

输入有界的自由漂浮柔性空间机器人轨迹跟踪控制

翟艳霞, 胡庆雷, 徐 梁, 霍 星

(哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对自由漂浮柔性空间机器人轨迹跟踪控制问题, 首先利用拉格朗日和假设模态法建立了动力学模型. 分析系统动力学模型, 综合考虑欠驱动、柔性振动等特点, 将其简化为一种带有柔性振动扰动完全可控的动力学模型; 在此基础上, 考虑控制输入受限, 提出一种自适应状态反馈控制策略. 该策略采用自适应技术实时在线学习柔性振动扰动参数, 从而保证控制律对柔性振动扰动具有良好的鲁棒性; 最后, 基于Lyapunov方法证明了该控制策略能够实现关节期望轨迹的跟踪. 仿真验证了该控制策略对控制输入受限系统轨迹跟踪控制的有效性和可靠性.

关键词: 柔性空间机器人; 自由漂浮; 轨迹跟踪; 输入受限; 自适应

中图分类号: TP202

文献标识码: A

Trajectory-tracking control for free-floating flexible space robots with bounded inputs

ZHAI Yan-xia, HU Qing-lei, XU Liang, HUO Xing

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: This paper is concerned with the trajectory-tracking of free-floating flexible space robots. By means of Lagrange's equations and the mode-assumption method, the dynamical equations of the space robot are derived and analyzed. These equations are transformed into a fully controllable form with the flexible vibration disturbance based on the characteristics of the underactuated dynamical control and the flexible vibration. In considering the physical limitations of the actuator, we develop a robust control approach with adaptive state feedback to reduce the uncertain dynamic disturbance. A complete analysis on the stability and the performance are performed by using Lyapunov theory. Simulation results of the application to a two-link free-floating flexible space robot show the feasibility of the proposed controller.

Key words: flexible space manipulator; free-floating; trajectory-tracking; bounded inputs; adaptive control

1 引言(Introduction)

随着航天技术的发展, 空间机器人研究引起了众多学者的兴趣, 而柔性空间机器人以其质量轻、成本低、动作范围大等优点成为关注的焦点^[1-6]. 然而, 柔性空间机器人在运动时会产生扭曲、剪切等变形; 同时, 由于刚性和柔性运动的强耦合, 一般空间机器人的动力学分析及控制已无法满足柔性空间机器人控制稳定性和精度的要求. 因此针对柔性空间机器人, 如何实现模型不确定性下的鲁棒控制十分必要.

对于柔性空间机器人, 文献[7]采用拟增广自适应的方式对自由漂浮柔性空间机器人关节空间控制问题进行了研究; Chen等^[8]研究了柔性机器人的欠驱动控制问题; Cao等^[9]针对两连杆的柔性机械臂, 给出一种混合滑模自适应变结构控制策略. Wang等^[10]研究了两连杆柔性机械臂的模糊终端滑模控制算法; Chu等^[11]对于两连杆空间柔性机械臂的轨

迹跟踪控制问题提出了一种全局终端滑模控制方案. 在控制律设计中, 执行机构的输出饱和也对控制系统的设计造成了限制. 文献[12]给出了不确定MIMO非线性系统控制受限问题的时变滑模控制方案. 文献[13]针对积分滑模控制的饱和问题, 提出了一种抗饱和补偿控制方案. 文献[14]对于机械臂的轨迹跟踪控制受限问题, 基于有界函数提出了全状态反馈和输出反馈控制算法. 尽管上述文献对于柔性机械臂控制问题均给出了可行控制方案, 但综合考虑系统柔性振动以及载体受扰、控制输入饱和等因素的研究相对欠缺.

为此, 本文在上述研究基础上, 针对控制输入受限的自由漂浮柔性空间机器人的轨迹跟踪问题, 综合考虑系统欠驱动、非完整性、柔性振动及载体受扰的限制, 基于双曲正切函数提出一种自适应状态反馈控制方案, 以期实现系统关节空间的轨迹跟踪

控制.

2 数学模型(Mathematical model)

自由漂浮柔性空间机器人系统如图1所示, 由自由漂浮刚性载体 B_0 和柔性机械臂 B_1, B_2 组成, $O-XY$ 表示惯性坐标系, $O_i-x_iy_i (i = 0, 1, 2)$ 表示分体 B_i 的连体坐标系.

