

DOI: 10.7511/jslx20201005002

考虑摩擦特性的柔性关节空间机器人 自适应 CMAC 神经网络鲁棒控制

尤鑫焯*, 陈力

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

摘要: 讨论了关节摩擦力矩影响下, 具有柔性铰关节的漂浮基空间机器人系统的动力学控制问题。设计了基于高斯基函数的小脑神经网络(CMAC)鲁棒控制器和摩擦力矩补偿器。用奇异摄动理论对系统的动力学模型进行快慢变子系统分解, 针对快变子系统, 设计力矩微分反馈控制器来抑制机械臂关节柔性引起的振动; 对于慢变子系统, 设计了基于自适应 CMAC 神经网络鲁棒控制器以实现系统参数不确定情况下的关节轨迹跟踪, 并设计基于摩擦力上界的补偿器消除摩擦力矩影响。与传统的 CMAC 神经网络控制相比, 该控制器能有效改善非线性关节摩擦引起的迟滞问题, 具有快速准确跟踪期望轨迹的能力。运用 Lyapunov 稳定性理论证明了该控制器的稳定性, 仿真结果证明该方法有效。

关键词: 空间机器人; 柔性关节; CMAC; 非线性摩擦; 鲁棒控制

中图分类号: TP241; O231

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2022)02-0192-06

1 引言

随着宇航技术的发展, 人类的太空活动越来越频繁, 任务也更加复杂, 空间机器人在太空任务中也发挥着更为重要的作用。空间机器人能提高在轨任务的效率和执行能力, 降低了宇航员面临碎片和强辐射的风险, 因此空间机器人的建模与控制受到国内外学者的广泛关注^[1-3]。空间机器人在轨运行过程存在结构参数不确定、关节摩擦力矩和液体推进剂的晃动等扰动因素, 设计控制器时需考虑上述因素对机器人轨迹跟踪控制的影响。

谐波减速器的应用使得机器人关节具有一定的柔性, 使伺服电机转角和关节转角产生耦合, 易引起机械臂的抖振和系统响应迟滞的问题。针对机器人关节柔性特性的控制问题, 诸多学者进行深入研究^[4-8]。文献[9]研究了漂浮基柔性关节空间机器人操作未知载荷的控制及振动抑制问题, 设计了力矩微分反馈控制器来抑制机械臂各关节的柔性振动, 能用于关节刚度较小的空间机器人。

上述研究均未讨论关节摩擦力矩的影响, 机器

人关节摩擦具有复杂、非线性以及不确定性的特点, 其耦合作用会影响系统的稳态跟踪误差以及载体的姿态。系统静态性能表现出较大稳态误差或极限环震荡, 低速时出现爬行现象^[10]。文献[11]讨论了地面基单柔性关节机器人摩擦力矩影响下的控制问题, 将非线性摩擦因素表达为相对于名义模型的逆加性不确定性, 并设计了鲁棒控制器。文献[12]充分考虑了地面基柔性关节机器人控制中的各种影响因素, 通过前馈补偿确定性扰动和摩擦力线性部分, 通过反馈补偿摩擦力非线性部分、系统参数不确定性以及建模误差的影响。文献[13]研究了存在关节力矩输出死区和摩擦力矩的空间机械臂系统, 设计了基于高斯模糊基的自适应动态面控制, 实现载体姿态不受控工况下的关节轨迹跟踪控制, 但该方法依赖摩擦观测器实时估计不可测的内部摩擦状态。

基于上述研究, 本文结合奇异摄动法, 研究了柔性铰关节的漂浮基空间机器人存在关节摩擦力矩和结构不确定情况下的轨迹跟踪控制问题。基于奇异摄动法将系统分为快慢变子系统, 设计力矩微分控制器保证快变子系统的稳定性; 针对慢变子系统, 利用高斯基函数的小脑神经网络来逼近系统中不确定项, 设计基于标称动力学模型的鲁棒控制器和基于摩擦力上界补偿器来抵消关节摩擦力矩影响。通过李雅普诺夫理论证明了系统的稳定性,

收稿日期: 2020-10-05; 修改稿收到日期: 2021-02-16.

