂基于混合滑模思想的 自适应变结构控制

陈志勇, 陈 力

(福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘 要: 研究了柔性空间机械臂协调运动控制及柔性振动抑制问题。利用假设模态法及系统动量守恒关系, 导出了空间机械臂的系统动力学模型。基于混合滑模思想, 针对系统惯性参数存在不确定的复杂情况, 提出了一种柔性空间机械臂本体姿态、关节协调运动的自适应变结构控制方案。该文所引入的混合滑模由频率成形最优滑模及终端滑模两部分组成。前者用于抑制系统柔性杆件的振动, 后者则是为了保证系统跟踪误差在有限时间内的收敛性。此外, 上述控制方案由于在控制过程中无需预知系统的柔性变量, 因此可有效避免对系统柔性状态变量进行实时地测量与反馈, 较适于实际应用。仿真运算, 证实了所提控制方法的有效性。

关键词: 柔性空间机械臂; 协调运动; 混合滑模; 自适应变结构控制; 振动抑制

中图分类号: TP241 文献标志码: A

ADAPTIVE VARIABLE STRUCTURE CONTROL FOR FLEXIBLE SPACE MANIPULATOR BASED ON HYBRID SLIDING MODE CONCEPT

CHEN Zhi-yong, CHEN Li

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The coordinated motion control and flexible vibration suppression problems of flexible space manipulator are studied. With the assumed mode method and the linear momentum conservation of the system, the system dynamics model of the space manipulator is derived. Based on the hybrid sliding mode concept, an adaptive variable structure control scheme is proposed for the flexible space manipulator to achieve the coordinated motion between the base's attitude and the arm's joints, which accounts for the uncertainty in inertial parameters. The hybrid sliding mode introduced consists of two parts, the frequency shaped optimal sliding mode and the terminal sliding mode. The former is used to suppress the vibration of flexible link of the system, and the latter is utilized to guarantee the convergence of system tracking errors in finite time. Moreover, the control scheme proposed does not require the foreknowledge of flexible variables in control. Thus, it can effectively avoid the real-time measurements and feedbacks of system flexible variables, and be more suitable for practical applications. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme.

Key words: flexible space manipulator; coordinated motion; hybrid sliding mode; adaptive variable structure control; vibration suppression

空间机械臂一直是先进机械臂系统研究领域的重要组成部分, 其研究早已引起了人们的广泛关注^[1-10]。一般来说, 空间机械臂系统具有微重力、

操作臂长、质量轻、负载大等特点。为了获得此类机械臂系统良好的控制精度及性能, 人们往往需要在运动学、动力学建模及控制器设计过程中考虑其

收稿日期: 2010-05-12; 修改日期: 2010-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672040); 福建省自然科学基金项目(2010J01003)

通讯作者: 陈志勇(1984-), 男, 福建莆田人, 博士生, 从事空间机器人动力学与控制研究(E-mail: chenzhuyong0203@sina.com).

作者简介: 陈 力(1961-), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 博导, 从事多体系统动力学、空间机器人动力学与控制等研究(E-mail: Chnle@fzu.edu.cn).

操作臂柔性变形的影响。与柔性地面机械臂相比，柔性空间机械臂系统的本体与机械臂之间存在着强烈的动力学耦合作用，其动力学方程呈现出高度的非线性性质，以致于那些较为成熟的地面柔性机械臂控制方法在此无法得到直接地推广与应用。然而即便如此，依然有许多专家学者在柔性空间机械臂系统的研究上做出了相应的努力。如文献[11]利用虚拟刚性机械臂的概念，先后提出了柔性空间机械臂刚性轨迹跟踪的伪分解加速度法及降阶模型与伪分解加速度复合控制方法；文献[12]借助于神经网络控制技术，设计了柔性空间机械臂系统关节运动的一种在线自学习神经网络控制方案；文献[13]推导了柔性双臂空间机器人闭链系统的动力学方程，基于奇异摄动法给出了一种滑模变结构控制与非线性 PD 控制组成的复合控制方法；文献[14]则提出了一种本体姿态受控柔性空间机械臂关节运动的反演控制策略。虽然上述控制方法成功地解决了柔性空间机械臂刚性轨迹跟踪的控制问题，但均存在有一定的不足。如文献[11,14]仅适用于柔性空间机械臂系统惯性参数精确已知的情形；文献[12,14]尚未探讨系统柔性振动的抑制问题；文献[13]所给出的快变子控制器在整个振动抑制过程中需要对系统的柔性变量进行实时地测量与反馈等。

