

基于自适应神经网络的柔性关节空间机器人 振动抑制控制

沈金森^{1,2,3}, 游张平^{1,3,4,6}, 张文辉^{2,3,4,6}, 叶晓平^{3,4,6}, 周书华⁵, 单以才²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310000; 2. 南京晓庄学院电子工程学院, 江苏 南京 211171;
3. 丽水学院工学院, 浙江 丽水 323000; 4. 浙江省文创产品数字化设计与智能制造重点实验室, 浙江 丽水 323000;
5. 浙江经济职业技术学院汽车工程学院, 浙江 杭州 310018; 6. 浙江省航空航天金属导管塑性成形技术与装备重点
实验室, 浙江 丽水 323000)

摘 要: 针对存在负载变化、建模误差和摩擦干扰的柔性关节空间机器人控制问题, 提出了基于奇异摄动的神经网络自适应鲁棒控制方法。首先, 通过拉格朗日方程和动量矩守恒定理建立柔性关节漂浮基空间机器人动力学模型; 其次, 通过奇异摄动理论将动力学模型近似分解表征为刚性的慢变子系统和柔性的快变子系统, 针对于慢变子系统, 设计基于神经网络补偿的自适应鲁棒控制器; 针对于快变子系统, 设计柔性补偿器和力矩微分反馈抑制器; 最后, 基于李雅普诺夫理论证明了控制系统的稳定性。仿真表明: 所提出的控制策略是有效的, 且在柔性补偿器失效的情况下, 采用独立的神经网络自适应鲁棒控制器能够抑制弹性振动, 并精确跟踪期望轨迹。

关键词: 空间机器人; 负载变化; 柔性关节; 神经网络; 振动抑制; 自适应控制

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.06.003

Vibration Suppression Control of Space Robot with Flexible Joints Based on Adaptive Neural Network

SHEN Jinmiao^{1,2,3}, YOU Zhangping^{1,3,4,6}, ZHANG Wenhui^{2,3,4,6}, YE Xiaoping^{3,4,6},
ZHOU Shuhua⁵, SHAN Yicai²

(1. School of Machinery and Automatic Control, Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 2. College of Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, Jiangsu, China; 3. College of Engineering, Lishui University, Lishui 323000, Zhejiang, China; 4. Key Laboratory of Digital Design and Intelligent Manufacturing for Creative Cultural Products of Zhejiang Province, Lishui 323000, Zhejiang, China; 5. College of Automotive Engineering, Zhejiang Technical Institute of Economics, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 6. Key Laboratory of Aerospace Metal Tube Forming Technology and Equipment of Zhejiang Province, Lishui 323000, Zhejiang, China)

Abstract: A neural network adaptive robust control method based on singular perturbation is proposed to solve the problem of flexible joint space robot control with load variation, modeling error, and friction disturbance. First, the Lagrange equation and the law of moment conservation are used to establish the dynamics model of free-floating space robot with flexible joints. Second, the singular perturbation theory is used to approximately decompose the dynamics model into a rigid slow subsystem and a flexible fast subsystem. An adaptive robust controller based on neural network compensation is designed for the slow subsystem, and a flexible compensator and a torque differential feedback suppressor are designed for the fast subsystem. Finally, the stability of the control system is proved based on the

收稿日期: 2022-03-10; **修回日期:** 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61772247); 浙江省自然科学基金(LZ21F020003, LY20E050002); 南京晓庄学院高层次项目(2020NXY14)

作者简介: 沈金森(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性机器人振动抑制。

通信作者: 张文辉(1980—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为机器人动力学与控制。

Lyapunov theory. The simulation results show that the proposed control strategy is effective, and the independent neural network adaptive robust controller can suppress the elastic vibration and track the desired trajectory accurately even when the flexible compensator fails.

Key words: space robot; load variation; flexible joint; neural network; vibration suppression; adaptive control

0 引言

随着人类对太空探索的日益深入,空间机器人正扮演着越来越重要的角色^[1-4]。当前国内外学者针对空间机器人的研究主要集中在刚性关节空间机器人,而对考虑关节柔性的空间操作臂研究较少^[5]。实际上,空间机器人在抓取目标载荷时,关节柔性能够吸收抓取时的碰撞能量,保护执行机构。但关节柔性产生的弹性振动容易导致关节处电机转角和臂杆转角无法同步,从而产生转角误差,严重影响控制器的控制精度^[6-9]。