基金项目: 国家自然科学基金(11372273); 福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台(2014H21010011)资助项目。

作者简介: 尤鑫焯*(1995-), 男, 硕士。

(E-mail: 303084069@qq.com)

数值仿真校验了控制方案的有效性。

2 系统动力学模型

图1所示为本文研究的作平面运动的柔性关节空间机器人系统。由分体 $B_i(i=0,1,2)$ 和柔性铰关节组成, OXY 为惯性坐标系, $O_iX_iY_i(i=0,1,2)$ 为各分体连体坐标系。矢量 $r_i(i=0,1,2)$ 分别指向各分体的质心 $O_{ci}(i=0,1,2)$, r_p 指向末端载荷质心。

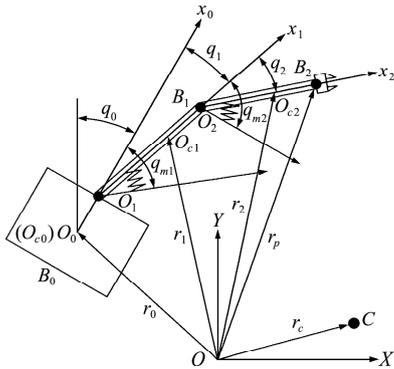


图1 柔性关节空间机器人
Fig.1 Flexible-joint space robot

机械臂关节一般由伺服电机、谐波或行星减速器和臂杆构成,如图2所示。参考Spong^[14]研究的柔性关节机械臂模型,简化成由电机和刚度系数为常数且无惯量的线性扭簧及臂杆构成的子系统。

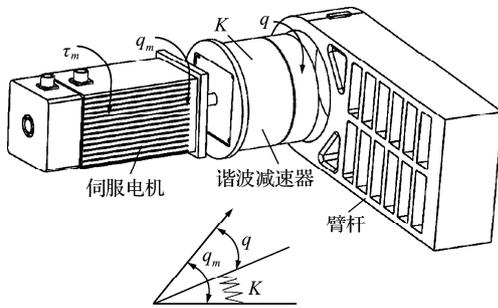


图2 柔性关节简化模型
Fig.2 Simplified model of flexible joint

空间机器人系统满足动量守恒定律,设系统初始动量为零,由拉格朗日第二类方程,可推导出此类空间机器人在无外力作用下、不考虑微弱的重力因素且载体姿态受控位置不控的系统动力学方程为

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta H = \begin{bmatrix} \tau_0 \\ K(\theta_m - \theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta}_m + K(\theta_m - \theta) = \tau_m \quad (2)$$

式中 $D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3}$ 为对称正定惯性矩

阵, $H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3}$, ΔH 为系统不确定

项; $q = [q_0 \ q_1 \ q_2]^T$, q_0 为载体姿态转角, $\theta = [q_1 \ q_2]^T$ 为机械臂关节转角向量, $\theta_m = [q_{m1} \ q_{m2}]^T$ 为电机转角向量。电机转动惯量表示为 $J = \text{diag}(J_1, J_2) \in R^{2 \times 2}$ 的对角和常值矩阵。 $K(\theta_m - \theta) \in R^{2 \times 1}$ 为作用于机械臂的控制力矩向量 τ , $\tau_m \in R^{2 \times 1}$ 为伺服电机实际产生的控制力矩向量, $K = \text{diag}(k_1, k_2) \in R^{2 \times 2}$ 为铰关节的刚度矩阵。

3 基于高斯基函数的小脑神经网络

CMAC神经网络算法简单且学习速度快的特点使其更适合机器人在线学习控制。传统的CMAC神经网络基函数为常值,只能记忆静态信息,且泛化性能较差。考虑使用高斯基函数作为神经网络基函数以逼近非线性的不确定项模块。基于高斯基函数的CMAC神经网络输入状态空间 $Z = [z_1, z_2, \dots, z_{n_a}]$,通过对 Z 的量化划分基函数的中心,输入样本 Z ,存储在记忆空间的相应权值激活,与基函数关联得到CMAC的输出,

$$y = W^T \Phi \quad (3)$$

式中 $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{n_b})^T$ 为接受域函数的列向量,且 $\Phi_j(z) = v_j b_j(z)$, v_j 为权值, $b_j(z)$ 表示为 $b_j(z) = \prod_{i=1}^{n_a} \varphi_{ij}(z_j)$, $\varphi_{ij}(z_j) = \exp\left(-\frac{(z_j - \mu_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right)$,其中 $\mu_{ij} = i(z_{j_{\max}} - z_{j_{\min}}) / N_k (i=0, 1, \dots, n_a - 1)$, $\sigma_{ij} = 2(z_{j_{\max}} - z_{j_{\min}}) / N_k$,取 $N_k = 200$ 。CMAC基函数连接权值矩阵 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]$,其中 $W_i = [W_{1i}, W_{2i}, \dots, W_{n_b i}] \in R^{n_b}$, W_{ki} 为第 i 个输出变量的第 k 个接受域权值。