本文研究了参数不确定柔性空间机械臂系统协调运动控制及柔性振动抑制问题。利用假设模态法、系统动量守恒关系及拉格朗日方法，建立了系统的动力学方程。以此为基础并借助于混合滑模思想，设计了一种柔性空间机械臂本体姿态与机械臂各关节协调运动的自适应变结构控制方案。所提控制方案不仅能够保证系统刚性运动轨迹的精确跟踪控制，而且还能使系统柔性杆件的振动得到有效地抑制。此外，由于采用频率成形最优滑模控制来抑制系统柔性杆件的振动，上述控制方案又具有不需要实时测量、反馈系统各柔性状态变量的显著优点。仿真运算，证实了上述方法的有效性。

1 系统动力学模型

如图 1 所示，漂浮基柔性空间机械臂系统由卫星本体 B_0 ，刚性连杆 B_1 及柔性连杆 B_2 组成。建立系统沿轨道平动的惯性坐标系 (OXY) 及各分体 B_i ($i=0,1,2$) 的连体坐标系 $(O_i x_i y_i)$ ，并对系统做如下几个假设：1) 系统各分体均沿 (X,Y) 平面作平面

运动；2) 柔性连杆 B_2 的截面尺寸远小于其杆长；3) 柔性连杆 B_2 仅产生小变形的横向振动，而不考虑其剪切变形、轴向变形等。

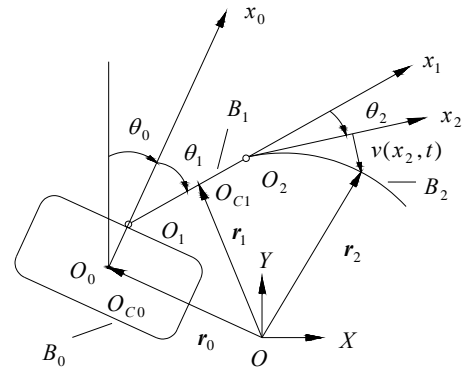


图 1 平面柔性空间机械臂系统

Fig.1 A planar flexible space manipulator system

考虑到柔性连杆 B_2 一端受约束，另一端自由，因此可将其视为 Euler-Bernoulli 悬臂梁。由假设模态法可知，其横向弹性形变 $v(x_2, t)$ 可描述为：

$$v(x_2, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x_2) \zeta_i(t) \quad (1)$$

其中： $\varphi_i(x_2)$ 、 $\zeta_i(t)$ 分别为柔性连杆第 i 阶模态试函数及其对应的模态坐标； n 为截断项数，本文取前两阶振动模态进行分析(即 $n=2$)。

假定系统不受任何外力的作用，则系统满足对 (OXY) 的动量守恒关系。不失一般性，设系统的初始动量为零。若选取 x_0 轴相对于 Y 轴的偏转角 θ_0 (即本体姿态角)， x_i 轴相对于 x_{i-1} 轴的偏转角 θ_i ($i=1,2$) 及柔性连杆的模态坐标 ζ_i ($i=1,2$) 为系统的广义坐标，则由系统动量守恒关系及拉格朗日法，可导出柔性空间机械臂的系统动力学方程^[14]：

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + Kq = (\tau^T \quad 0^T)^T \quad (2)$$

其中： $D(q) \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ 为系统对称、正定质量矩阵； $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^5$ 为系统包含科氏力、离心力的列向量； $q = (\theta^T \quad \zeta^T)^T$ 、 $\theta = (\theta_0 \quad \theta_1 \quad \theta_2)^T$ 、 $\zeta = (\zeta_1 \quad \zeta_2)^T$ 为系统广义坐标向量； $K = \text{diag}(0 \quad 0 \quad 0 \quad k_1 \quad k_2)$ 为系统刚度矩阵； $\tau = (\tau_0 \quad \tau_1 \quad \tau_2)^T$ 为本体姿态及机械臂各关节控制力矩所组成的列向量。

显然，式(2)又可以被分解为：

$$D_{rr}(q)\ddot{\theta} + D_{rf}(q)\ddot{\zeta} + C_r(q, \dot{q}) = \tau,$$

$$D_{fr}(q)\ddot{\theta} + D_{ff}(q)\ddot{\zeta} + C_f(q, \dot{q}) + K_\zeta \zeta = 0. \quad (3)$$

其中：矩阵 $D_{rr}(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ， $D_{rf}(q) = D_{fr}^T(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ ， $D_{ff}(q) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 均为 $D(q)$ 的子矩阵； $C_r(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^3$ ，

$C_f(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^2$ 为 $C(q, \dot{q})$ 的子向量; 系统刚度矩阵 $K_\zeta = \text{diag}(k_1 \ k_2)$ 。