针对此类问题,近年来部分国内外学者也进行了一些有益的探索,并取得了一些研究成果^[10-11]。梁捷等^[12]针对柔性关节-柔性臂空间机器人控制问题,提出了一种神经网络自适应的反演控制方法,设计了径向基函数神经网络(Radial Basis Function Neural Network, RBFNN)控制器来补偿模型误差。YEN等^[13]针对柔性关节机器人的轨迹跟踪控制问题,设计了一种基于自适应神经网络的控制器,该控制器能够保证闭环系统最终有界。谢立敏等^[14]针对柔性关节机器人控制问题,设计了基于反演的鲁棒控制器,但该控制方法需要空间机器人精确的动力学模型。洪昭斌等^[15]针对弹性关节机器人提出了基于神经网络的鲁棒控制方法,通过神经网络补偿系统模型中的未知不确定,无需精确的数学模型。YANG等^[16]针对不匹配不确定性系统,提出了基于非线性扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)的滑模控制策略,该控制器的滑模面切换增益是基于扰动误差的界来设计,能够较好地抑制弹性振动。ZHAN等^[17]针对柔性关节空间机械臂存在关节刚度不确定,提出了一种基于扩展状态观测器的自适应控制策略,该控制器通过神经网络来补偿未知非线性。上述研究成果对考虑关节柔性的空间机器人高精度控制提供了思路。

考虑到当前测量水平和空间环境的复杂性,针对含建模误差、外界干扰以及负载变化的柔性关节空间机器人控制问题,提出基于奇异摄动的神经网络控制方法。首先,基于拉格朗日方程和动量矩守恒定理,建立柔性关节漂浮基空间机器人动力学模

型;其次,基于奇异摄动理论将动力学模型近似分解为表征为刚性的慢变子系统和表征为柔性的快变子系统,针对于慢变子系统,设计基于神经网络补偿的自适应控制器,针对于快变子系统,设计柔性补偿器和基于力矩微分的反馈控制器;最后,基于李雅普诺夫理论证明控制系统的全局渐进稳定。

1 漂浮基柔性关节空间机械臂动力学建模

带柔性关节的自由漂浮平面二连杆空间机械臂结构如图1所示。整体主要由空间机器人基座 B_0 、连杆 (B_1, B_2) 、柔性关节转动铰 $(O_1$ 和 $O_2)$ 以及未知末端载荷 P 组成。建立平动惯性坐标系 OXY 。

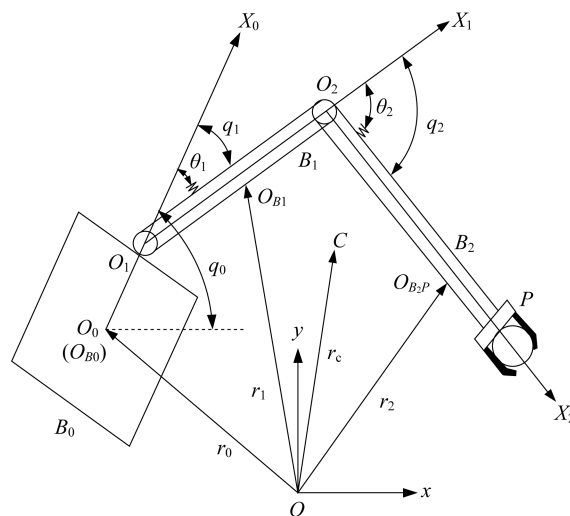


图1 漂浮基柔性关节空间机械臂系统

Fig. 1 Floating flexible joint space manipulator system

根据假设^[18],将柔性关节简化为刚度为 k_i 的线性弹簧,如图2所示。从图2可以看出,在弹簧弹性力的作用下,驱动电机转子的转动角度 θ_i 和机械臂转动的角度 q_i 不一致,存在转角误差 Δ_i ,即 $\Delta_i = \theta_i - q_i$,如果忽略转角误差,会使误差一直叠加,对控制精度有着严重的危害。

无外力作用的自由漂浮无根多体系统对惯性坐标系 (OXY) 遵守动量和动量矩守恒,同时考虑空间机器人负载变化造成不确定建模误差、关节摩擦

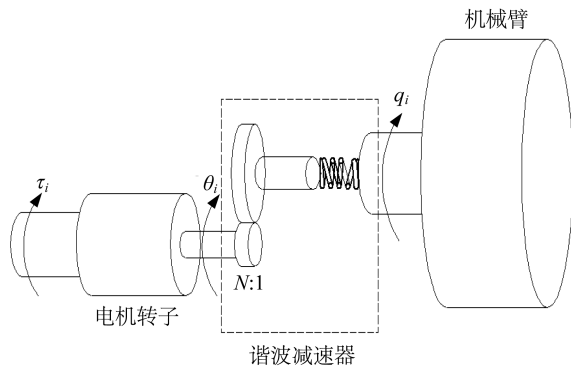


图2 柔性关节简化弹簧模型

Fig. 2 Flexible joint Simplified spring model

和外界干扰等未知不确定因素,结合拉格朗日第二类方程,推导出系统完全驱动形式动力学方程为

$$K(\theta - q) = \tau \quad (1)$$

$$J_\theta \ddot{\theta} + \tau = \tau_m \quad (2)$$

$$D(q_0, q) \ddot{q} + H(q_0, q, \dot{q}, \dot{\theta}) + \xi - \tau = 0 \quad (3)$$