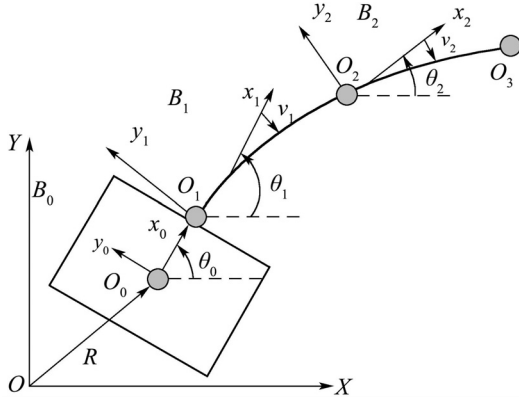


图1 自由漂浮空间机器人系统

Fig. 1 Free-floating flexible space robot

由拉格朗日法和假设模态法, 可以得到的系统动力学方程^[14-16]

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Kq = Q, \quad (1)$$

其中: $q = (x_s, y_s, \theta_0, \theta_1, \theta_2, q_1, q_2)^T$ 表示系统广义坐标, x_s, y_s, θ_0 表示系统载体位置和姿态, θ_1, θ_2 分别表示关节1, 2的转角, q_1, q_2 分别表示柔性杆1, 2的模式坐标; $M(q)$ 表示正定对称质量矩阵; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 包含离心力和科氏力; $K = \text{diag}\{0, \bar{K}_e\}$ 表示刚度矩阵; Q 表示广义力向量. 柔性杆为均匀细长杆, 忽略其轴向变形和剪切变形的影响, 将其视为 Euler-Bernoulli 梁^[1, 17]. 假设模态法描述柔性体弹性变形

$$v_i = v_i(x_i, t) = \Phi_i^T(x_i)q_i(t), \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

其中: $\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_N]^T$ 表示模态向量矩阵, $q_i(t) = [q_{i1} \ q_{i2} \ \cdots \ q_{iN}]^T$ 表示模态坐标, N 表示振动模式个数. 设 Euler-Bernoulli 梁的模式函数为

$$\phi_j(x_i) = \sin\left(\frac{j\pi}{l_i}x_i\right), \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2, \cdots, N. \quad (3)$$

由于柔性振动二阶及二阶以上的振动模式幅值非常小, 对于系统轨迹跟踪控制影响很小, 所以忽略柔性振动的二阶以上的高阶振动模式, 取 $N = 1$, 式(2)可以表示为

$$v_i(x_i, t) = \phi(x_i)q_i(t), \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

由此可知 $\bar{K}_e = \text{diag}\{k_1, k_2\}$, 其中

$$k_k = \int_0^{l_k} EI_k \left(\frac{d^2 \phi(x_k)}{dx_k^2} \right) dx_k, \quad k = 1, 2.$$

设集中力向量 $F = (f_x, f_y, \tau_0, \tau_1, \tau_2, f_1, f_2)^T$, $f_x,$

f_y 分别表示作用于系统载体水平方向和垂直方向的推力; τ_0 表示作用于载体的外部转矩; τ_1, τ_2 表示作用于连杆关节转矩; f_1, f_2 表示作用于柔性连杆上主动振动控制力. 根据虚功原理^[16], Q 与 F 满足: $Q = GF$, 其中 G 为权值矩阵.

3 动力学分析(Dynamic analysis)

自由漂浮柔性空间机器人系统动力学方程(1)是高度非线性、非完整、刚柔耦合的. 设 $q = [q_r^T \ q_e^T]^T$, $Q = [Q_r^T \ Q_e^T]^T$, 其中: $q_r = (x_s, y_s, \theta_0, \theta_1, \theta_2)^T$ 表示刚性位移矢量, $q_e = (q_1, q_2)^T$ 表示柔性变形位移矢量, Q_r, Q_e 为相应的广义力向量. 方程(1)整理可得刚体运动方程和柔性振动方程^[16]

$$M_r(q_r)\ddot{q}_r + C_r(q_r, \dot{q}_r)\dot{q}_r + d_e(q, \dot{q}, \ddot{q}) = Q_r, \quad (5)$$

$$M_e(q)\ddot{q}_e + C_e(q, \dot{q})\dot{q}_e + K_e(q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r)q_e + d_r(q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) = Q_e, \quad (6)$$

其中: d_e, d_r 表示干扰向量, d_e 可表示为 $q_e, \dot{q}_e, \ddot{q}_e$ 的线性组合, M_r 为矩阵 M 中刚性矩阵, C_r 为矩阵 C 中刚性矩阵, M_e 为矩阵 M 中柔性矩阵, C_e 为矩阵 C 中柔性矩阵. 方程(5), 方程(6)的相互耦合, 体现在方程(6)中源于刚性运动的持续干扰 d_r 产生柔性变形振动; 而柔性振动通过方程(5)中的扰动 d_e 对刚性运动产生影响. 本文将方程(5)用于轨迹跟踪控制^[16]. 设 $\tau_p = [f_x \ f_y \ \tau_0]^T = 0$, $\tau_a = [\tau_1 \ \tau_2]^T$, 由式(5)可得