2 基于混合滑模思想的自适应变结构控制方案设计

柔性空间机械臂本体姿态与机械臂各关节协调运动的控制问题, 归结于确定卫星本体姿态控制系统及机械臂各关节驱动器的控制输入规律, 以实现系统本体姿态及机械臂各关节协调运动的精确跟踪控制, 并使控制对柔性杆件的振动具有良好的抑制效果。为此, 本节基于混合滑模思想^[15], 深入探讨了一种参数不确定柔性空间机械臂系统协调运动的自适应变结构控制方案设计问题。

若定义 $\theta_d = (\theta_{0d} \ \theta_{1d} \ \theta_{2d})^T$ 为卫星本体姿态及机械臂各关节期望运动位置所组成的期望输出向量, $\theta = (\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2)^T$ 为系统的实际输出向量, 则 $e = (\theta - \theta_d) \in \mathbb{R}^3$ 为系统的跟踪误差向量, $\dot{e} = (\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) = \dot{\theta} \in \mathbb{R}^3$ 为相应的速度误差向量。

设计如下形式的混合滑模切换函数:

$$S = \dot{e} + \alpha \lambda e + (1 - \alpha) \beta \psi(e) + \alpha HZ \quad (4)$$

其中, 常数 α 满足: $0 < \alpha < 1$ 。这里需要指出的是, 若 α 取下界限为 0 时, 则 S 为终端滑模切换函数; 若 α 取上界限为 1 时, 则 S 为频率成形最优滑模切换函数; 常值矩阵 $\lambda = \text{diag}(\lambda_0 \ \lambda_1 \ \lambda_2)$, $\lambda_i > 0$, $\beta = \text{diag}(\beta_0 \ \beta_1 \ \beta_2)$, $\beta_i > 0$ ($i = 0, 1, 2$); 向量 $\psi(e) = [\psi(e_0) \ \psi(e_1) \ \psi(e_2)]^T$, 其各元素定义如下: $\psi(e_i) = \begin{cases} e_i^p, & |e_i| > \varepsilon_e \\ p\varepsilon_e^{p-1}e_i, & |e_i| \leq \varepsilon_e \end{cases}$, 常数 $\varepsilon_e > 0$; $p = p_1 / p_2$, $p_1 = 2m_1 + 1$, $m_1 = 0, 1, 2, 3, \dots$, $p_2 = 2m_2 + 1$, $m_2 = 1, 2, 3, 4, \dots$; 此外, 常值矩阵 $H = \text{diag}(H_0 \ H_1 \ H_2)$, 且 $H_j = (h_{1j} \ h_{2j})$, $h_{ij} > 0$ ($i = 1, 2; j = 0, 1, 2$); $Z = (z_{10} \ z_{20} \ z_{11} \ z_{21} \ z_{12} \ z_{22})^T$ 为二阶高通滤波器各状态变量所组成的列向量。

为有效抑制系统柔性模式的振动, 这里需要附加设计一个频率成形补偿器:

$$\dot{Z} = WZ + Ge \quad (5)$$

其中, $W = \text{diag}(W_{0z} \ W_{1z} \ W_{2z})$, 其子元素为:

$$W_{jz} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{jz}^2 & -2\omega_{jz} \end{pmatrix}, \quad \omega_{jz} > 0, \quad j = 0, 1, 2;$$

$$G = \text{diag}(G_0 \ G_1 \ G_2), \quad G_j = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad j = 0, 1, 2。$$

由式(4)中 $\psi(e)$ 的定义, 可知:

$$\dot{\psi}(e) = [\dot{\psi}(e_0) \ \dot{\psi}(e_1) \ \dot{\psi}(e_2)]^T = pA\dot{e} \quad (6)$$

其中, $A = \text{diag}(A_0 \ A_1 \ A_2)$, 其子元素如下

$$A_i = \begin{cases} e_i^{p-1}, & |e_i| > \varepsilon_e \\ \varepsilon_e^{p-1}, & |e_i| \leq \varepsilon_e \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2$$

对切换函数 S 求导并结合式(6), 可导出:

$$\dot{S} = \ddot{\theta} + [\alpha\lambda + p(1 - \alpha)\beta A + \alpha HG]\dot{\theta} + \alpha HWZ \quad (7)$$

利用式(3)中的第 2 式, 可求得 $\ddot{\zeta}$ 的表达式:

$$\ddot{\zeta} = -D_{ff}^{-1}(D_{fr}\ddot{\theta} + C_f + K_\zeta\zeta) \quad (8)$$

将式(8)代入式(3)中的第 1 式, 得到:

$$\bar{D}\ddot{\theta} = \tau + D_{rf}D_{ff}^{-1}(C_f + K_\zeta\zeta) - C_r \quad (9)$$

