

柔性臂杆、柔性关节空间机械臂 T-S 模糊 轨迹跟踪及双柔振动并行综合控制

洪昭斌¹ 陈力² 李文望¹

1. 厦门理工学院, 厦门, 361024 2. 福州大学, 福州, 350108

摘要:针对存在参数不确定和外界干扰的柔性臂杆、柔性关节空间机械臂追踪期望运动的问题, 设计了基于 T-S 模糊模型的滑模鲁棒控制方案和双柔性振动并行控制方案。首先, 设计了关节柔性补偿器以提高系统的等效关节刚度。其次, 利用反馈线性化技术建立了系统追踪期望轨迹的误差动力学方程, 通过对系统 Lyapunov 稳定性证明来选择滑模控制参数; 简化并改进 T-S 模糊推理规则, 提出了模糊滑模鲁棒控制方法, 可解决滑模控制的抖振问题并具有计算量少、控制力矩小的优点。再次, 提出了柔性臂杆振动模态的直接反馈控制方案, 解决了双柔性并行综合控制的问题。最后, 运用逐步仿真的方法, 对比仿真结果, 证实了所设计轨迹跟踪、双柔性并行综合控制方案的有效性和稳定性。

关键词:空间机械臂; 柔性臂杆-柔性关节; 参数不确定; T-S 模糊滑模控制; 双柔性并行控制

中图分类号: TP241

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2016.15.006

T-S Fuzzy Trajectory Tracking and Double-flexible Parallel Control of Flexible-link Flexible-joint Space Manipulator

Hong Zhaobin¹ Chen Li² Li Wenwang¹

1. Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian, 361024

2. Fuzhou University, Fuzhou, 350108

Abstract: Aimed at the problems of flexible-link flexible-joint space manipulator with parameter uncertainties and external disturbances to track the desired motion, the T-S fuzzy control and double-flexible vibration parallel control were proposed. Firstly, a joint flexibility compensation controller was introduced to improve the equivalent stiffness of each joint. Secondly, the error dynamic equations were obtained based on feedback linearization in the trajectory tracking procedure, and control parameters of fuzzy control was selected by Lyapunov stability theory. Subsequently, the fuzzy sliding mode control was improved with simple T-S fuzzy rules. The great advantage of proposed control is free of undesirable chattering phenomenon in sliding mode control and light burden of computations. Then, the double-flexible parallel control was presented to suppress the vibration of flexible links. Finally, the simulation results on a space manipulator demonstrate the validity of the proposed control scheme.

Key words: space manipulator; flexible-link flexible-joint; parameter uncertainty; T-S fuzzy sliding mode control; double-flexible parallel control

0 引言

空间机器人^[1-3]可代替宇航员进行太空试验、探测、操作等活动, 对空间机器人进行动力学分析、

控制等研究是各国太空计划的重点领域。为了减小空间机器人的质量, 其机械臂杆件大多设计为轻质的细长柔性杆^[4-6], 这样的柔性杆通常具有较大的尺寸并产生低频的大幅值柔性振动, 系统刚柔耦合效应严重。同时, 在使用电机驱动机械臂杆时, 由于制造技术、齿轮及减速器的弹性等原因, 驱动

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2013J05021); 福建省科技计划重大重点项目(2012H0041); 福建省教育厅 A 类项目(JA15382)

[20] 强健. 带浮环的挤压油膜阻尼器特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[21] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[22] 顾家柳, 丁奎元, 刘启洲, 等. 转子动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

(编辑 陈勇)

作者简介:周海仑, 男, 1983 年生。沈阳航空航天大学航空航天工程学部副教授、博士。主要研究方向为挤压油膜阻尼器、转子动力学和航空发动机整机振动。冯国全, 男, 1967 年生。中国航空工业集团公司沈阳发动机设计研究所研究员。张明, 男, 1991 年生。沈阳航空航天大学航空航天工程学部硕士研究生。艾延廷, 男, 1963 年生。沈阳航空航天大学航空航天工程学部教授。

关节也呈现柔性^[7]的性质并产生弹性振动。因此,在针对空间机器人进行动力学分析、控制时,同时考虑其关节柔性、臂杆柔性对控制性能的影响具有重要的意义。然而,以上研究或者仅考虑了柔性关节对空间机器人轨迹跟踪精度的影响,或者仅解决了柔性杆振动模式的控制问题,同时解决关节柔性、臂杆柔性(双柔性)问题的研究也主要针对地面的机械臂系统^[8-9],或使用奇异摄动法^[10]来处理,这与大尺寸柔性空间机械臂产生高幅低频振动的实际情况不符。