权值 v_j 的修正率为

$$\Delta v_j = \alpha(\hat{y} - y)b_j(z) / M \quad (4)$$

式中 α 为学习率,取 $\alpha = 0.6$, \hat{y} 为式(3)计算输出值, y 为实际值, M 为 W 激活的权值个数。

4 控制器设计

柔性铰关节的空间机器人动力学模型由式(1, 2)表示,本节基于上述模型,考虑系统中的不确定项和关节摩擦特性的影响,设计基于高斯基函数的小脑神经网络和摩擦补力矩偿的鲁棒控制器,以实现系统在不确定项和关节摩擦力矩影响下对关节空间运动的轨迹跟踪。

4.1 基于柔性补偿的系统奇异摄动分解

由式(2)得控制力矩 τ 的动态方程为

$$JK^{-1}\ddot{\tau} + \tau = \tau_m - J\ddot{\theta} \quad (5)$$

选取电机控制输入为

$$\tau_m = K_r \tau_r + u_m \quad (6)$$

式中 $K_r = I + K_b$, $K_b \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 为对角正定补偿矩阵, I 为单位矩阵, $\tau_r \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 为待设计的控制输入量, $u_m = -K_b \tau$ 为引入的关节柔性补偿控制器^[9]。

将式(6)电机力矩输入代入式(5)可得

$$JK_e^{-1}\ddot{\tau} + \tau = \tau_r - K_r^{-1}J\ddot{\theta} \quad (7)$$

式中 $K_e = KK_r$ 为柔性补偿后的等效刚度矩阵。式(1,6)构成柔性补偿后的系统动力学模型。

设计控制输入量 τ_r 为

$$\tau_r = \tau_{rl} + \tau_{rf} \quad (8)$$

式中 $\tau_{rl} \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 为慢变子系统控制律, $\tau_{rf} \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ 为快变子系统控制律。

定义充分小的正常数 μ , 令 $K_e = K_{a1}/\mu^2$; 其中 $K_{a1} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 与慢变子系统中变量具有类似的数量级。则由式(5)可推出快变子系统方程,

$$\mu^2 J \ddot{\tau} + K_{a1} \tau = K_{a1} (\tau_{rl} - K_r^{-1} J \ddot{\theta}) + K_{a1} \tau_{rf} \quad (9)$$

设计力矩微分控制器 τ_{rf} 为

$$\tau_{rf} = -\mu K_{a2} K (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}) \quad (10)$$

式中 $K_{a2} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ 的选取应保证快变子系统的稳定。

令 $\mu = 0$, 将力矩微分控制器式(10)代入式(1), 可得慢变子系统方程为

$$\bar{D}(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta H = [\tau_o \quad \tau_{rl}]^T \quad (11)$$

式中 $\bar{D}(q) = \begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & \bar{D}_{12} \\ \bar{D}_{21} & \bar{D}_{22} \end{bmatrix}$, $\bar{D}_{11} = D_{11}$, $\bar{D}_{12} = D_{12}$, $\bar{D}_{21} =$

D_{21} , $\bar{D}_{22} = D_{22} + K_r^{-1}J$; 注意 $K_r^{-1}J$ 为常值矩阵, 故其对时间的一阶导数恒为零, 不难证明, 对于任意列向量 $z \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ 恒有 $2z^T H z = z^T \dot{D} z$ 。

4.2 慢变子系统基于摩擦力上界的CMAC鲁棒控制

由式(11)可知, 考虑摩擦力矩的慢变子系统动力学模型为

$$\bar{D}(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + \Delta H = \tau_{rln} - f \quad (12)$$