其中, $\bar{D} = D_{rr} - D_{rf}D_{ff}^{-1}D_{fr}$ 为对称、正定矩阵。

最终, 将式(7)两端左乘 \bar{D} 并考虑式(9), 有:

$$\bar{D}\dot{S} = \tau + \Gamma_1 \cdot \chi_1 + \Gamma_2 \cdot \chi_2 + \Gamma_3 \cdot \chi_3 + \Gamma_4 = \tau + \Gamma^T \chi \quad (10)$$

其中:

$$\Gamma_1 = (D_{rf}D_{ff}^{-1}\Gamma_{f1} - \Gamma_{r1}) \in \mathbb{R}^{3 \times 6};$$

$$\Gamma_2 = [D_{rf}D_{ff}^{-1}\Gamma_{f2} - \Gamma_{r2} + \alpha\bar{D}\lambda + p(1 - \alpha)\bar{D}\beta A + \alpha\bar{D}HG] \in \mathbb{R}^{3 \times 3};$$

$$\Gamma_3 = (\alpha\bar{D}HW) \in \mathbb{R}^{3 \times 6}; \quad \Gamma_4 = (D_{rf}D_{ff}^{-1}K_\zeta\zeta) \in \mathbb{R}^3;$$

$$\chi_1 = (\dot{\theta}_0^2 \ \dot{\theta}_1^2 \ \dot{\theta}_2^2 \ \dot{\theta}_0\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_0\dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2)^T \in \mathbb{R}^6;$$

$$\chi_2 = (\dot{\theta}_0 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2)^T \in \mathbb{R}^3;$$

$$\chi_3 = (z_{10} \ z_{20} \ z_{11} \ z_{21} \ z_{12} \ z_{22})^T \in \mathbb{R}^6;$$

$$\Gamma = (\Gamma_1 \ \Gamma_2 \ \Gamma_3 \ \Gamma_4)^T \in \mathbb{R}^{16 \times 3};$$

$$\chi = (\chi_1^T \ \chi_2^T \ \chi_3^T \ 1)^T \in \mathbb{R}^{16};$$

$\Gamma_{f1} \in \mathbb{R}^{2 \times 6}$ 、 $\Gamma_{r1} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ 分别为从 C_f 、 C_r 中分离出来且与 χ_1 对应的矩阵; $\Gamma_{f2} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ 、 $\Gamma_{r2} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别为从 C_f 、 C_r 中分离出来且与 χ_2 对应的矩阵。

若定义符号 $|\mathcal{E}|_k = (|\mathcal{E}_1| \ |\mathcal{E}_2| \ \dots \ |\mathcal{E}_k|)^T$, 且 $\mathcal{E} \in \mathbb{R}^k$ 为任意 k 阶列向量, 则存在如下定理:

定理 1. 针对由式(3)所确立的漂浮基柔性空间机械臂系统, 如下自适应变结构控制输入规律:

$$\tau = -\text{sgn}(S)[\hat{\Gamma}^T|\chi|_k + \delta], \quad \hat{\Gamma} = \eta|\chi|_k|S|_k^T \quad (11)$$

可保证: $\lim_{t \rightarrow +\infty} S = 0$ 。其中, $\delta = (\delta_0 \ \delta_1 \ \delta_2)^T$, 常

数 $\delta_i > 0$ ($i = 0, 1, 2$), $\eta > 0$, $\hat{\Gamma}$ 为 Γ^* 的估计值,

$$\Gamma^* = [\Gamma_{ij}^*] \in \mathbb{R}^{16 \times 3}, \quad \Gamma_{ij}^* = \sup(\Gamma_{ajj}),$$

$$\Gamma_a = \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})\Gamma\bar{\mathbf{D}}^{-1} = [\Gamma_{aij}] \in \mathfrak{R}^{16 \times 3},$$

$\text{sgn}(\mathbf{S}) = \text{diag}[\text{sgn}(S_0) \quad \text{sgn}(S_1) \quad \text{sgn}(S_2)]$, 且

$$\text{sgn}(S_i) = \begin{cases} -1, & S_i < 0 \\ +1, & S_i > 0 \end{cases}, \quad i = 0, 1, 2.$$

证明: 选取系统的准 Lyapunov 函数 V_1 为:

$$V_1 = \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})\mathbf{S}^T\mathbf{S}/2 + \eta^{-1}\text{tr}[\boldsymbol{\Omega}^T\boldsymbol{\Omega}]/2 \quad (12)$$

其中, $\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})$ 为 $\bar{\mathbf{D}}$ 的最大特征值, $\boldsymbol{\Omega} = \hat{\Gamma} - \Gamma^*$ 。