式中: q_0 为基体姿态角; $q = [q_1 \ q_2]^T$ 、 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ 为电机转子转角; $K = \text{diag}(\mu_1, \mu_2)$ 为柔性关节刚度系数矩阵; $J_\theta = \text{diag}(J_{\theta 1}, J_{\theta 2})$ 为电机转子对角矩阵; $D(q_0, q) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为对称正定惯量矩阵; $H(q_0, q, \dot{q}, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 为包含科氏力、离心力的列阵量; $\tau \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 为关节驱动力矩输出列向量; $\tau_m = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ 为电机输出力矩; ξ 为一个未知不确定项。

针对式(1)~式(3)柔性关节空间机器人动力学模型,为了使奇异摄动理论应用推广,设计其关节电机控制器输出为

$$\tau_m = \tau_f + K_z \tau_z \quad (4)$$

式中: τ_z 为基于模型的控制器; $\tau_f = -K_c \tau$ 为引入的关节柔性补偿器; $K_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为正定矩阵; $K_z = K_c + I$, I 为 2 阶单位矩阵。

联立式(1)~式(3),可得

$$J_\theta K_c^{-1} \ddot{\tau} + \tau = \tau_z - K_z^{-1} J_\theta \ddot{q} \quad (5)$$

式中: $K_e = K K_z$ 为等效刚度矩阵。显然,增大 K_c 可提高系统等效刚度 K_e 。

控制目标不仅是跟踪关节期望轨迹,减小跟踪误差,而且需要抑制柔性关节产生的弹性振动。为了实现控制目标,采用奇异摄动法将系统分为快、慢变子系统。对快慢子系统分别设计控制器,其中慢变子控制器 τ_{zs} 保证跟踪关节期望轨迹,而快变子

系统控制器 τ_{zf} 抑制系统产生的弹性振动,则控制器设计为

$$\tau_z = \tau_{zs} + \tau_{zf} \quad (6)$$

考虑到关节误差是由于关节电机转子转角与臂杆转角之间的弹性振动造成的,因此基于力矩微分的反馈控制思想,设计基于力矩微分的反馈控制器(Moment Difference Feedback Controller, MDFC):

$$\tau_{zf} = -\epsilon_0 K_{z_2} \dot{\tau} \quad (7)$$

式中: $K_{z_2} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 为正定对角矩阵; ϵ_0 为一极小正常数。

将式(6)和式(7)代入式(5)整理可得

$$\epsilon_0^2 J_\theta \ddot{\tau} + \epsilon K_{z_1} K_{z_2} \dot{\tau} + K_{z_1} \tau = K_{z_1} (\tau_{zs} - K_z^{-1} J_\theta \ddot{q}) \quad (8)$$

式中: $K_e = \frac{K_{z_1}}{\epsilon_0^2}$ 。当 $\epsilon_0 \rightarrow 0$ 时,则 $K_e \rightarrow \infty$, 即此时关节等效为刚性关节,即 $\theta_i = q_i, \ddot{\theta}_i = \ddot{q}_i$ 。

联立式(3)、式(5)和式(7),则等效刚性的空间机器人模型为

$$M(q_0, q) \ddot{q} + C(q_0, q, \dot{q}) \dot{q} + \xi = \tau_{zs} \quad (9)$$

式中: $M(q_0, q) = D(q_0, q) + K_z^{-1} J_\theta$ 为对称正定矩阵; $C(q_0, q, \dot{q})$ 为 $H(q_0, q, \dot{q}, \dot{\theta})$ 中 $\dot{\theta}_i = \dot{q}_i$ 的新向量。

等效刚性的空间机器人模型式(9)具有如下性质^[19]:

性质1 $M(q_0, q)$ 为对称正定矩阵。

性质2 通过适当地选取 $C(q_0, q, \dot{q})$, 可使矩阵 $x^T (\dot{M}(q_0, q) - 2C(q_0, q, \dot{q})) x = 0$ 。