式中 $\tau_{rln} = [\tau_o \quad \tau_{rl}]^T$, f 为摩擦力矩矢量, 载体旋转不受外部摩擦力矩影响, 即 f 第一项 $f(1) = 0$ 。

关节静摩擦力矩具有强非线性特点, 当关节速度很小趋近零时, 关节处摩擦力矩较大, 当关节速度不为零时, 摩擦力矩较小, 考虑用图3所示非线性函数 $f(\dot{q})$ 来近似表示本文所研究关节摩擦特性。

摩擦力 $f(\dot{q})$ 未知, 上界 $\hat{f}(\dot{q})$ 已知, 可表示为

$$\hat{f}(\dot{q}) = \mu_s(\dot{q})\lambda(\dot{q}) + \mu_m(\dot{q})[1 - \lambda(\dot{q})] \\ |\mu_s(\dot{q})| \leq \gamma_s, \quad |\mu_m(\dot{q})| \leq \gamma_f \quad (13)$$

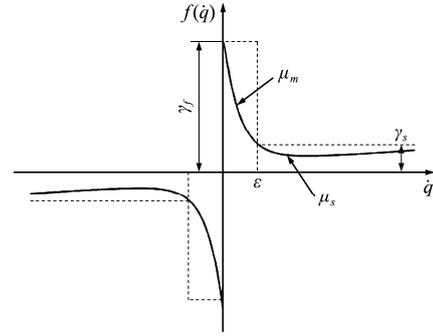


图3 关节摩擦特性

Fig. 3 Friction characteristics of joints

式中 μ_s 和 μ_f 分别为未知的静摩擦力和动摩擦力, γ_s 和 γ_f 分别为动摩擦力和静摩擦力上界, 且大于零, $\lambda(\dot{q})$ 为开关函数,

$$\lambda(\dot{q}_i) = \begin{cases} 1 & (|\dot{q}_i| > \epsilon) \\ 0 & (|\dot{q}_i| \leq \epsilon) \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

式中 ϵ 为充分小的正常数。

令 q_d 为系统期望轨迹, 则设计控制律如下,

$$\tau_{rln} = u + \bar{D}(q)\ddot{q}_d + H(q, \dot{q})\dot{q}_d \quad (15)$$

定义关节跟踪误差 $e = q - q_d$, 得系统误差方程为

$$\bar{D}(q)\ddot{e} + H(q, \dot{q})\dot{e} + \Delta H = u - f \quad (16)$$

定义状态变量如下,

$$\begin{cases} x_1 = e \\ x_2 = \dot{e} + e \end{cases} \quad (17)$$

用式(3)所示CMAC网络逼近系统不确定项得

$$\Delta H = \hat{W}^T \Phi + \epsilon_f \quad (18)$$

式中 \hat{W} 为CMAC基函数连接权值的逼近矩阵, ϵ_f 为逼近误差。

系统误差状态方程改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - x_1 \\ \bar{D}\dot{x}_2 = \bar{D}(x_2 - x_1) - H(x_2 - x_1) + u - f - \Delta H \end{cases} \quad (19)$$

将CMAC网络逼近误差 ϵ_f 看作扰动项, 证明控制器使系统满足L2增益条件, 需构造能量函数 V , 使得耗散不等式成立,

$$\dot{V} \leq \{\gamma^2 \|\epsilon_f\|^2 - \|z(t)\|^2\} \quad (20)$$

式中 $\gamma > 0$ 为干扰抑制水平因子, 评价信号 $Z = P_1 x_1$, 设计控制律 u 为

$$u = u_r + \hat{W}^T \Phi + u_f \quad (21)$$

式中 u_r 为跟踪误差补偿项, u_f 为摩擦力补偿项。各项表示为

$$\begin{cases} u_r = -\bar{D}(x_2 - x_1) - Hx_1 - x_1 - p_2 x_2 + \frac{1}{4\gamma^2} x_2 \\ u_f = -\lambda(\dot{q}) \operatorname{sgn}(x_2) \gamma_s - [1 - \lambda(\dot{q}) \operatorname{sgn}(x_2) \gamma_f] \end{cases} \quad (22)$$