计算 V_1 的全导数 \dot{V}_1 , 并利用式(10)及式(11),

有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})\mathbf{S}^T\dot{\mathbf{S}} + \eta^{-1}\text{tr}[\boldsymbol{\Omega}^T\dot{\boldsymbol{\Omega}}] = \\ &-\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})[\mathbf{S}^T\bar{\mathbf{D}}^{-1}\text{sgn}(\mathbf{S})\hat{\Gamma}^T|\boldsymbol{\chi}|_1 + \\ &\mathbf{S}^T\bar{\mathbf{D}}^{-1}\text{sgn}(\mathbf{S})\boldsymbol{\delta} - \mathbf{S}^T\bar{\mathbf{D}}^{-1}\Gamma^T\boldsymbol{\chi}] + \\ &\eta^{-1}\text{tr}[(\hat{\Gamma} - \Gamma^*)^T\dot{\hat{\Gamma}}] \leq -\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}}) \cdot \\ &\left[\frac{1}{\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})}|\mathbf{S}|_1^T\hat{\Gamma}^T|\boldsymbol{\chi}|_1 + \frac{1}{\lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})}|\mathbf{S}|_1^T\boldsymbol{\delta} - \right. \\ &\left. \mathbf{S}^T\bar{\mathbf{D}}^{-1}\Gamma^T\boldsymbol{\chi} \right] + \eta^{-1}\text{tr}[(\hat{\Gamma} - \Gamma^*)^T\dot{\hat{\Gamma}}] = \\ &-|\mathbf{S}|_1^T\hat{\Gamma}^T|\boldsymbol{\chi}|_1 + \mathbf{S}^T\Gamma_a^T\boldsymbol{\chi} - |\mathbf{S}|_1^T\boldsymbol{\delta} + \\ &\text{tr}[\hat{\Gamma}^T|\boldsymbol{\chi}|_1|\mathbf{S}|_1^T - \Gamma^{*T}|\boldsymbol{\chi}|_1|\mathbf{S}|_1^T] \leq -|\mathbf{S}|_1^T\boldsymbol{\delta} \quad (13) \end{aligned}$$

显然, $\dot{V}_1 \leq 0$; 且 $\dot{V}_1 = 0$, 当且仅当 $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ 。根据 Lyapunov 稳定性分析定理可知, 此时系统满足渐近稳定性条件, 即 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \mathbf{S} = \mathbf{0}$ 。证毕。

需要指出的是, 虽然上述控制方案能够保证系统的稳定性, 但从控制器结构考虑, 其依然存在有一些不足之处。如控制律式(11)中的符号函数项 $\text{sgn}(\mathbf{S})$ 会使系统产生固有的“抖振”; $\hat{\Gamma}$ 采用正向积分调节方式, 其取值会随着积分运算的持续进行而不断增大, 并最终产生高增益。为此, 这里需对方案式(11)做如下改进与修正: 如利用给定的饱和函数项来替代符号函数项, 以削弱系统的抖振; 在 $\hat{\Gamma}$ 自适应调节过程中引入死区控制策略, 以获得 $\hat{\Gamma}$ 更为适当的取值。修正后的控制方案具体形式如下:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= -\text{sat}(\mathbf{S})[\hat{\Gamma}^T|\boldsymbol{\chi}|_1 + \boldsymbol{\delta}] \\ \dot{\hat{\Gamma}} &= \begin{cases} \eta|\boldsymbol{\chi}|_1|\mathbf{S}|_1^T, & \mathbf{S}^T\mathbf{S} > \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu} \\ \mathbf{0}, & \mathbf{S}^T\mathbf{S} \leq \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu} \end{cases} \quad (14) \end{aligned}$$

其中, $\boldsymbol{\mu} = (\mu_0 \quad \mu_1 \quad \mu_2)^T$, 常数 $\mu_i > 0$ ($i = 0, 1, 2$), $\text{sat}(\mathbf{S}) = \text{diag}[\text{sat}(S_0, \mu_0) \quad \text{sat}(S_1, \mu_1) \quad \text{sat}(S_2, \mu_2)]$, 当 $|S_0| \leq \mu_0$ 且 $|S_1| \leq \mu_1$ 且 $|S_2| \leq \mu_2$ 时, $\text{sat}(S_i, \mu_i) = S_i / \mu_i$, 否则 $\text{sat}(S_i, \mu_i) = \text{sgn}(S_i)$ ($i = 0, 1, 2$)。

定理 2. 针对由式(3)所确立的柔性空间机械臂系统, 改进后的自适应变结构控制方案式(14)可保证整个闭环系统的稳定性, 并使系统跟踪误差收敛到接近于零的一个较小邻域且一致最终有界。