在针对机器人的动力学控制中,许多学者提出了如自适应^[11]、鲁棒^[12]、神经网络^[6]等控制方法来解决参数不确定系统的轨迹跟踪问题,但所构建的控制器往往存在计算量偏大的缺点,实际应用非常困难。滑模变结构控制也可以解决参数不确定和外部干扰的系统轨迹追踪控制问题,具有很好的鲁棒性且计算量小,但是滑模变结构控制的最大缺点是系统控制输出在切换时有抖动。一般都认为,将神经网络或模糊控制与滑模变结构控制相结合可有效解决滑模控制中的抖振问题,基于此思路,很多研究人员也提出了多种控制方法,如文献^[13-14]分别利用模糊理论和自适应神经网络较好地消除了滑模变结构控制中力矩的抖振。但是模糊理论中合适的模糊规则设计非常困难,而神经网络的自适应学习计算量也非常大,均在实际应用中存在种种限制。

为了解决以上问题,本文利用拉格朗日第二类方程建立了柔性臂杆、柔性关节空间机械臂系统的动力学模型;对柔性关节刚度进行补偿以提高系统的等效刚度;利用反馈线性化技术导出空间机械臂系统追踪期望运动的误差动力学方程,并基于 Lyapunov 稳定性证明来选择滑模控制参数;建立 T-S 模糊逻辑模型,简化模糊推理规则,设计系统追踪期望轨迹的改进型 T-S 模糊滑模鲁棒控制方案;对柔性杆的柔性振动模式设计了直接反馈控制方案;最后,针对系统存在建模误差和外界干扰的情况,对平面二杆空间机械臂系统进行数值仿真分析。

1 双柔性空间机械臂系统动力学分析

不失一般性,对做平面运动的柔性臂杆、柔性关节空间机械臂系统展开研究,如图 1 所示。该系统由小卫星基 B_0 、刚性机械臂 B_1 及柔性臂 B_2 组成。为了简化处理,柔性臂 B_2 可视为欧拉-伯努利梁,仅考虑其前二阶主要柔性模态函数 $\eta = (\eta_1, \eta_2)^T$ 。刚性机械臂 B_1 与基体 B_0 、柔性臂 B_2

与刚性臂 B_1 之间采用柔性关节连接,这两处的柔性关节可视为刚度系数分别为 k_{m1} 、 k_{m2} 的无质量线性扭转弹簧。

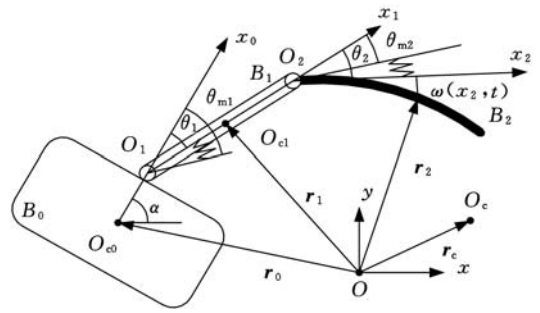


图 1 双柔性空间机械臂系统

分别建立图 1 所示基体、各机械臂杆的坐标系。 α 为基体的姿态, $\theta = (\theta_1, \theta_2)^T$ 为两个机械臂的实际转角, $\theta_m = (\theta_{m1}, \theta_{m2})^T$ 为各关节驱动电机的实际转角,由于扭簧的存在,机械臂与驱动电机的转角存在柔性误差。

由于该柔性臂杆、柔性关节空间机械臂处于太空,无外力作用,系统对惯性坐标系满足动量守恒关系。利用该动量守恒关系,并结合系统柔性臂的弹性应变能、柔性关节的弹性势能,由拉格朗日第二类方程可得到系统动力学方程:

$$D \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + C + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K\eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_d \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_\alpha \\ \tau_\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + \tau_\theta = \tau_m \quad \tau_\theta = K_m(\theta_m - \theta) \quad (2)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad K_m = \begin{bmatrix} k_{m1} & \\ & k_{m2} \end{bmatrix}$$

其中, $D(\alpha, \theta, \eta)$ 为系统基体、两个机械臂的质量矩阵; $C(\alpha, \theta, \eta, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{\eta})$ 为系统包含离心力和科氏力的列向量; K 为柔性臂的振动刚度矩阵; τ_d 为关节驱动电机的干扰驱动向量; τ_α 、 τ_θ 分别为基体姿态、机械臂关节的驱动输入力矩; τ_m 为关节电机的实际驱动力矩; J_m 为两个关节电机的转动惯量矩阵; K_m 为柔性关节的扭转刚度系数。

2 关节柔性刚度补偿控制输入设计

分析式(1)、式(2)的系统动力学方程发现,系统的机械臂关节存在柔性问题,这将对机械臂跟踪期望运动产生影响。本节针对系统的关节柔性补偿问题进行处理,设计关节柔性补偿器以提高柔性关节的等效刚度,最终提高基体及机械臂跟踪期望轨迹的精度。