由于 ξ 是负载变化造成的建模误差、关节摩擦和外界干扰等不确定项之和,为便于分析,将 ξ 分解为表征负载变化造成的建模误差项 $P(q_0, q, \dot{q}, \ddot{q})$, 表征关节摩擦和外界干扰的不确定项 $F(q, \dot{q})$ 。则

$$M(q_0, q) \ddot{q} + C(q_0, q, \dot{q}) \dot{q} + F(q, \dot{q}) + P(q_0, q, \dot{q}, \ddot{q}) = \tau_{zs} \quad (10)$$

这里 $P(q_0, q, \dot{q}, \ddot{q})$ 可以写成如下形式:

$$P(q_0, q, \dot{q}, \ddot{q}) = e_D + e_C \quad (11)$$

式中: $e_D = M(m_{nc}, q_0, q) \ddot{q} - M(m_n, q_0, q) \ddot{q}$; $e_C = C(m_{nc}, q_0, q, \dot{q}) \dot{q} - C(m_n, q_0, q, \dot{q}) \dot{q}$; m_n 为初始质量; m_{nc} 为变化后的质量。

2 基于神经网络的自适应鲁棒控制系统设计

设计控制系统如图3所示。

$[c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jm}]$ 为第 j 个节点的中心矢量; σ_j 为节点 j 的基函数宽度。

根据 RBF 神经网络的逼近能力, 可以做出如下假设^[20]:

假设 1 最优权值 W^* 有界, 即存在正常数, 满足 $\|W^*\| \leq W_M$ 。

假设 2 存在最优权值 W^* , 使得误差 $\epsilon(x)$ 满足 $\|\epsilon(x)\| \leq \epsilon_M$, ϵ_M 为任意小的正数。

考虑到 RBF 神经网络并不一定能够获得最优输出, 设它的实际输出为 $\hat{f}$, 则

$$\hat{f}(x) = \hat{W}^T \varphi(x) \quad (26)$$

式中: $\hat{W}$ 为神经网络实际权值矩阵。

由式(24)及式(25)可得神经网络对误差模型总的模型逼近误差为

$$\tilde{f} = f - \hat{f} = W^{*T} \varphi + \epsilon - \hat{W}^T \varphi = \tilde{W}^T \varphi + \epsilon \quad (27)$$

式中: $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$; φ 是高斯基函数。

为了消除模型逼近误差 $\tilde{f}$ 的影响, 保证系统稳定, 设计鲁棒控制器为 τ_v , 则控制律式(19)重新修正为

$$\tau_{zs}^3 = \hat{M}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{F} + \hat{P} + \hat{f} - K_D s - \tau_v \quad (28)$$

$$\tau_v = K_v \text{sgn}(s) \quad (29)$$

式中: K_v 为正对角阵。

设计神经网络权值自适应律为

$$\dot{\hat{W}} = -\gamma_0 \varphi s^T \quad (30)$$

式中: γ_0 为正对角阵。

2.1.3 系统稳定性分析

定理 对于空间机器人动力学模型式(10), 采用控制律式(28)、神经网络自适应律式(30)、鲁棒控制器式(29), 能够保证控制系统全局渐进稳定。

证明

定义如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^T M s + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T \gamma_0^{-1} \tilde{W}) \quad (31)$$

对 V 两边微分

$$\dot{V}(t) = -s^T [\tilde{M}\ddot{q}_r + \tilde{C}\dot{q}_r + \tilde{F} + \tilde{P} + \tilde{f} + K_D s + K_v \text{sgn}(s)] + \text{tr}(\tilde{W}^T \gamma_0^{-1} \dot{\tilde{W}}) \quad (32)$$

将式(27)、式(28)代入式(32)中, 可得

$$\dot{V} = -s^T [f - \hat{f} - K_D s + K_v \text{sgn}(s)] + \text{tr}(\tilde{W}^T \gamma_0^{-1} \dot{\tilde{W}}) \quad (33)$$

那么将最小接近误差分别表示为

$$h = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) - \hat{f}(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \quad (34)$$

式中: $K_v = \text{diag}[k_{1M}, k_{2M}], k_{iM} \geq |h|, i = 1, 2$ 。

则

$$\dot{V} = -s^T K_D s - s^T [h + K_v \text{sgn}(s)] + \text{tr}(\tilde{W}^T (\gamma_0^{-1} \dot{\tilde{W}} + \varphi s^T)) + \text{tr}(\tilde{W}^T (\gamma_0^{-1} \dot{\tilde{W}} + \varphi s^T)) \quad (35)$$