证明: 选取系统的准 Lyapunov 函数 V_2 为:

$$V_2 = \begin{cases} \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})\boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu}/2 + \eta^{-1}\text{tr}[\boldsymbol{\Omega}^T\boldsymbol{\Omega}]/2, & \mathbf{S}^T\mathbf{S} \leq \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu} \\ \lambda_{\max}(\bar{\mathbf{D}})\mathbf{S}^T\mathbf{S}/2 + \eta^{-1}\text{tr}[\boldsymbol{\Omega}^T\boldsymbol{\Omega}]/2, & \mathbf{S}^T\mathbf{S} > \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu} \end{cases} \quad (15)$$

计算 V_2 的全导数 \dot{V}_2 , 并分别考虑如下两种情形:

1) 当 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} \leq \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu}$ 时, 结合式(14), 容易得到:

$$\dot{V}_2 = \eta^{-1}\text{tr}[\boldsymbol{\Omega}^T\dot{\boldsymbol{\Omega}}] = \eta^{-1}\text{tr}[(\hat{\Gamma} - \Gamma^*)^T\dot{\hat{\Gamma}}] = 0 \quad (16)$$

2) 当 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} > \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu}$ 时, 显然 \dot{V}_2 与定理 1 中的 \dot{V}_1 具有同样的表达式。于是, 由式(14)依然可以导出:

$$\dot{V}_2 \leq -|\mathbf{S}|_1^T\boldsymbol{\delta} < 0 \quad (17)$$

观察式(16)及式(17)可知, 当系统跟踪误差处于死区范围之外时(即 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} > \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu}$), \dot{V}_2 将恒为负定函数; 由 Lyapunov 稳定性定理可知, 在控制器式(14)的作用下, 系统跟踪误差将在有限的时间内收敛至死区; 而当系统跟踪误差进入死区范围之内时(即 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} \leq \boldsymbol{\mu}^T\boldsymbol{\mu}$), 则 \dot{V}_2 恒为零; 此时系统跟踪误差将处于一个接近于零的较小邻域且一致最终有界。

3 仿真实例

为验证上述控制方案的有效性, 本节将针对如图 1 所示的漂浮基柔性空间机械臂系统, 进行数值模拟仿真运算。系统惯性参数选取如下:

$$\begin{aligned} m_0 &= 40.0\text{kg}, \quad m_1 = 4.0\text{kg}; \quad \rho = 0.5\text{kg/m}, \\ EI &= 200.0\text{N} \cdot \text{m}^2, \quad l_0 = 1.0\text{m}, \quad l_1 = 2.0\text{m}, \\ l_2 &= 2.0\text{m}, \quad J_0 = 35.0\text{kg} \cdot \text{m}^2, \quad J_1 = 3.0\text{kg} \cdot \text{m}^2. \end{aligned}$$

柔性连杆的模态试函数 $\varphi_i(x_2)$ 取为:

$$\begin{aligned} \varphi_i(x_2) &= A_i[\cos(\nu_i x_2) - \cosh(\nu_i x_2)] + \\ &[\sin(\nu_i x_2) - \sinh(\nu_i x_2)] \end{aligned}$$

其中: $A_i = -[\sin(\gamma_i) + \sinh(\gamma_i)] / [\cos(\gamma_i) + \cosh(\gamma_i)]$; $\nu_i = \gamma_i / l_2$ ($i = 1, 2$); $\gamma_1 = 1.8751$; $\gamma_2 = 4.6941$ 。

仿真时, 假设卫星本体姿态角及机械臂各关节的期望运动位置分别为:

$$\theta_{0d} = 0.00\text{rad}, \quad \theta_{1d} = 0.00\text{rad}, \quad \theta_{2d} = 1.57\text{rad}$$

系统运动初始值取为:

$$\begin{aligned} \theta_0(0) &= 0.20\text{rad}, \quad \theta_1(0) = 0.50\text{rad}, \\ \theta_2(0) &= 0.57\text{rad}, \quad \zeta_1(0) = \zeta_2(0) = 0.00\text{m} \end{aligned}$$

控制器的控制参数选取如下:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.8, \lambda = \text{diag}(4.0 \ 4.0 \ 4.0), \\ \beta &= \text{diag}(4.0 \ 4.0 \ 4.0), p = 0.6, \varepsilon_e = 0.08, \\ \omega_{0z} = \omega_{1z} = \omega_{2z} &= 1.0, \delta = (6.0 \ 6.0 \ 0.1)^T, \\ \eta &= 0.05, \mu = (0.10 \ 0.10 \ 0.08)^T, \\ h_{10} = h_{20} = h_{11} = h_{21} = h_{12} = h_{22} &= 5.0, \\ \mathbf{Z}(0) &= (0 \ 0.2361 \ 0 \ 0.532 \ 0 \ -1)^T \end{aligned}$$