如式(18)所示CMAC网络,设计自适应律为

$$\dot{\tilde{W}} = -\lambda x_2 \Phi^T \quad (23)$$

式中 $\lambda > 0$ 为常值。定义 $\tilde{W} = \hat{W} - W$, 选择函数(24)作为Lyapunov函数,

$$V = \frac{1}{2} x_1^T x_1 + \frac{1}{2} x_2^T \bar{D} x_2 + \frac{1}{2\lambda} \text{tr}(\tilde{W}^T \tilde{W}) \quad (24)$$

V对时间求导,由式(24)推导出

$$\begin{aligned} H = \dot{V} - (\gamma^2 \|\epsilon_f\|^2 - \|\zeta(t)\|^2) \leq & \\ & -\eta \|x_1\|^2 - P_2 \|x_2\|^2 + x_2^T \tilde{W} \Phi - \\ & \text{tr}(\Phi x_2^T \tilde{W}) + x_2^T (u_f - f) \leq \\ & -\eta \|x_1\|^2 - P_2 \|x_2\|^2 + x_2^T (u_f - f) \end{aligned} \quad (25)$$

式中 $\eta < 1 - P_1^2$ 为正的常数。

分析式(22)摩擦力补偿项 u_f , 可知式(25)有 $x_2^T (\mu_f - f) < 0$ 恒成立,故 $H < 0$ 成立,闭环系统 L_2 增益 $J_{L_2} < \gamma$ 。由李雅普诺夫稳定性定理可知,慢变子系统式(11)满足渐近稳定性条件。

5 仿真算例设计

对图1所示的柔性关节空间机器人系统进行数值仿真。假设部件质量均匀分布,质心位于其几何中心。系统实际参数如下,载体质量、转动惯量和质心距离分别为 $m_0 = 40 \text{ kg}$, $I_0 = 34.17 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_0 = 1.5 \text{ m}$;杆1质量、转动惯量和臂杆长度分别为 $m_1 = 2 \text{ kg}$, $I_1 = 1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_1 = 3 \text{ m}$,杆2质量、转动惯量和臂杆长度分别为 $m_2 = 1 \text{ kg}$, $I_2 = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $l_2 = 3 \text{ m}$ 。系统参数理论值如下,载体质量和转动惯量分别为 $m_{e0} = 41.5 \text{ kg}$, $I_{e0} = 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,杆1质量 $m_{e1} = 1.9 \text{ kg}$,杆2长度 $l_2 = 2.8 \text{ m}$,其余参数假设理论值和实际值一致。 $k_1 = k_2 = 100 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$; $J_1 = J_2 = 0.08 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。选取控制器参数 $P_1 = P_2 = 0.5$, $K_d = \text{diag}(50, 50, 50)$, $K_b = \text{diag}(65, 65)$, $\gamma = 1, \gamma_s = 2, \gamma_f = 4$, $K_{a1} = \text{diag}(0.05, 0.05)$, $K_{a2} = \text{diag}(25, 25)$,取 $\epsilon = 0.01$ 。

根据本文摩擦特性分析,选取Feeny等^[15]提出的一种连续性光滑静态摩擦律表示关节摩擦特性,

$$f(\dot{q}) = f_v \dot{q} + [f_c + f_{cs} \text{sech}(\beta \dot{q}) \tanh(\alpha \dot{q})]$$

式中 $f_v = 0.00986$ 为粘性摩擦因数, $f_c = 0.743$ 为库伦摩擦因数, $f_{cs} = 3.99$ 和 $\alpha = 3.24$ 构造Stribeck摩擦作用, $\beta = 0.799$ 保证方程在相对滑动速度为零时是连续的。系统初始构型 $q_0(0) = 0 \text{ rad}$, $q_1(0) = q_{m1}(0) = 0.22 \text{ rad}$, $q_2(0) = q_{m2}(0) = 0.79 \text{ rad}$,系统期望轨迹 $q_d = [q_{d0} \ q_{d1} \ q_{d2}]^T$, 其中

$$q_{d0} = \frac{\pi}{10}, q_{d1} = \frac{\pi}{8} - \sin \frac{\pi t}{3}, q_{d2} = \cos \frac{\pi t}{3} \text{ (单位:rad)}.$$