对系统动力学方程式(2)进行改写,可得关节

驱动电机的力矩动态方程:

$$J_m K_n^{-1} \ddot{\tau}_\theta + \tau_\theta = \tau_m - J_m \ddot{\theta} \quad (3)$$

针对该动态方程,设计总的电机控制输入为

$$\tau_m = K_n \tau_n - K_\theta \tau_\theta \quad (4)$$

其中, τ_n 为后文待设计的系统轨迹跟踪、柔性模态控制方案, K_θ 为对角正定系数矩阵,若 K_n 选择为

$$K_n = I + K_\theta \quad (5)$$

将式(4)代入式(3),系统关节驱动电机的力矩动态方程则变为

$$J_m (K_n K_m)^{-1} \ddot{\tau}_\theta + \tau_\theta = \tau_n - K_n^{-1} J_m \ddot{\theta} \quad (6)$$

对比式(3)和式(6)可知,系统关节驱动电机的刚度得到了提升,且 K_θ 选择得越大, K_n 随之增大,系统的等效刚度也随之增大。所以,合适地选择 K_θ 可对系统关节的柔性进行补偿。

3 系统动力学反馈线性化

上文解决了系统机械臂关节驱动电机的柔性补偿问题后,为了设计系统基体、关节追踪期望运动的控制方案,系统动力学方程改写为

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_\alpha \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{d0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\theta_\alpha = [\alpha \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T$$

$$\tau_{d0} = [0 \quad \tau_d^T]^T \quad \tau_r = [\tau_{ar} \quad \tau_{nr}^T]^T$$

其中, D_{11} 为 D 的 3×3 分块子矩阵; D_{22} 为 2×2 子矩阵; $D_{12} = D_{21}^T$ 为 3×2 子矩阵; C_1 、 C_2 分别为 C 的三阶、二阶列向量; τ_{d0} 、 τ_r 分别为基体姿态、两个关节追踪期望运动的驱动力矩。利用式(7)可算出 $\ddot{\eta}$, 有

$$(D_{11} - D_{12} D_{22}^{-1} D_{21}) \ddot{\theta}_\alpha + C_1 - D_{12} D_{22}^{-1} (C_2 - K\eta) + \tau_{d0} = \tau_r \quad (8)$$

针对新的反映系统基体姿态、机械臂关节位置的 dynamics 方程,若该双柔性空间机械臂系统的期望运动轨迹为 $\theta_{\alpha D} = (\alpha_D, \theta_{1D}, \theta_{2D})^T$, 为了追踪该期望运动,可设计基于系统可准确建立模型的控制输入为

$$\tau_r = (\bar{D}_{11} - \bar{D}_{12} \bar{D}_{22}^{-1} \bar{D}_{21}) u + \bar{C}_1 - \bar{D}_{12} \bar{D}_{22}^{-1} (\bar{C}_2 - K\eta) \quad (9)$$

其中, \bar{D}_{11} 等加“ $\bar{\cdot}$ ”上标的量为利用系统已知部分建模得到的准确动力学方程相关矩阵, u 为滑模控制中待设计的控制输入。将该控制输入式(9)代入动力学方程式(8)并整理可得

$$\begin{aligned} & (D_{11} - D_{12} D_{22}^{-1} D_{21}) \ddot{\theta}_\alpha + C_1 - D_{12} D_{22}^{-1} (C_2 - K\eta) + \tau_{d0} \\ & = (\bar{D}_{11} - \bar{D}_{12} \bar{D}_{22}^{-1} \bar{D}_{21}) u + \bar{C}_1 - \bar{D}_{12} \bar{D}_{22}^{-1} (\bar{C}_2 - K\eta) \end{aligned}$$

进一步整理有

$$\ddot{\theta}_\alpha = u + f$$

其中, f 代表系统由于参数不确定所带来的建模误差、外界干扰所带来的控制误差等的综合不确定项。由此可知,若系统不存在结构上或非结构上的不确定参数、外界干扰以及控制输入误差,则 $f = 0$ 。

此时,定义系统追踪期望运动的角度误差和角速度误差分别为 $e = \theta_\alpha - \theta_{\alpha D}$ 、 $\dot{e} = \dot{\theta}_\alpha - \dot{\theta}_{\alpha D}$, 其中, $\dot{\theta}_{\alpha D} = (\dot{\alpha}_D, \dot{\theta}_{1D}, \dot{\theta}_{2D})^T$, 则系统的误差二阶动力学微分方程为

$$\ddot{e} = \ddot{\theta}_\alpha - \ddot{\theta}_{\alpha D} = u + f - \ddot{\theta}_{\alpha D} \quad (10)$$