$$\bar{M}_r(q_r)\ddot{q}_r + \bar{C}_r(q_r, \dot{q}_r)\dot{q}_r + \bar{d}_e(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \begin{bmatrix} \tau_f \\ \tau_a \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: $\bar{M}_r, \bar{C}_r, \bar{d}_e$ 分别为 M_r, C_r, d_e 权值矩阵变换后对应的矩阵. 设 $q_r = [q_p^T \ q_a^T]^T$, 其中: $q_p = [x_s \ y_s \ \theta_0]^T$ 表示载体位姿, $q_a = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 表示柔性杆关节转角, τ_f 表示系统载体所受到的外界扰动. 则将式(7)展开可以得到

$$M_{pp}\ddot{q}_p + M_{pa}\ddot{q}_a + C_{pp}\dot{q}_p + C_{pa}\dot{q}_a + d_{ep} = \tau_f, \quad (8)$$

$$M_{ap}\ddot{q}_p + M_{aa}\ddot{q}_a + C_{ap}\dot{q}_p + C_{aa}\dot{q}_a + d_{ea} = \tau_a, \quad (9)$$

其中: M_{pp} 为矩阵 $\bar{M}_r$ 中对应的刚性矩阵, M_{pa} 为矩阵 $\bar{M}_r$ 中对应的刚性与柔性部分的耦合矩阵, M_{ap} 为矩阵 $\bar{M}_r$ 中对应的柔性与刚性部分的耦合矩阵, M_{aa} 为矩阵 $\bar{M}_r$ 中对应的柔性矩阵, C_{pp} 为矩阵 $\bar{C}_r$ 中对应的刚性矩阵, C_{pa} 为矩阵 $\bar{C}_r$ 中对应的刚性与柔性的耦合矩阵, C_{ap} 为矩阵 $\bar{C}_r$ 中对应的柔性与刚性的耦合矩阵, C_{aa} 为矩阵 $\bar{C}_r$ 中对应的柔性矩阵, d_{ep} 为矩阵 $\bar{d}_e$ 中的对应刚性部分分量, d_{ea} 为矩阵 $\bar{d}_e$ 中的对应柔性部分分量.

由于 M_{pp} 可逆, 方程(8)变形代入方程(9)得

$$M_a(q_r)\ddot{q}_a + H_a(q_r, \dot{q}_r) + d_a = \tau_a, \quad (10)$$

其中:

$$M_a = M_{aa} - M_{ap}M_{pp}^{-1}M_{pa},$$

$$\begin{aligned} H_a &= (C_{ap} - M_{ap} M_{pp}^{-1} C_{pp}) \dot{q}_p + \\ &\quad (C_{aa} - M_{ap} M_{pp}^{-1} C_{pa}) \dot{q}_a, \\ d_a &= d_{ea} + M_{ap} M_{pp}^{-1} (\tau_f - d_{ep}). \end{aligned}$$

自由漂浮柔性空间机器人系统动力学方程(10)将柔性振动作为系统扰动, 将欠驱动问题转换为全驱动问题, 满足以下性质^[13].

性质1 惯性矩阵 $M_a(q_r)$ 对称正定, 且满足

$$m_1 \|z\|^2 \leq z^T M_a(q_r) z \leq m_2 \|z\|^2, \forall z \in \mathbb{R}^2, \quad (11)$$

其中: m_1, m_2 为正常数, $\|\cdot\|$ 为标准欧几里得范数.

性质2 向心-科氏力项 $H_a(q_r, \dot{q}_r)$ 满足

$$\|H_a(q_r, \dot{q}_r)\| \leq \lambda_h \|\dot{q}_r\|^2, \quad (12)$$

其中 λ_h 为正常数.

性质3 关节控制输入力矩 τ_a 满足

$$\|\tau_a\| \leq \tau_{\max}. \quad (13)$$

性质4 设 $\psi(t) = M_a^{-1}(q_r) d_a$, 系统扰动 d_a 有界, 且满足

$$\psi(t) \leq \tau_{\max}, \quad (14)$$

其中: $\psi(t) \in \mathbb{R}^2$ 为连续函数. 设 $\hat{\psi}(t) \in \mathbb{R}^2$ 表示 $\psi(t)$ 的动态估计, $\tilde{\psi}(t) \in \mathbb{R}^2$ 表示 $\psi(t)$ 的动态估计误差, 则满足

$$\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}. \quad (15)$$

4 控制器设计(Control design)

在简化动力学模型(10)基础上, 对自由漂浮柔性空间机器人系统设计控制律实现在控制输入受限条件下关节转角的轨迹跟踪.

假设1 期望跟踪轨迹 q_{ad} 满足

$$\|\dot{q}_{ad}\| \leq \lambda_{dv}, \|\ddot{q}_{ad}\| \leq \lambda_{da}, \quad (16)$$

其中 $\lambda_{dv}, \lambda_{da}$ 为已知的正常数. 定义跟踪误差 $e = q_a - q_{ad}$.