将式(30)代入式(35)中, 在进行简化以后, 可以得到

$$\dot{V} = -s^T K_D s - s^T (K_v \text{sgn}(s) + h) \leq -s^T K_D s \leq -s^T K_D s \quad (36)$$

由于 K_D 是正定矩阵, 则

$$\dot{V} \leq 0 \quad (37)$$

由于 $\dot{V}$ 是负半定的, 且 K_D 是正定的, 则当 $\dot{V} \equiv 0$ 时, 有 $\dot{s} \equiv 0$, 从而 $\ddot{s} \equiv 0$ 。由 LaSalle 定理可知, $(e, \dot{e}) = (0, 0)$ 是受控机器人全局渐进稳定的平衡点。

3 仿真算例

自由漂浮双连杆空间机器人为模型来验证所提控制方案的有效性, 如图4所示。仿真时假设载荷 P 的质量 m_P 及转动惯量 J_P 为不确定参数, 其不确定的范围为 $0 \text{ kg} \leq \hat{m}_P \leq 1 \text{ kg}$, $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \leq \hat{J}_P \leq 0.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 真实值为 $m_P = 0.6 \text{ kg}$, $J_P = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。漂浮基柔性关节空间机器人参数见表1。

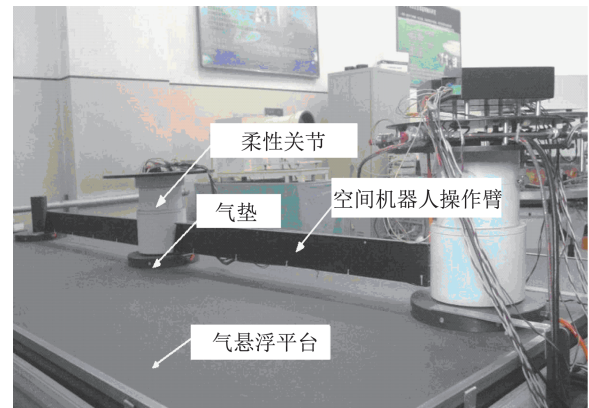


图4 微重力状态下的两连杆空间机器人

Fig. 4 Two-link space robot in microgravity

径向基函数网络隐层单元数目 $n = 20$, 网络初始权值、各基函数宽度及基函数中心在 $(0 \sim 0.01)$ 内随机选取。快变子系统速度误差系数均为 $K_{z_2} = \text{diag}[0.17 \quad 0.17]$ 。

表 1 2 自由度空间机器人参数

Tab. 1 Parameters of the 2-degrees of freedom space robot

参数	参数值	参数	参数值
臂杆 1 质心 a_1/m	0.5	臂杆 2 质心 a_2/m	0.4
基座 m_0/kg	120	基座质心 b_0/m	0.6
臂杆 1 m_1/kg	15	臂杆 1 长 b_1/m	1.0
臂杆 2 m_2/kg	10	臂杆 2 长 b_2/m	0.8
基座转动惯量 J_0	50	臂杆 1 转动惯量 $J_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	5
关节 1 电机转动惯量 $J_{\theta_1}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.0	臂杆 2 转动惯量 $J_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3
关节 1 电机转动惯量 $J_{\theta_2}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.0	刚度系数矩阵 $\mu_1 = \mu_2/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$	80

初始估计值: $\hat{M}=4, \hat{C}=2, \hat{F}=2, \hat{P}=1$ 。

关节摩擦及外界干扰为

$$F = [5q_1 + 3 \operatorname{sgn}(\dot{q}_1), 5q_2 + 3 \operatorname{sgn}(\dot{q}_2)]^T \quad (38)$$

空间机械臂两关节期望的轨迹为

$$\begin{aligned} q_{1d} &= -0.5 + 0.2 \cos \frac{\pi}{3} t \\ q_{2d} &= 0.5 + 0.2 \sin \frac{\pi}{3} t \end{aligned} \quad (39)$$

修正的滤波跟踪误差参数 $\mathbf{A} = \operatorname{diag}[5 \ 5]$; 控制器增益 $\mathbf{K}_v = \operatorname{diag}[50 \ 50]$, $\mathbf{K}_D = \operatorname{diag}[40 \ 40]$ 。RBFNN 学习参数 $\gamma_0 = \operatorname{diag}[10 \ 10]$ 。

柔性关节空间机械臂关节及电机转子初始值为

$$\begin{aligned} q_1(0) &= \theta_1(0) = 0 \\ q_2(0) &= \theta_2(0) = 0 \end{aligned} \quad (40)$$