利用此误差动力学方程,可进行经典的滑模控制设计。

4 滑模控制器设计

利用双柔性空间机械臂的误差动力学方程(10),设计滑模控制面为

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

式中, λ 为正定常值系数。

针对以上选定的滑模控制面,本节对控制向量 u 进行设计来保证系统追踪期望轨迹。在经典的滑模控制当中,可设计 u 为

$$u = u_{re} + u_s \quad (11)$$

其中,在滑动阶段,当 $S = 0$ 且 $\dot{S} = 0$ 时,保持控制 u_{re} 来使控制系统保持在滑模面上;在趋近阶段,即当 $S \neq 0$ 时,切换控制 u_s 设计来使控制系统满足到达条件,即 S 和 \dot{S} 的正负号不同。

所以,当控制系统处于滑模面上,有

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = 0$$

此时 $u_s = 0$, 将系统误差动力学方程式(10)代入上式, u_{re} 则可直接设计为

$$u_{re} = \ddot{\theta}_{\alpha D} - \lambda \dot{e} \quad (12)$$

为了进一步对切换控制向量 u_s 进行设计,选择以下 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 S_i^2$$

将 V 对时间求一阶导数并利用式(10)~式(12),可得

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^3 \dot{S}_i S_i = \sum_{i=1}^3 (\ddot{e}_i + \lambda \dot{e}_i) S_i$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^3 (u_{rei} + u_{Si} + f_i - \ddot{\theta}_{\alpha Di} + \lambda \dot{e}_i) S_i \\
 &= \sum_{i=1}^3 (u_{Si} S_i + f_i S_i)
 \end{aligned}$$

针对以上结果,为了满足 $\dot{V} < 0$, 设计以下切换控制:

$$u_{Si} = \begin{cases} -\eta_i & S_i > 0 \\ \eta_i & S_i < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

其中, η_i 为正定常数, 当 η_i 足够大时, 可抵消 f 的影响, 使 $\dot{V} < 0$ 恒成立。因此, 结合式(11)~式(13), 最终的控制输入可表述为

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i^+(t) = \ddot{\theta}_{\alpha Di} - \lambda \dot{e}_i - \eta_i & S_i > 0 \\ u_i^-(t) = \ddot{\theta}_{\alpha Di} - \lambda \dot{e}_i + \eta_i & S_i < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

5 T-S 模糊滑模鲁棒控制方案改进设计

利用 T-S 模糊逻辑来对上节所设计的滑模控制方案进行改进, 解决滑模控制抖振的问题, 并减小控制系统的计算量。一般地, 典型多输入-多输出 T-S 系统的模糊逻辑规则如下^[15]:

$$\begin{aligned}
 R^j : & \text{IF } x_1(t) \text{ is } M_{j1} \text{ and } \dots \text{ and } x_n(t) \text{ is } M_{jn} \\
 \text{THEN } & y_j(t) = z_j(\mathbf{X}(t), t), \quad j = 1, 2, \dots, r
 \end{aligned}$$

其中, R^j 代表第 j 个模糊规则, x_k 和 M_{jk} ($j = 1, 2, \dots, r$; $k = 1, 2, \dots, n$) 分别为系统的前件变量和模糊集, r 为系统的模糊规则数量。

对于系统的各个独立输入 $\mathbf{X}(t)$, 利用中心加权解模糊化推理, 可获得整个 T-S 系统的输出向量 $\mathbf{Y}(t)$:

$$\mathbf{Y}(t) = \frac{\sum_{j=1}^r \omega_j(\mathbf{X}(t)) z_j(\mathbf{X}(t), t)}{\sum_{j=1}^r \omega_j(\mathbf{X}(t))}$$

其中, $\mathbf{Y}(t) \in \mathbf{R}^r$, $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{R}^n$, 而利用直积法, 适用度函数 $\omega_j(\mathbf{X}(t))$ 可以定义为

$$\omega_j(\mathbf{X}(t)) = \prod_{k=1}^n M_{jk}(x_k(t)) \quad (15)$$

其中, $M_{jk}(x_k(t))$ 为 $x_k(t)$ 在模糊规则集 M_{jk} 中的隶属度, 适用度函数 $\omega_j(\mathbf{X}(t))$ 同时应满足

$$\sum_{j=1}^r \omega_j(\mathbf{X}(t)) > 0.$$

基于以上 T-S 模糊模型, 针对双柔性空间机械臂系统, 对系统基体姿态和关节角的三个控制器设计进行离散化处理。为了使模糊推理尽可能简单, 设计单个滑模反馈控制的模糊推理规则库为

$$\begin{aligned}
 R_1^i : & \text{IF } S_i(t) \text{ is positive} \\
 \text{THEN } & u_{i1}(t) = u_i^+(t)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_2^i : & \text{IF } S_i(t) \text{ is negative} \\
 \text{THEN } & u_{i2}(t) = u_i^-(t)
 \end{aligned}$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 。同样为了使控制系统更加简单, 模糊输入变量 S_i 的三角形隶属度函数选择如图 2 所示。