利用上节提出的控制输入规律式(14)及频率成形补偿器式(5)对系统进行模拟仿真运算, 整个仿真过程耗时: $t = 15 \text{ s}$ 。图 2 为开启频率成形补偿器式(5)时, 柔性空间机械臂本体姿态及机械臂各关节的实际追踪误差曲线; 图 3 为此间柔性连杆一阶振动模式的实际抑制情况; 图 4 为柔性连杆二阶振动模式的实际抑制情况。为进一步验证所提控制方法的有效性, 这里关闭频率成形补偿器式(5)后, 重新对系统进行模拟仿真运算, 仿真结果如图 5~图 7 所示。

对比上述仿真结果可知, 本文提出的基于混合滑模思想的自适应变结构控制方案可有效实现柔性空间机械臂本体姿态、关节协调运动的精确跟踪控制, 并对柔性杆件的振动具有良好的抑制效果。

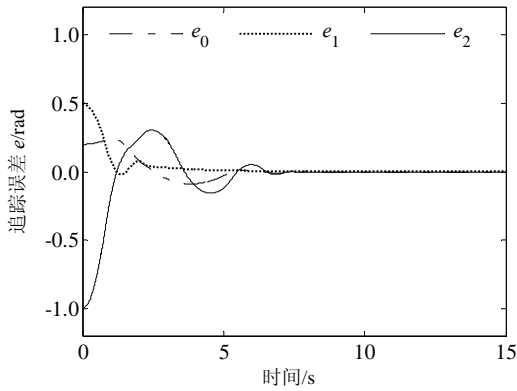


图 2 追踪误差(开启频率补偿器)

Fig.2 Tracking errors (with frequency compensator)

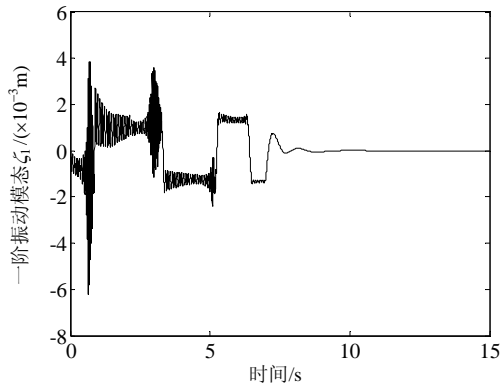


图 3 一阶振动模式(开启频率补偿器)

Fig.3 The first mode (with frequency compensator)

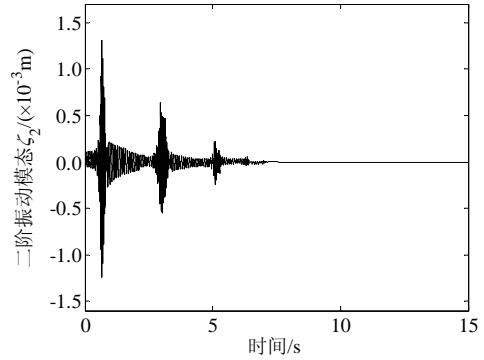


图 4 二阶振动模式(开启频率补偿器)

Fig.4 The second mode (with frequency compensator)

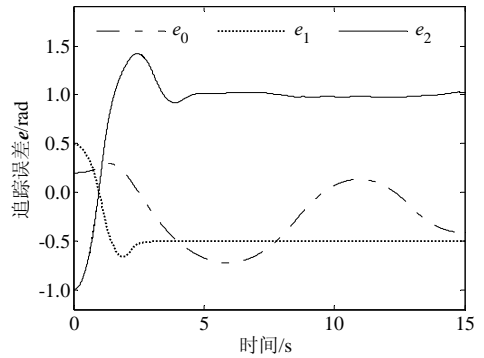


图 5 追踪误差(关闭频率补偿器)

Fig.5 Tracking errors (without frequency compensator)

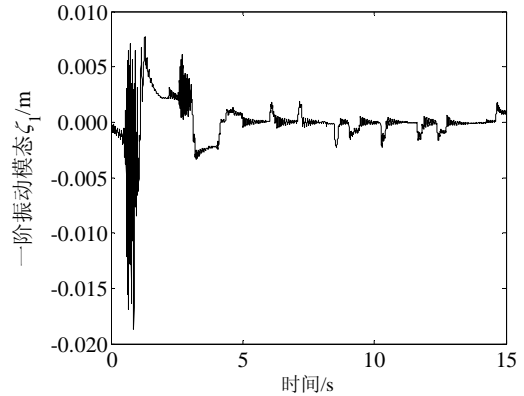


图 6 一阶振动模式(关闭频率补偿器)

Fig.6 The first mode (without frequency compensator)