定义1 向量 $\text{Tanh}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ 与对角矩阵 $\text{Cosh}(\cdot) \in \mathbb{R}^{n \times n}$

$$\begin{aligned} \text{Tanh}(z) &= [\tanh z_1 \cdots \tanh z_n]^T, \\ \text{Cosh}(z) &= \text{diag}\{\cosh z_1, \cdots, \cosh z_n\}, \end{aligned}$$

其中 $z = [z_1 \cdots z_n]^T \in \mathbb{R}^n$. 由定义可有以下不等式成立^[13]:

$$\left\{ \begin{aligned} z &\geq \text{Tanh}(z), \\ z^2 &\geq \sum_{i=1}^n \ln(\cosh z_i) \geq \\ &\quad \sum_{i=1}^n \ln(\cosh z_i) \geq \frac{1}{2} \tanh^2(z), \\ z+1 &\geq \frac{z}{\tanh z}, \\ z^T \text{Tanh}(z) &\geq \text{Tanh}^T(z) \text{Tanh}(z) = \\ &\quad \text{Tanh}^2(z) \geq \tanh^2(z). \end{aligned} \right. \quad (17)$$

定义2 增广误差 $\sigma(t) \in \mathbb{R}^2$:

$$\sigma = \dot{e} + \beta \text{Tanh}(e), \quad (18)$$

其中: $\beta = \text{diag}\{\beta_1, \beta_2\}$, $\beta_i > 0 (i = 1, 2)$.

对增广误差 σ 对时间求导数整理变形可得

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= M_a^{-1}(\tau_a - H_a - d_a) - \ddot{q}_{ad} + \\ &\quad \beta \text{Cosh}^{-2}(e)(\sigma - \beta \text{Tanh}(e)). \end{aligned} \quad (19)$$

设计控制律

$$\begin{aligned} \tau_a &= M_a \ddot{q}_{ad} + M_a \hat{\psi} + M_a \beta \text{Cosh}^{-2}(e) \beta \text{Tanh}(e) + \\ &\quad H_{ad} - M_a (K_p \text{Tanh}(e) + K_v \text{Tanh}(\sigma)), \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $K_p = \text{diag}\{k_{p1}, k_{p2}\}$, $k_{pi} > 0 (i = 1, 2)$; $K_v = \text{diag}\{k_{v1}, k_{v2}\}$, $k_{vi} > 0 (i = 1, 2)$; $H_{ad} = H_a(q_{rd}, \dot{q}_{rd})$, q_{rd} 表示 q_r 的期望. 柔性振动干扰的动态估计满足自适应律

$$\dot{\hat{\psi}} = -\Gamma \sigma, \quad (21)$$

其中: $\Gamma = \text{diag}\{r_1, r_2\}$, $r_i > 0 (i = 1, 2)$ 表示自适应调节因子. 将式(20)代入式(19)可得到关于增广误差的闭环动力学方程

$$\dot{\sigma} = -\tilde{\psi} + X(e, \sigma, t) - K_p \text{Tanh}(e) - K_v \text{Tanh}(\sigma), \quad (22)$$

其中 $X \in \mathbb{R}^2$ 是辅助向量, 其表达式为

$$X = \beta \text{Cosh}^{-2}(e) \sigma + M_a^{-1}(H_{ad} - H_a).$$

注1 由上述性质1和2及式(17)可知^[18]

$$\|X\| \leq \zeta_1 \|\sigma\| + \zeta_2 \|\sigma\|^2,$$

其中: ζ_1, ζ_2 为正常数, 取决于自由漂浮柔性空间机器人系统的参数及期望轨迹; $x(t) \in \mathbb{R}^4$ 满足

$$x = [\text{Tanh}^T(e) \text{Tanh}^T(\sigma)]^T. \quad (23)$$

定理1 考虑系统动力学方程(10), 满足假设1. 如果采用控制输入(20)和自适应律为(21), 控制增益矩阵 K_p, K_v 满足

$$\lambda_k > \zeta_1 + \zeta_2 \|X\|, \quad (24)$$

其中 $\lambda_k = \lambda_{\min}(K_p \beta, K_v)$, $\lambda_{\min}$ 为矩阵的最小特征值. 那么, 系统跟踪误差全局渐进稳定

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

证 选取Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma + \sum_{i=1}^2 k_{pi} \ln(\cosh(e_i)) + \frac{1}{2} \tilde{\psi}^T \Gamma^{-1} \tilde{\psi}. \quad (25)$$

根据不等式(17)可知

$$\frac{1}{2} \lambda_1 \tanh^2(\|\omega\|) \leq \lambda_1 \ln(\cosh(\|\omega\|)) \leq V \leq \lambda_2 \|\xi\|^2, \quad (26)$$

其中: $\omega = [e^T \sigma^T]^T$, $\xi = [e^T \sigma^T \tilde{\psi}^T]^T$. 定义正常数 λ_1, λ_2 :

$$\lambda_1 = \min\{\lambda_{\min}(K_p), \frac{1}{2}\},$$

$$\lambda_2 = \max\{\lambda_{\max}(\mathbf{K}_p), \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\lambda_{\max}(\Gamma^{-1})\},$$

其中 $\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征值.