3.1 基于神经网络的控制系统仿真分析

对本文进行仿真实验, 实验结果如图 5~图 8 所示。空间机械臂关节角位置轨迹跟踪曲线如图 5 所示, 空间机械臂关节与电机转子角位置误差如图 6 所示, 神经网络补偿误差如图 7 所示, 空间机械臂关节控制力矩如图 8 所示。

从图 5 中可以看出, 在初始值为 0 的情况下, 所设计的控制算法能够保证实际轨迹在 5 s 内准确跟踪期望轨迹, 关节与电机转子角位置误差在 5 s 内逐渐趋近于 0, 且波动幅度不大 (图 6)。由图 7 可以看出, 虽然存在负载变化、扰动及摩擦等非线性不确定情况, 但神经网络能够较好逼近建模误差, 实现对未建模非线性函数的大部分补偿。由图 8 可以看出, 控制力矩开始较大, 随着神经网络对非线性不确定函数的逼近, 控制力矩迅速减小。

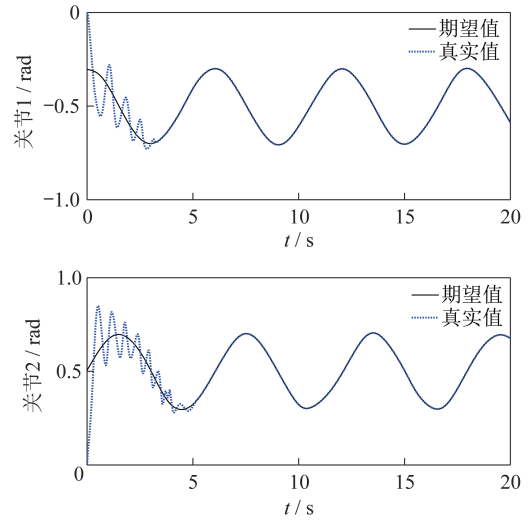


图 5 空间机械臂关节角位置轨迹跟踪曲线

Fig. 5 Tracking curves of the joint angle positions of the space manipulator

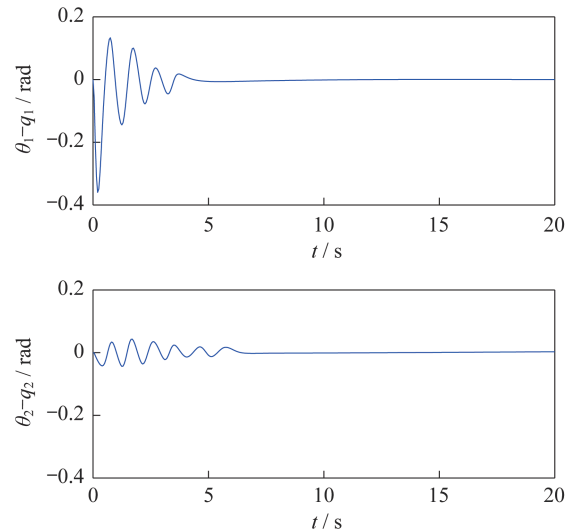


图 6 空间机械臂转角与电机转子位置误差

Fig. 6 Position error between the space manipulator angle and the motor rotor

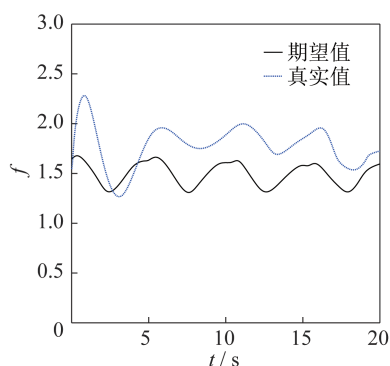


图 7 误差模型及其神经网络逼近

Fig. 7 Error model and its neural network approximation

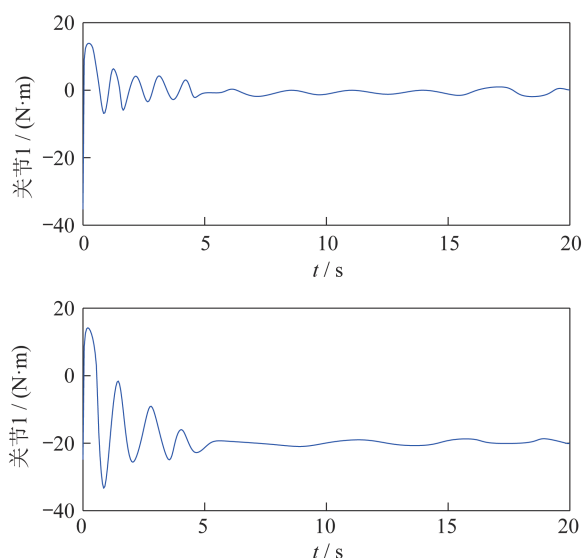


图 8 关节控制力矩

Fig. 8 Joint control torque

3.2 关闭 τ_{zf} 时控制系统仿真分析

同时关闭快变子系统控制器 τ_{zf} , 即在仅采用慢变子系统控制器的情况下, 分析控制效果的有效性。仿真结果如图 9~图 11 所示。

在关闭了快变子系统控制器后, 实际轨迹大约在 10 s 能够对期望目标进行准确跟踪(图 9), 控制效果变差。关节转角与电机转子角位置误差波动较为剧烈, 大约在 12 s 趋近于 0(图 10)。在关闭快变子系统控制器的情况下, 为抑制柔性关节的弹性振动, 控制力矩输出变大, 且波动明显, 约在 11 s 趋于稳定(图 11)。