图4显示了未开启摩擦补偿 u_f 和开启摩擦补偿控制时,空间机器人系统的轨迹跟踪响应情况。可以看出未进行摩擦力补偿控制时,闭环系统等价于用自适应CMAC神经网络逼近由不确定项和摩擦力矩构成的总扰动项,而自适应CMAC神经网络的泛化能力有一定的局限性,无法很好地逼近包含静态摩擦特性的总扰动项,从图4(a)可以看出,在摩擦力矩耦合作用下,载体姿态难以维持期望的姿态角;从图4(b,c)可以看出,由于摩擦力矩的作用,关节角度跟踪存在明显的响应迟滞,实际轨迹明显滞后于期望轨迹,即 $|\dot{q}| \leq |\dot{q}_d|$, 出现平顶现象。开启基于摩擦力上界的补偿器 u_f 后,由补偿器抵消掉大部分摩擦影响,结合自适应CMAC神经网络逼近系统不确定项和摩擦补偿残余,柔性关节空间机器人系统能够较好地实现关节轨迹跟踪控制,维持预期的姿态角。

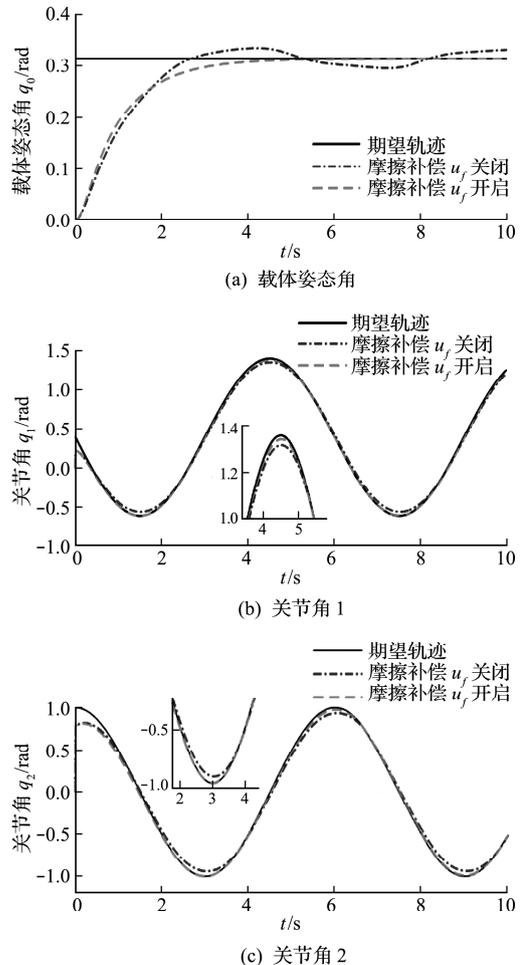


图4 空间机器人轨迹跟踪
Fig. 4 Trajectory tracking of space robot

6 结 论

讨论了关节摩擦力矩影响下,具有柔性铰关节和结构不确定性的漂浮基空间机器人系统控制问题。结合奇异摄动思想设计了快变子系统力矩微分控制器和慢变子系统基于摩擦补偿的自适应CMAC神经网络鲁棒控制器。仿真结果表明,所设计的控制器能够有效改善摩擦因素引起的响应迟滞问题,降低关节耦合作用对载体姿态角的影响。

相比于文献[11,13]设计的算法,本文设计的算法不依赖精确的摩擦模型和在线摩擦观测器,改善了传统CMAC网络控制的迟滞现象,能较好地实现柔性关节空间机器人的轨迹跟踪控制。控制器结构简单,计算量小,经适当扩充可应用于空间三维机器人实时轨迹跟踪控制。

参考文献(References):