对 V 求取时间的导数

$$\dot{V} = \boldsymbol{\sigma}^T \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \text{Tanh}^T(\mathbf{e}) \mathbf{K}_p \dot{\mathbf{e}} + \tilde{\boldsymbol{\psi}}^T \Gamma \dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}}. \quad (27)$$

由 $\dot{\tilde{\boldsymbol{\psi}}} = -\dot{\boldsymbol{\psi}}$, 将式(21)–(22)带入可得

$$\dot{V} = \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{X} - \boldsymbol{\sigma}^T \mathbf{K}_v \text{Tanh}(\boldsymbol{\sigma}) - \text{Tanh}^T(\mathbf{e}) \mathbf{K}_p \boldsymbol{\beta} \text{Tanh}(\mathbf{e}). \quad (28)$$

通过不等式(17)可以得到

$$\dot{V} \leq \|\boldsymbol{\sigma}\| \|\mathbf{X}\| - \lambda_{\min}(\mathbf{K}_p \boldsymbol{\beta}) \tanh^2(\|\mathbf{e}\|) - \lambda_{\min}(\mathbf{K}_v) \tanh^2(\|\boldsymbol{\sigma}\|). \quad (29)$$

将式(23)带入, 结合式(24)可得

$$\dot{V} \leq -(\lambda_k - \zeta_1 - \zeta_2 \|\mathbf{X}\|) \|\mathbf{X}\|^2 \leq -\alpha \|\mathbf{X}\|^2, \quad (30)$$

其中 α 为常正数. 由此可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e} = \mathbf{0}$. 定理证明结束. 证毕.

定理2 选取参数 $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_v, \boldsymbol{\beta}$, 使满足

$$m_2(\lambda_{da} + \zeta_\psi + \zeta_e + \lambda_{\max}(\mathbf{K}_p) + \lambda_{\max}(\mathbf{K}_v)) + \lambda_h \lambda_{dv}^2 \leq \tau_{\max}, \quad (31)$$

控制律(20)满足控制输入受限的条件并且保证动力学系统(10)渐进收敛, 其中: m_2, λ_h 由性质1, 2给出; $\lambda_{da}, \lambda_{dv}$ 由式(16)给出; ζ_ψ, ζ_e 为正常数, 且满足

$$\zeta_\psi = \sup \|\tilde{\boldsymbol{\psi}}\|, \\ \zeta_e = \sup \|\boldsymbol{\beta} \text{Cosh}^{-2}(\mathbf{e}) \boldsymbol{\beta} \text{Tanh}(\mathbf{e})\|.$$

5 仿真分析(Simulations)

将控制器(20)应用于实际模型中进行仿真验证其有效性. 选取文献[15]中的柔性空间机器人系统物理参数, 载体质量为 $m_0 = 600$ kg, 载体质心到关节 O_1 的距离 $b_0 = 3.0$ m, 柔性杆质量均匀分别为 $m_1 = m_2 = 1.5075$ kg, 连杆长度 $l_1 = l_2 = 4.5$ m, 均匀弯曲刚度 $EI_1 = EI_2 = 1676$ (N·m²). 设柔性空间机械臂两个关节转角的期望轨迹分别为:

$$\theta_{1d} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{t}{10} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) \right), \\ \theta_{2d} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{t}{10} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi}{5}t\right) \right).$$

对控制器(20)进行仿真, 并与PID控制进行比较. 关节转角初始值:

$$\theta_1(0) = 0.4 \text{ rad}, \theta_2(0) = 1.2 \text{ rad}, \tau_{\max} = 10 \text{ N} \cdot \text{m},$$

选择控制器参数:

$$\boldsymbol{\beta} = \text{diag}\{1, 1\}, \mathbf{K}_p = \text{diag}\{1, 1\}, \\ \mathbf{K}_v = \text{diag}\{1.5, 3\}, \boldsymbol{\Gamma} = \text{diag}\{0.1, 0.1\}.$$

ASF(adaptive state feedback)表示控制律(20), 仿真分

别在系统载体扰动为零与系统载体扰动不为零的条件下进行, 分析该控制器的控制性能.

5.1 无载体扰动条件下的仿真分析(Simulation analysis without carrier's disturbance)

在系统载体不受扰动情况下, 仿真结果如图2–5所示. 从仿真图中可以看出系统在PID控制及本文设计控制器(20)输入力矩受限条件下, 均能跟踪期望关节转角; 但显然本文设计的控制器关节转角误差更小、跟踪精度更高; 同时, 控制作用只是引起微小的柔性模态振动. 这里ASF(adaptive state feedback)表示控制律(20)的英文缩写.