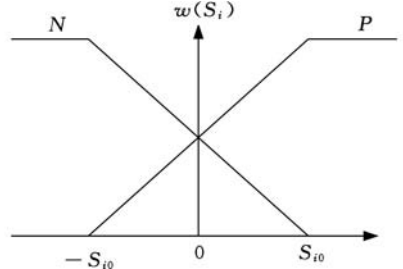


图 2 三角形隶属度函数

利用中心加权解模糊可得到最终的系统控制输入:

$$u_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^2 \omega_{ij}(S_i(t)) u_{ij}(t)}{\sum_{j=1}^2 \omega_{ij}(S_i(t))} \quad (16)$$

由此, 可分别得到系统载体姿态、两个关节铰的控制输入 $u_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$), 则系统的整体控制输入为这三个离散控制 $u_i(t)$ 的合成向量。由于所设计的滑模反馈控制的模糊推理规则仅有两条, 同自适应控制、神经网络控制等智能控制方法相比, 该系统控制输入将具有模糊规则简单、计算量小的显著优点。

6 柔性臂振动模态反馈控制

解决了关节柔性的补偿和基体姿态、机械臂关节的轨迹跟踪问题后, 本节仅考虑柔性臂振动模态对系统控制的影响。于是, 从系统动力学方程式(7)中可解出

$$\mathbf{D}_{22} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} = -\mathbf{D}_{21} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\alpha} - \mathbf{C}_2$$

若不考虑系统参数不确定的影响, 仅考虑系统的可精确建模模型, 则有

$$\bar{\mathbf{D}}_{22} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} = -\bar{\mathbf{D}}_{21} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\alpha} - \bar{\mathbf{C}}_2 \quad (17)$$

此时, 若式(17)中的 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\alpha}$ 满足

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{\alpha c} = \bar{\mathbf{D}}_{21}^* (\mathbf{K}_p \boldsymbol{\eta} + \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\eta}} - \bar{\mathbf{C}}_2) \quad (18)$$

其中, \mathbf{K}_p 、 \mathbf{K}_v 均为正定的控制参数, $\bar{\mathbf{D}}_{21}^*$ 为 $\bar{\mathbf{D}}_{21}$ 的 Moore-Penrose 伪逆。将式(18)代入式(17)可得

$$\bar{\mathbf{D}}_{22} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} = -(\mathbf{K}_p \boldsymbol{\eta} + \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\eta}})$$

更进一步地, 有

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} \mathbf{K}\boldsymbol{\eta} = -\bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} (\mathbf{K}_p \boldsymbol{\eta} + \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{\eta}}) \quad (19)$$

选择以下 Lyapunov 函数:

$$V_f = \frac{1}{2} \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} (\mathbf{K} + \mathbf{K}_p \mathbf{I}) \boldsymbol{\eta} + \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \dot{\boldsymbol{\eta}}$$

将上式对时间求导并利用式(18), 同时忽略

系统的参数变动,则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_f &= \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} (\mathbf{K} + K_p \mathbf{I}) \dot{\boldsymbol{\eta}} + \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \ddot{\boldsymbol{\eta}} \\ &= \boldsymbol{\eta}^T \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} (\mathbf{K} + K_p \mathbf{I}) \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}^T \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} (\mathbf{K}\boldsymbol{\eta} + K_p \dot{\boldsymbol{\eta}} + K_v \dot{\boldsymbol{\eta}}) \\ &= -\dot{\boldsymbol{\eta}}^T \bar{\mathbf{D}}_{22}^{-1} K_v \dot{\boldsymbol{\eta}} \end{aligned}$$

由于 $\bar{\mathbf{D}}_{22}$ 满足对称正定,合适地选择 K_p 、 K_v ,可保证 $\dot{V}_f < 0$,则式(19)可满足渐近稳定。为了生成可抑制柔性振动模式的载体姿态加速度、关节角加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{ac}$,针对柔性关节模式的直接反馈控制力矩可设计为

$$\boldsymbol{\tau}_f = \bar{\mathbf{D}}_{11} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{ac} + K_f \dot{\boldsymbol{\theta}}_{ac} \quad (20)$$

其中, $\dot{\boldsymbol{\theta}}_{ac}$ 可由式(18)的积分计算, K_f 为正的速度控制参数。系统用于追踪基体、关节角期望运动,并可抑制柔性杆振动模式的合成控制器为