3.3 关闭振动抑制器 τ_{zf} 和柔性关节补偿 τ_f

当同时关闭柔性补偿和振动抑制器后, 分析轨迹控制效果, 仿真如图 12 所示。

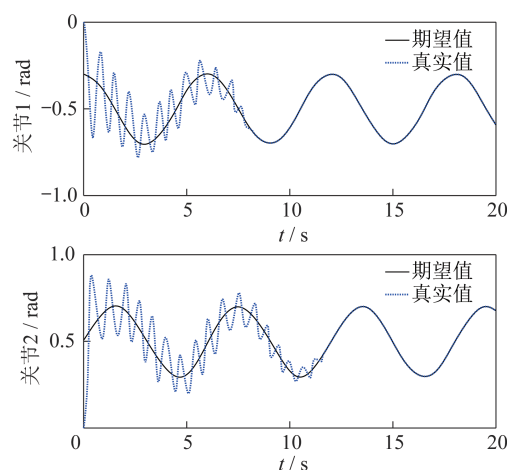


图 9 空间机器臂连杆转角轨迹跟踪

Fig. 9 Tracking curves of the joint angle positions of the space manipulator

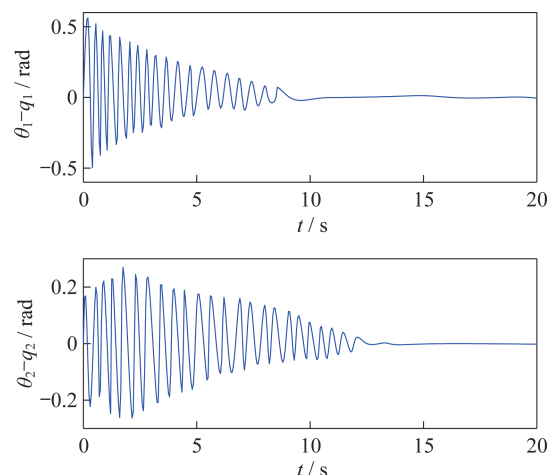


图 10 空间机械臂转角与电机转子位置误差

Fig. 10 Position error between the space manipulator angle and the motor rotor

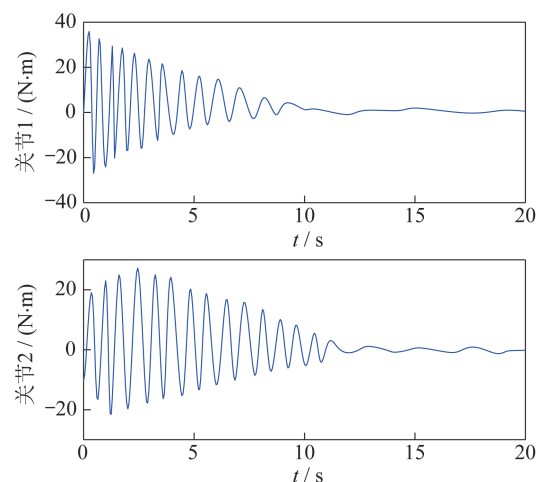


图 11 关节控制力矩

Fig. 11 Joint control torque

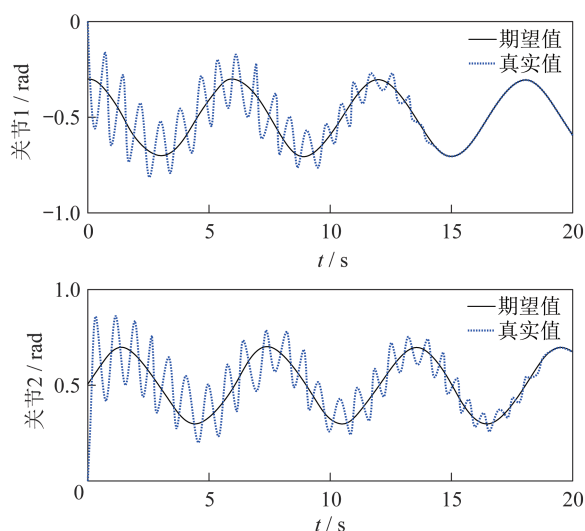


图 12 空间机器臂关节角位置轨迹跟踪曲线

Fig. 12 Tracking curves of the joint angle positions of the space manipulator

从图 12 中可以看出,同时关闭关节柔性补偿器和振动抑制器后,轨迹跟踪波动剧烈,经过长时间震荡后,大约在 18 s 能够精确跟踪期望轨迹。说明针对慢变子系统所设计的神经网络自适应鲁棒控制器对于弹性振动能够实现抑制效果,即使在柔性补偿器失效的情况下,依然能够达到较好控制精度。

4 结束语

针对存在负载变化、建模误差及摩擦干扰等不确定性的柔性关节空间机器人控制问题,提出了一种基于神经网络补偿的自适应鲁棒控制器。

1) 建立柔性关节自由漂浮空间机器人动力学模型,基于奇异摄动理论将空间机器人动力学模型分解为表征柔性特性的快变子系统模型和表征刚性特性的慢变子系统模型。

2) 针对快变子系统,设计基于力矩微分的反馈控制器和柔性补偿器来抑制柔性关节弹性振动;针对慢变子系统,设计神经网络控制器补偿系统中的未知非线性部分,设计鲁棒控制器消除逼近误差和外界扰动。基于 Lyapunov 稳定性理论证明了整个闭环系统的全局渐进稳定。

3) 仿真实验表明,所提出的控制策略能够获得较好控制效果,即使在柔性补偿控制器失效的情况下,所设计的神经网络自适应鲁棒控制器依然能够抑制弹性振动,准确跟踪期望轨迹。

参考文献

- [1] 肖余之,靳永强,陈欢龙,等.在轨服务若干关键技术研究进展[J].上海航天(中英文),2021,38(3):85-95.
- [2] CAI P, YUE X, WANG M, et al. Hierarchical motion planning at the acceleration level based on task priority matrix for space robot[J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 107(3): 2309-2326.