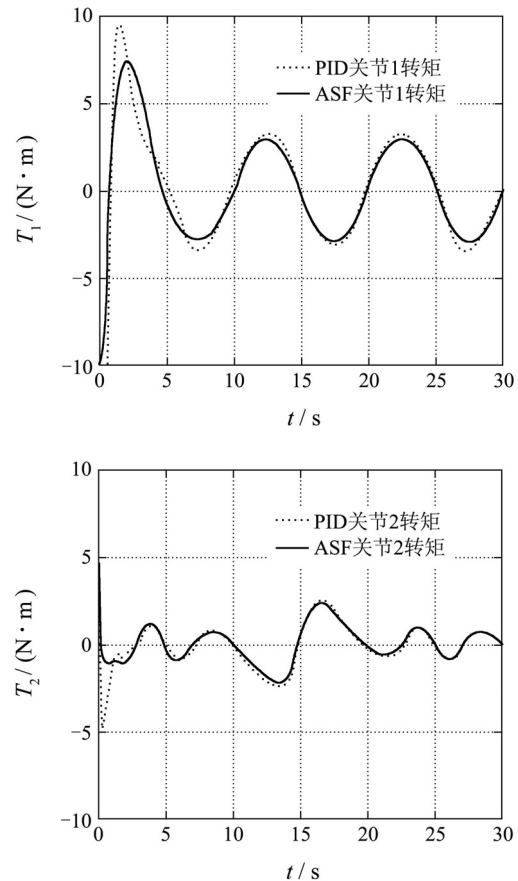
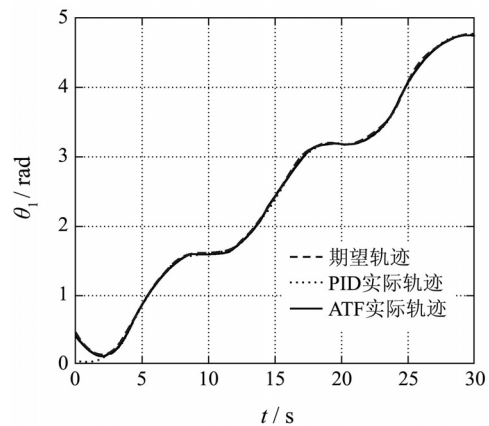