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{\tau}_f \quad (21)$$

至此,该合成控制器(式(21))加上系统柔性关节刚度补偿控制可完成系统轨迹跟踪控制及柔性关节刚度补偿、柔性模式主动抑制的并行综合控制任务。

7 系统仿真分析

为了检验本文设计的综合控制器的性能,将所设计控制方案应用于图 1 所示的双柔性空间机械臂系统上。该机械臂系统的参数见表 1。

表 1 系统惯性参数表

B_0 质量 m_0 (kg)	40
B_1 质量 m_1 (kg)	2
B_2 密度 ρ (kg/m)	1
B_1 长度 l_1 (m)	3
B_2 长度 l_2 (m)	3
B_0 中心惯性张量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	35
B_1 中心惯性张量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	3
B_2 弯曲刚度 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	100
关节 1 刚度系数 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	100
关节 2 刚度系数 ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)	100
转子 1 转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.08
转子 2 转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.08

基体姿态及关节角的期望运动轨迹分别设置为

$$\begin{aligned} \alpha_D &= 0 \quad \theta_{1D} = 1.57 \left(\frac{t}{10} - \frac{1}{2\pi} \sin 0.2\pi t \right) \\ \theta_{2D} &= 1.57 \left(1 - \frac{t}{10} + \frac{1}{2\pi} \sin 0.2\pi t \right) \end{aligned}$$

其运动初始值取为 $\alpha(0) = 0.1 \text{ rad}$, $\theta_1(0) = 0.1 \text{ rad}$, $\theta_2(0) = 1.47 \text{ rad}$ 。仿真过程中,系统的惯性参数建模估计值取表 1 中真实值的 0.9,仿真时间 $t = 10 \text{ s}$,其他控制参数分别选择为 $K_\theta = 20$, $\lambda = 3$, $\boldsymbol{\eta} = (6 \ 2 \ 2)^T$, $K_v = K_p = 5$,机械臂关节的外界控制干扰设置为 $\boldsymbol{\tau}_d = (2\cos t, \sin t)^T$ 。为了

清楚地说明本文所设计控制方案的优点,整个仿真运算分以下三步进行。

(1)为了说明 T-S 模糊逻辑控制器的优势,不考虑柔性杆和柔性关节对控制系统的影响,先利用传统的滑模控制器(式(14))来对空间机械臂追踪期望运动进行控制,仿真结果如图 3 所示。图 3 显示了在式(14)控制方案控制时,系统控制输入力矩变化情况;若使用本文设计的 T-S 模糊滑模鲁棒控制方案,即利用式(16)对系统进行控制,系统的控制输入力矩如图 4 所示。通过对比控制输入力矩(图 3、图 4),发现应用 T-S 模糊滑模控制后,系统控制输入力矩的抖振情况有所缓解;更为重要的是控制输入力矩大幅减小,仅为原来的 1/10 左右,说明该控制方案还可有效解决控制器饱和的问题。因此,从实用的角度出发,本文所设计的控制方案更接近于工程实际应用。