- [3] CHENG R, LIU Z, MA Z, et al. Approach and maneuver for failed spacecraft de-tumbling via space teleoperation robot system [J]. Acta Astronautica, 2021, 181(1): 30-35.
- [4] 柳强,金明河,刘宏,等.空间机器人最优能耗捕获目标的自适应跟踪控制[J].机器人,2022,44(1):77-89.
- [5] 王启生,蒋建平,李庆军,等.机器人组装超大型结构的姿-轨-柔耦合动力学仿真[J].上海航天(中英文),2022,39(2):32-38.
- [6] 王雪竹,李洪谊,王越超,等.柔性关节机器人高精度自适应反步法控制[J].信息与控制,2016,45(1):7-10.
- [7] 张文辉,陈浩文,闻志,等.面向未知目标的柔性关节空间机器人滑模控制[J].空间控制技术与应用,2021,47(3):49-57.
- [8] 李鹏飞,张银河,张蕾,等.考虑误差补偿的柔性关节机械臂命令滤波反步控制[J].控制理论与应用,2020,37(8):1693-1700.
- [9] ULRICH S, SASIADEK J Z. Extended Kalman filtering for flexible joint space robot control [C]// American Control Conference. IEEE, 2011:102-109.
- [10] LIU L, YAO W, GUO Y. Prescribed performance tracking control of a free-flying flexible-joint space robot with disturbances under input saturation[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(12): 10-16.
- [11] ZHANG Q, LIU X, CAI G. Dynamics and control of a flexible-link flexible-joint space robot with joint friction [J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2020, 765(4): 68-75.
- [12] 梁捷,陈力.柔性关节-柔性臂空间机器人的神经网络自适应反演控制及双重柔性振动抑制[J].计算力学学报,2014,31(4):8-12.
- [13] YEN H M, LI T, CHANG Y C. Adaptive neural network based tracking control for electrically driven flexible-joint robots without velocity measurements[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 1022-1032.
- [14] 谢立敏,陈力.具有柔性关节的漂浮基空间机械臂基于状态观测器的轨迹跟踪鲁棒反步控制及弹性振动抑制[J].机器人,2012,34(6):8-13.

(下转第 50 页)