

控制与决策

Control and Decision

空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制

曾晨东, 艾海平, 陈力

引用本文:

曾晨东, 艾海平, 陈力. 空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(9): 2113–2122.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller
控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

[基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制](#)

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems
控制与决策. 2021, 36(5): 1040–1048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

[空间机器人捕获航天器操作的避撞柔顺复合自抗扰控制](#)

Collision avoidance and compliant composite active disturbance rejection control of space robot capture spacecraft
控制与决策. 2021, 36(2): 355–362 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0507>

[凸优化与A*算法结合的路径避障算法](#)

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm
控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

[基于免疫优化的平面Acrobot线性自抗扰鲁棒镇定](#)

Robust stabilization of planar Acrobot using linear active disturbance rejection control with immune optimization
控制与决策. 2020, 35(12): 3053–3058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0289>

空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出 反馈神经网络避撞柔顺控制

曾晨东, 艾海平[†], 陈力

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

摘要: 讨论漂浮基空间机器人双臂捕获非合作卫星过程避免关节冲击破坏的避撞柔顺控制问题, 提出在机械臂与关节电机之间加入一种旋转型串联弹性执行器 (rotatory series elastic actuator, RSEA) 作为柔顺缓冲机构, 其作用在于: 1) 捕获碰撞过程, 通过其内置弹簧的拉伸或压缩吸收捕获操作过程中被捕获卫星对空间机器人关节产生的冲击能量; 2) 捕获完成后的镇定过程, 利用设计与之配合的避撞柔顺控制策略保证关节冲击力矩限制在安全范围. 利用第二类拉格朗日方程推导得到捕获操作前含柔顺机构双臂空间机器人系统及目标卫星的各分体系统动力学模型; 基于系统动量守恒关系、系统运动几何关系及牛顿第三定律, 得到捕获操作后双臂空间机器人与被捕获卫星混合体系统综合动力学方程; 针对捕获操作后受碰撞影响而产生不稳定运动的混合体系统, 提出一种基于事件采样输出反馈的 RBF 神经网络避撞柔顺控制方案. 上述方案与柔顺机构相结合不仅能有效吸收被捕获卫星的冲击能量, 还能在冲击能量过大时应时开、关双臂空间机器人关节电机, 以防止关节电机发生过载和破坏. 通过李雅普诺夫稳定性理论证明系统的全局稳定性, 并通过仿真结果验证所提避撞柔顺控制方案的有效性.

关键词: 空间机器人; 双臂捕获卫星操作; 事件采样; RBF 神经网络; 避撞柔顺控制

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1754

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



引用格式: 曾晨东, 艾海平, 陈力. 空间机器人双臂捕获卫星操作的事件采样输出反馈神经网络避撞柔顺控制 [J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2113-2122.

Collision avoidance and compliance control based on event sampling output feedback neural network for space robot dual arm capture satellite operation

ZENG Chen-dong, AI Hai-ping[†], CHEN Li

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

Abstract: This paper studies the collision avoidance and compliant control for free-floating space robot double arm capture satellites, and a rotating series elastic actuator (RSEA) is proposed and adopted between the manipulator and the joint motor as a compliant mechanism. Its functions are as follows: 1) the impact energy of the captured satellite on the joint of a space robot can be absorbed by the deformation of the internal spring; 2) the joint impact torque can be limited to a safe range through combining with the collision avoidance compliant control scheme. The dynamic models of the space robot and the target satellite before capture are derived by using the second Lagrange equation. Then, based on the momentum conservation relationship, the kinematic geometry relationship and Newton's third law, the integrated dynamic model of the combined system is obtained. Finally, considering the post-capture unstable combined system, a kind of RBF neural network collision avoidance compliance control scheme based on the event sampling output feedback is proposed, which can not only effectively absorb the impact energy of the captured satellite, but also turn on and off the joint motor when the impact energy is too large. The global stability of the system is proved by Lyapunov stability theory, and the effectiveness of the proposed collision avoidance compliance control scheme is verified by simulation.

Keywords: space robot; double arm capture satellite operation; event sampling; RBF neural network; collision avoidance and compliance control

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372073); 福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台项目 (2014H21010011).

责任编辑: 方勇纯.

[†]通讯作者. E-mail: ahpwuhan@163.com.

0 引言

随着空间技术的发展,各航天大国发射的航天器日益增多,需要执行的航天任务也越来越复杂,利用空间机器人系统替代航天员执行航天任务可以大幅度降低探索空间的风险和成本,因此相关问题已受到诸多关注^[1-6].同时,为了适应航天任务复杂性、智能性的不断提高,双臂空间机器人系统正逐渐成为空间机器人捕获操作研究的重点^[7-12].