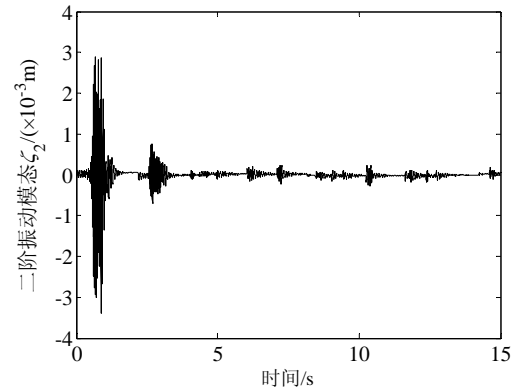


图 7 二阶振动模式(关闭频率补偿器)

Fig.7 The second mode (without frequency compensator)

4 结论

本文基于混合滑模思想,提出了一种参数不确定柔性空间机械臂本体姿态、关节协调运动的自适应结构控制方案。所提控制方案能让系统满足 Lyapunov 稳定性分析条件,且对系统柔性杆件的振动具有良好的抑制效果。通过对一个平面柔性空间机械臂的仿真运算,证实了控制方案的有效性。

参考文献:

- [1] Parlaktuna O, Ozkan M. Adaptive control of free-floating space manipulators using dynamically equivalent manipulator model [J]. *Robotics and Autonomous System*, 2004, 46(3): 185—193.
- [2] Modi V J, Caron M. Order-N formulation and dynamics of multi-unit flexible space manipulator [J]. *Nonlinear Dynamics*, 1998, 17(4): 347—368.
- [3] Vafa Z, Dubowsky S. The kinematics and dynamics of space manipulators: The virtual manipulator approach [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 9(4): 3—21.
- [4] Abiko S, Hirzinger G. An adaptive control for free-floating space robot by using inverted chain approach [C]// Grant E, Henderson T C. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego USA, IEEE, 2007.
- [5] Yoshida K. Space robot dynamics and control to orbit, from orbit, and future [C]// John H, Dan K. *The 9th International Symposium of Robotics Research*, London, Springer, 2000.
- [6] Rekeitis I, Martin E, Rouleau G, et al. Autonomous capture of a tumbling satellite [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(4): 275—296.
- [7] 李俊峰, 王照林. 带空间机械臂的充液航天器姿态动力学研究[J]. *宇航学报*, 1999, 20(2): 81—86.
Li Junfeng, Wang Zhaolin. Study on attitude dynamics of a liquid-filled spacecraft with manipulators [J]. *Journal of Astronautics*, 1999, 20(2): 81—86. (in Chinese)
- [8] 戈新生, 陈立群, 刘延柱. 一类多体系统的非完整运动规划最优控制[J]. *工程力学*, 2006, 23(3): 63—68.
Ge Xinsheng, Chen Liqun, Liu Yanzhu. Optimal control of a nonholonomic motion planning for multibody systems [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(3): 63—68. (in Chinese)
- [9] 陈力. 带滑移铰空间机器人惯性空间轨迹跟踪的鲁棒混合自适应控制[J]. *工程力学*, 2004, 21(3): 174—179.
Chen Li. Robust and adaptive composite control of space robot system with prismatic joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, 21(3): 174—179. (in Chinese)
- [10] 陈志勇, 陈力. 漂浮基空间机器人系统基于增广变量思想的改进变结构滑模控制[J]. *力学季刊*, 2009, 30(4): 618—624.
Chen Zhiyong, Chen Li. Improved variable structure mode control based on augmentation approach for free floating space robot system [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2009, 30(4): 618—624. (in Chinese)
- [11] Murotsu Y, Tsujio S, Senda K. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot [J]. *IEEE Control Systems*, 1992, 12(3): 51—57.
- [12] Newton R T, Xu Y S. Real-time implementation of neural network learning control of a flexible space manipulator [C]// Khosla P K. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Atlanta USA, IEEE, 1993.
- [13] 王从庆, 张承龙. 自由浮动柔性双臂空间机器人系统的动力学控制[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 196—200.
Wang Congqing, Zhang Chenglong. Dynamic control of a free-floating flexible dual-arm space robotic system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 196—200. (in Chinese)
- [14] 郭益深, 陈力. 漂浮基柔性空间机械臂基于 Backstepping 控制策略设计的姿态、关节运动控制[J]. *工程力学*, 2009, 26(10): 165—170.
Guo Yishen, Chen Li. Backstepping control of coordinated motion of free-floating flexible space manipulator system [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(10): 165—170. (in Chinese)
- [15] Xu J X, Cao W J. Synthesized sliding mode control of a single-link flexible robot [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(3): 197—209.