图2 输入控制转矩

Fig. 2 Input control torque



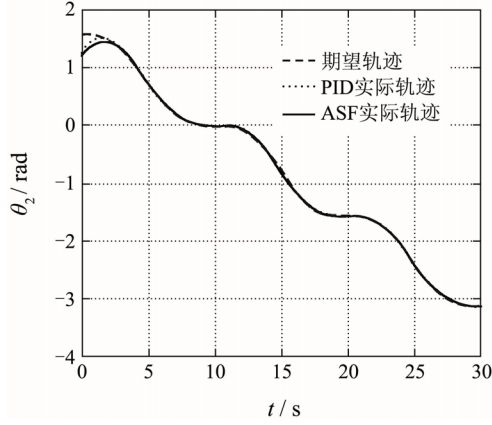


图3 关节转角曲线

Fig. 3 Joint position tracking trajectory

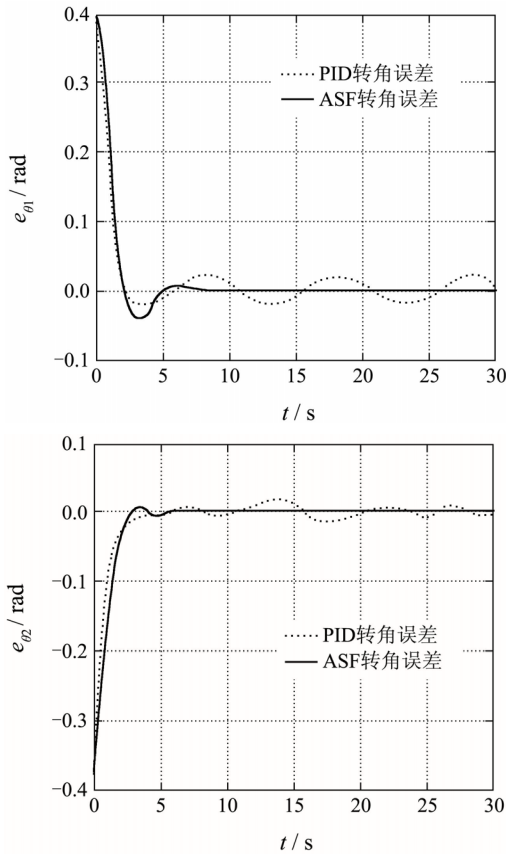


图4 关节转角误差曲线

Fig. 4 Joint position tracking error

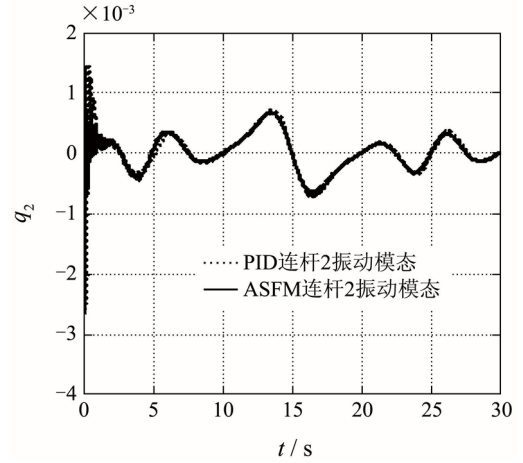
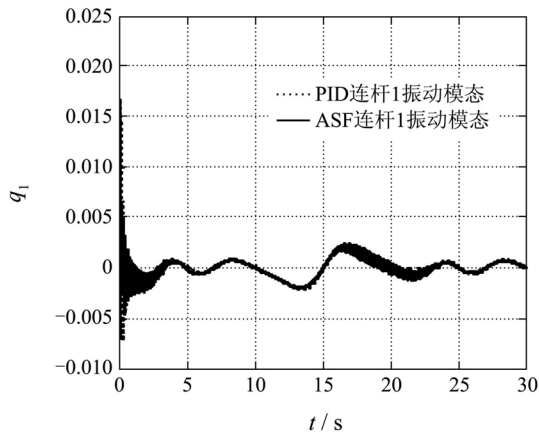


图5 柔性模态振动曲线

Fig. 5 Flexible mode coordinate

5.2 载体姿态受扰条件下的仿真分析

(Simulation analysis without carrier's attitude disturbance)

系统载体姿态, 在仿真时间 $t = 20$ s 时, 分别受到常值干扰、正弦干扰叠加的扰动(32)与脉冲扰动(33):

$$\tau_{t1} = [0 \ 0 \ 2 + 0.5 \sin(2\pi t)]^T, \quad (32)$$

$$\tau_{t2} = [0 \ 0 \ 10\sigma(t_d)]^T. \quad (33)$$

其中 t_d 为脉冲的作用时间。

系统关节空间跟踪误差仿真结果分别如图6—7所示。仿真结果可以看出, 载体姿态扰动对自由漂浮柔性空间机器人系统关节控制的轨迹跟踪控制精度产生了一定的影响, 但系统在控制器(20)作用下, 仍能达到较小的跟踪误差, 控制器(20)对姿态扰动具有很好的鲁棒性。

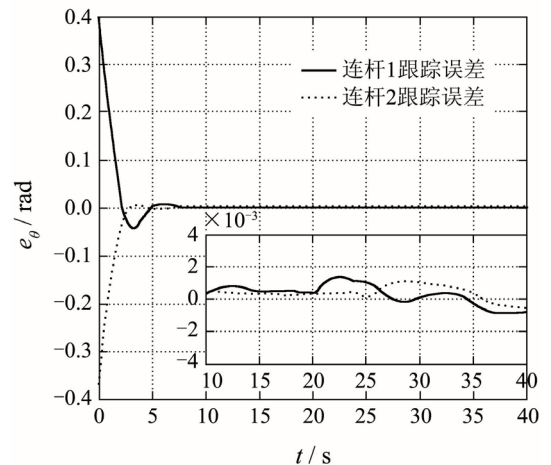


图6 常值与正弦叠加扰动下跟踪误差

Fig. 6 Tracking error with constant and sinusoidal disturbance

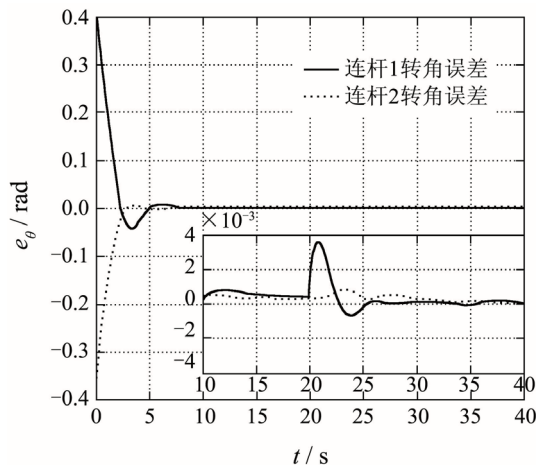


图7 脉冲干扰条件下跟踪误差

Fig. 7 Tracking error with impulse disturbance

6 结论(Conclusions)