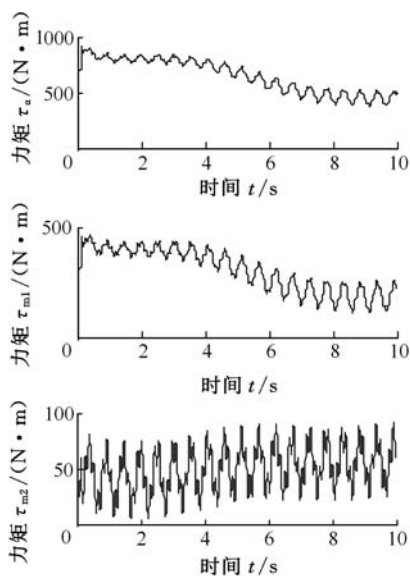


图 3 采用滑模控制时的控制输入

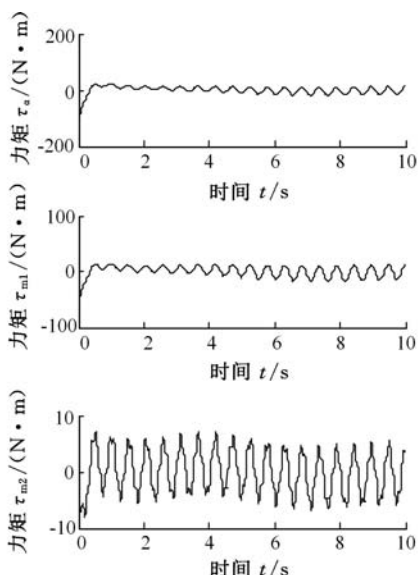


图 4 采用 T-S 模糊滑模控制时的控制输入

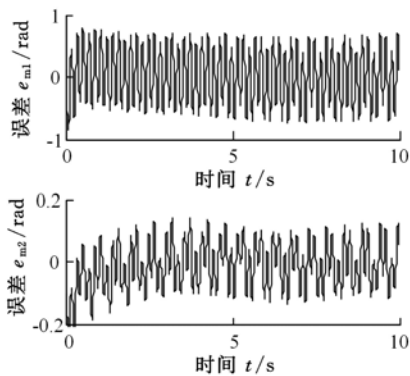


图 5 无柔性关节刚度补偿时的转角误差

(2)为了说明柔性关节刚度补偿的重要性,关闭了系统的柔性关节补偿控制,图 5 所示为两个驱动电机转角与机械臂杆实际转角的误差;当打开柔性关节刚度补偿时,图 6 所示为电机转角与臂杆转角的误差。从图 6 可以明显看出,本文所设计的关节刚度补偿可以很好地解决柔性关节存在时驱动电机与机械臂杆转角误差的问题,达到很好的控制精度。

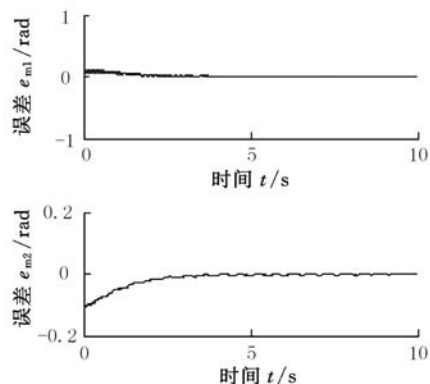


图 6 有柔性关节刚度补偿时的转角误差

(3)在对系统柔性关节刚度进行补偿后,通过切换柔性杆振动模式控制的输入,得到图 7~图 10 的仿真结果。图 7 所示为未对柔性杆振动进行控制时的柔性模式,图 8 所示为对柔性杆振动进行主动控制时的柔性模式,图 9、图 10 所示为系统追踪期望轨迹的最终跟踪情况。对图 7、图 8 进行对比,发现本文所设计的振动控制方案可有效地抑制柔性杆的振动模式,2 s 后柔性模式基本收敛于 0,避免了柔性杆振动对系统控制精度的影响。而图 9、图 10 则说明了所设计的综合控制方案可保证系统稳定、高精度地追踪其期望运动。

8 结论

(1)针对柔性臂杆、柔性关节空间机械臂系统存在外界干扰及系统参数不确定而导致的建模误差情况,本文结合反馈线性化和 T-S 模糊逻辑推

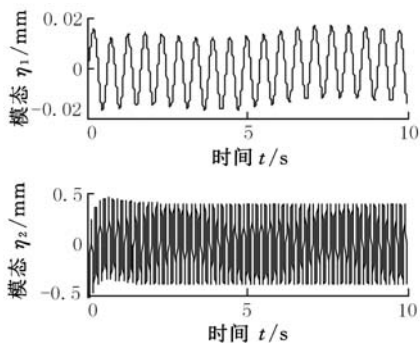


图 7 无柔性杆振动控制时的柔性模式

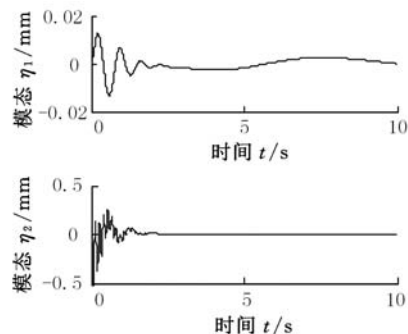


图 8 有柔性杆振动控制时的柔性模式

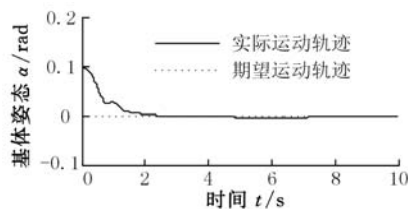


图 9 基体姿态追踪情况

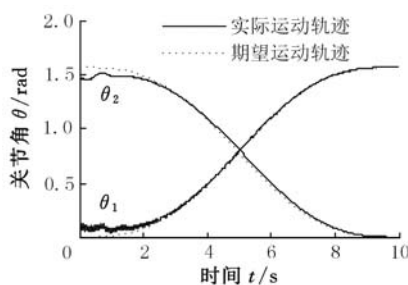


图 10 机械臂关节角追踪情况

理系统,设计了空间机械臂追踪期望运动的改进型 T-S 模糊滑模控制方案,大幅缓解了控制器饱和的问题,同时由于所设计的 T-S 模糊推理规则仅有两条,该控制方案不仅能解决参数不确定的问题,而且具有计算量小、便于实际应用的优点。