- [1] Somov Y, Butyrin S, Somova T, et al. Control of a free-flying robot at preparation for capturing a passive space vehicle [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, **51**(30):72-76.
- [2] Wang C Q. Dynamic control of a free-floating flexible dual-arm space robotic system [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(10):196.
- [3] 雷荣华,陈力.空间机器人执行器自适应分散容错控制算法设计[J]. *计算力学学报*, 2019, **36**(4):477-482. (LEI Rong-hua, CHEN Li. Design of adaptive decentralized fault-tolerant control algorithm for space robot under partial loss of actuator effectiveness [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(4):477-482. (in Chinese))
- [4] Yeon J S, Park J H, Lee S H. Practical robust control for flexible joint robot manipulators[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, **41**(2):11769-11774.
- [5] 于潇雁,陈力.漂浮基柔性两杆空间机械臂的关节运动鲁棒控制与柔性振动最优控制[J]. *计算力学学报*, 2016, **33**(2):144-149. (YU Xiao-yan, CHEN Li. Robust joint motion control and vibration optimal control for a free-floating two-flexible-link space manipulator [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, **33**(2):144-149. (in Chinese))
- [6] Moberg S, Hanssen S. On feedback linearization for robust tracking control of flexible joint robots[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, **41**(2):12218-12223.
- [7] Jie L, Pei H, Li C, et al. Radial basis function neural network adaptive control of flexible-joint space robot [A]. 2018 Chinese Automation Congress (CAC)[C]. IEEE, 2018.
- [8] Murotsu Y, Tsujio S, Senda K, et al. Trajectory control of flexible manipulators on a free-flying space robot[J]. *IEEE Control Systems*, 1992, **12**(3):51-57.
- [9] 陈志勇,陈力.带有柔性补偿的柔性关节空间机器人的增广自适应控制及关节振动抑制[J]. *宇航学报*, 2013, **34**(12):1599-1604. (CHEN Zhi-yong, CHEN Li. Augmented adaptive control and joint vibration suppression for flexible-joint space robot with flexibility compensation [J]. *Journal of Astronautics* 2013, **34**(12):1599-1604. (in Chinese))
- [10] 刘金琨.机器人控制系统的设计与MATLAB仿真[M].北京:清华大学出版社,2008. (LIU Jin-kun. *Design and MATLAB Simulation of Robot Control System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [11] 陈健,葛连正,李瑞峰.考虑摩擦特性的机器人柔性关节鲁棒控制器设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015, **45**(6):1906-1912. (CHEN Jian-kang, GE Lian-zheng, LI Rui-feng. Design of robust controller for robot flexible joint with friction characteristic[J]. *Journal of Jilin University(Engineering Edition)*, 2015, **45**(6):1906-1912. (in Chinese))
- [12] 党进,倪凤雷,刘业超,等.基于新型补偿控制策略的柔性关节控制器设计[J]. *机器人*, 2011, **33**(2):150-155. (DANG Jin, NI Feng-lei, LIU Ye-chao, et al. Design for flexible joint controller based on a new compensation control strategy[J]. *Robot*, 2011, **33**(2):150-155. (in Chinese))
- [13] 黄小琴,陈力.漂浮基空间机械臂抗死区与摩擦的动态面控制[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2018, **46**(4):74-79. (HUANG Xiao-qin, CHEN Li. Dynamic surface control of anti-dead-zone and friction of free-floating space manipulator [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, **46**(4):74-79. (in Chinese))
- [14] Spong M W. Modeling and control of elastic joint robots[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1987, **109**(4):310-318.
- [15] Feeny B, Moon F C. Chaos in a forced dry-friction oscillator: Experiments and numerical modelling[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, **170**(3):303-323.

Adaptive CMAC neural network robust control for flexible joints space robot with friction characteristics

YOU Xin-ye*, CHEN Li

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The dynamic control of a floating space robot system with flexible joints under the influence of joint friction torques is discussed. A CMAC robust controller based on Gaussian basis function and friction torque compensator are proposed. The singular perturbation theory is used to decompose the dynamic model of the system into fast and slow subsystems. A torque differential feedback controller is designed for the fast subsystem to suppress the vibration caused by the joint flexibility of the manipulator. For the slow subsystem, a robust controller based on adaptive CMAC neural network is designed to realize the joint trajectory tracking under the condition of uncertain parameters of the system, and a compensator based on the upper bound of friction force is designed to eliminate the influence of friction torque. Compared with the traditional CMAC neural network control, the proposed controller can effectively improve the hysteresis problem caused by nonlinear joint friction, and has the ability to track the desired trajectory quickly and accurately. The stability of the controller is proved by Lyapunov stability theory. The effectiveness of the scheme is verified by the simulation results.

Key words: space robot; flexible-joint; CMAC; nonlinear friction; robust control

引用本文/Cite this paper:

尤鑫焯,陈力.考虑摩擦特性的柔性关节空间机器人自适应CMAC神经网络鲁棒控制[J].计算力学学报,2022,39(2):192-197.

YOU Xin-ye, CHEN Li. Adaptive CMAC neural network robust control for flexible joints space robot with friction characteristics[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(2): 192-197.