本文基于终端滑模正切函数的有界性, 针对平面运动双连杆自由漂浮柔性空间机器人轨迹跟踪控制问题, 设计了一种较为简单的自适应状态反馈控制策略, 能够在控制输入受限条件下跟踪的关节期望轨迹, 并且对于柔性振动以及载体扰动等具有很好的鲁棒性. 最后, 将该控制策略应用于实际自由漂浮柔性空间机器人系统的跟踪控制, 结果表明该控制策略能够很好的实现跟踪目标, 且具有良好的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] MUROTSU Y, TSUJIO S, SENDA K, et al. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1992, 12(3): 51 – 57.
- [2] TIAN F Y, WU H T, SUN H L. Efficient numerical integration method for dynamic of flexible space robots system[C] //2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation, and Robotics. Bangkok: IEEE, 2009: 102 – 106.
- [3] YU Z F, YU Y B, SHANG D Y, et al. On orbit servicing flexible space robots dynamics and control during capturing target[C] //2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha: IEEE, 2010: 817 – 820.
- [4] KIRAN G S, KUMAR A, PATHAK P M, et al. Trajectory control of flexible space robot[C] //Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu: IEEE, 2008: 738 – 743.
- [5] ZHAO H C, CHEN D Q. Optimal motion planning for flexible space robots[C] //Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis: IEEE, 1996: 393 – 398.
- [6] 丁希仑, 王树国. 空间机器人柔性臂的动力学轨迹跟踪控制[J]. 机器人, 1997, 19(4): 256 – 258.
(DING Xilun, WANG Shuguo. Dynamic trajectory tracking control of flexible space robot[J]. *Robot*, 1997, 19(4): 256 – 258.)
- [7] 洪昭斌, 陈力. 漂浮基柔性空间机械臂关节运动的拟增广自适应控制及柔性振动实时主动抑制[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 200 – 206, 247.

(HONG Zhaobin, CHEN Li. Real-time vibration suppressing and augmented adaptive control of a free-floating space flexible manipulator with unknown parameters[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(1): 200 – 206, 247.)

- [8] CHEN W, YU Y Q, ZHAO X H, et al. Dynamic control of the under-actuated flexible robot in the operational space[C] //2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun: IEEE, 2009: 3223 – 3228.
- [9] CAO W J, XU J X. Dynamic modeling and adaptive VSC of two-link flexible manipulators using a hybrid sliding surface[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Sydney: IEEE, 2000: 5143 – 5148.
- [10] WANG Y M, FENG Y, YU X H. Fuzzy terminal sliding mode control of two-link flexible manipulators[C] //Proceedings of the 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Orlando: IEEE, 2008: 1620 – 1625.
- [11] CHU M, JIA Q X, SUN H X. Global terminal sliding mode robust control for trajectory tracking and vibration suppression of two-link flexible space manipulator[C] //Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Shanghai: IEEE, 2009: 353 – 357.
- [12] JIN Y Q, LIU X D, QIU W, et al. Time-varying sliding mode control for a class of uncertain MIMO nonlinear system subject to control input constraint[J]. *Science China (Information Sciences)*, 2010, 53(1): 89 – 100.
- [13] YOKOYAMA M, KIM G N, TSUCHIYA M. Integral sliding mode control with anti-windup compensation and its application to a power assist system[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2010, 4(16): 503 – 512.
- [14] DIXON W E, DE QUEIROZ M S, ZHANG F, et al. Tracking control of robot manipulators with bounded torque inputs[J]. *Robotica*, 1999, 2(17): 121 – 129.
- [15] GREEN A, SASIADEK J Z. Intelligent tracking control of a free-flying flexible space robot manipulator[C] //Collection of Technical Papers – AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head: IEEE, 2007: 132 – 156.
- [16] CHEN Y, MEIROVITCH L. Control of a flexible space robot executing a docking maneuver[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(4): 756 – 766.
- [17] 陈志勇, 陈力. 柔性空间机械臂振动抑制的模糊终端滑模控制[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 481 – 486, 592.
(CHEN Zhiyong, CHEN Li. Fuzzy terminal sliding mode control for vibration suppression of flexible space manipulator[J]. *Journal of Vibration Measurement and Diagnosis*, 2010, 30(5): 481 – 486, 592.)
- [18] SADEQH N, HOROWITZ R. Stability and robustness analysis of a class of adaptive controllers for robotic manipulators[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1990, 3(9): 74 – 92.

作者简介:

翟艳霞 (1986—), 女, 从事柔性空间机械臂动力学建模、非线性控制等的研究, E-mail: zhaiyanxia06@163.com;

胡庆雷 (1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事容错控制、航天器姿态控制等的研究, E-mail: huqinglei@hit.edu.cn;

徐梁 (1988—), 男, 硕士研究生, 从事空间机械臂动力学建模、非线性控制等的研究, E-mail: xuliang.hit@gmail.com;

霍星 (1964—), 男, 博士研究生, 副教授, 从事航天器姿态容错控制、卫星姿态控制等的研究, E-mail: hmyi888@163.com.