(2)针对系统柔性关节问题,设计了柔性关节刚度补偿控制方案,有效解决驱动电机实际转角与关节转角之间存在误差的问题;针对柔性臂杆的振动,设计了柔性模式直接反馈控制方案,对柔性振动模式进行主动控制,实现了双柔性并行控制。

(3)为了验证所设计综合控制方案的有效性,逐步对不同工况下的空间机械臂进行仿真分析,仿真结果表明,该 T-S 模糊滑模鲁棒控制方案可保证系统在同时存在参数变动及外界干扰的情况下仍能准确、稳定地追踪期望运动,解决了柔性关节和柔性臂杆的振动问题。

参考文献:

- [1] Review of United States Human Spaceflight Plans Committee, Seeking a Human Spaceflight Program Worthy of a Great Nation[R]. Washington D. C.: NASA, 2009.
- [2] Xu Wenfu, Liang Bin, Xu Yangsheng. Survey of Modeling, Planning, and Ground Verification of Space Robotic Systems [J]. Acta Astronautica, 2011, 68(68): 1629-1649.
- [3] Coleshill E, Oshinowo L, Rembala R, et al. Dextre: Improving Maintenance Operations on the International Space Station[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(9/10): 869-874.
- [4] 苏文敬, 吴立成, 孙富春, 等. 空间柔性双臂机器人系统建模、控制与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1098-1100.
Su Wenjing, Wu Licheng, Sun Fuchun, et al. Dynamics Modeling, Control and Simulation for Flexible Dual-arm Space Robot [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(8): 1098-1100.
- [5] 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.
- [6] Zhang Wenhui, Hu Xiaoping, Feng Yamin. Adaptive Control for Free-floating Space Flexible Robot Based on Fuzzy CMAC[J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(1): 141-149.
- [7] Ulrich S, Sasiadek J Z. Extended Kalman Filtering for Flexible Joint Space Robot Control[C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference. Piscataway: IEEE, 2011: 1021-2016.
- [8] Shihabudheen K V, Jacob J. Composite Control of Flexible Link Flexible Joint Manipulator[C]//2012 Annual IEEE India Conference, Washington D. C.: IEEE, 2012: 827-831.
- [9] Vakil M, Fotouhi R, Nikiforuk P N. A New Method for Dynamic Modeling of Flexible-link Flexible-joint

Manipulators[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2012, 134(1): 14503-14513.

- [10] 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): 459-466.
Liang Jie, Chen Li. Neural Network Adaptive Backstepping Control and Double Flexible Vibration Active Hierarchical Suppression of Space Robot with Flexible-joint and Flexible-link [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(4): 459-466.
- [11] 张福海, 付宜利, 王树国. 惯性参数不确定的自由漂浮空间机器人自适应控制研究[J]. 航空学报, 2012, 33(12): 2347-2354.
Zhang Fuhai, Fu Yili, Wang Shuguo. Adaptive Control of Free-floating Space Robot with Inertia Parameter Uncertainties[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(12): 2347-2354.
- [12] Guo Shengpeng, Li Dongxu, Meng Yunhe, et al. Reactionless Robust Finite-time Control for Manipulation of Passive Objects by Free-floating Space Robots[J]. Chin. Phys. B, 2014, 23(5): 347-354.
- [13] 刘希, 孙秀霞, 刘树光, 等. 非脆弱递归滑模动态面自适应神经网络控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1323-1328.
Liu Xi, Sun Xiuxia, Liu Shuguang, et al. Non-fragile Recursive Sliding Mode Dynamic Surface Control with Adaptive Neural Network[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(10): 1323-1328.
- [14] 洪昭斌, 陈力. 漂浮基双臂空间机器人系统的模糊神经网络自学习控制[J]. 机器人, 2008, 30(5): 435-439.
Hong Zhaobin, Chen Li. Fuzzy Neural Network Self-learning Control of Free-floating Dual-arm Space Robot System [J]. Robot, 2008, 30(5): 435-439.
- [15] Hyun C H, Park C W, Kim S. TS Fuzzy Model Based Indirect Adaptive Fuzzy Observer and Controller Design [J]. Inf. Sci., 2010, 180(11): 2314-2327.

(编辑 陈勇)

作者简介: 洪昭斌, 男, 1982 年生。厦门理工学院机械与汽车工程学院讲师、博士。主要研究方向为空间机器人动力学及控制。
陈力, 男, 1961 年生。福州大学机械工程及自动化学院教授、博士研究生导师。
李文望, 男, 1966 年生。厦门理工学院机械与汽车工程学院教授。