一般地,双臂空间机器人在轨捕获操作包含以下几个过程:1)观测过程,估计被捕获卫星姿态、速度等参数,完成空间机器人的路径规划;2)靠近过程,空间机器人按照规划路径接近被捕获卫星,到达可抓捕区域;3)捕获过程,空间机器人末端执行器与被捕获卫星接触,进行捕获操作;4)镇定过程,对捕获操作后受碰撞影响而产生不稳定运动的混合体系统进行镇定控制.在捕获过程,空间机器人关节处会遭受很大的冲击力矩,若不对其进行保护,则关节将损坏.在镇定过程,由于碰撞时产生的碰撞冲击效应,电机开启时关节也会受到冲击力矩,考虑关节只能承受有限的力矩,若冲击力矩超过其所能承受的阈值,则关节将损坏.此外,由于双臂空间机器人捕获过程存在非完整动力学约束,动量、动量矩与能量传递变化等问题,对双臂空间机器人捕获非合作卫星的研究具有一定难度.文献[13]研究了双臂空间机器人捕获运动目标的自主路径规划问题;文献[14]介绍了捕获前后的两种控制策略,实现了对柔性构件的柔性激励补偿;文献[15]研究了双臂空间机器人捕获操作的力学分析与镇定控制.上述研究多集中在捕获控制策略及碰撞力学分析上,忽略了捕获过程冲击载荷对关节的影响及镇定过程关节的保护.

为使双臂空间机器人关节在捕获过程及镇定过程得到有效保护,本文提出将RSEA柔顺机构应用于空间机器人系统,并设计与之配合的避撞柔顺控制策略.然而,引入RSEA柔顺机构会使空间机器人系统具有一定的关节柔性,进而产生弹性振动,甚至导致系统失稳^[16].基于此,本文运用奇异摄动理论将混合体系统分解为快、慢变子系统.针对快变子系统,采用速度差值反馈控制策略对弹性振动主动抑制^[17];针对慢变子系统,提出一种基于事件采样输出反馈的RBF神经网络控制方案.考虑速度信号受噪声影响无法精确测量及空间机器人系统存在非线性未知项^[18],文献[19]将系统不确定性、未建模动态、外部扰动等处理成集总扰动的形式,借助滑窗迭代积分运算对未知扰动进行在线估计.基于此,本文用RBF神经网络观测器重构空间机器人关节速度项及补偿空

间机器人系统未知项.同时,考虑神经网络权值实时更新将降低控制系统运行效率,可用事件采样输出反馈控制约束神经网络权值的更新,在实现精确控制的同时提高运行效率^[20-21].采用上述控制方法进行数值仿真,以验证所提避撞柔顺控制策略的正确性.

1 柔顺机构及柔顺策略

双臂空间机器人关节由电机通过RSEA柔顺机构驱动,所设计的RSEA结构如图1所示,其由扫臂、挡块、输入圆盘(与外部电机连接)、负载空心轴、弹簧组和支持中轴组成.3只扫臂呈 120° 均匀分布,扫臂的负载空心轴与输入圆盘的支持中轴连接.3组弹簧安装在输入圆盘的挡块与扫臂之间,布置成内接等边三角形,每组含2根弹簧,共同驱动1只扫臂.图1中: R 为弹簧与扫臂连接点到支持中轴圆心的距离, r 为弹簧的半径.

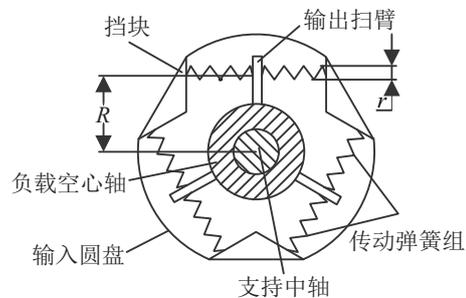


图1 RSEA柔顺机构结构

在捕获过程,双臂空间机器人机械臂末端与被捕获卫星接触、碰撞,机械臂关节处会受到很大的冲击力矩,此力矩先作用在RSEA柔顺机构的扫臂,扫臂再传递给弹簧,弹簧通过压缩或拉伸吸收冲击能量,从而实现对接关节的保护.在镇定过程,受捕获过程的碰撞冲击影响,空间机器人关节电机开启时也受到冲击力矩,若其所受冲击力矩过大而不关停,则可能发生失效.因此,有必要根据关节电机所能承受最大力矩设置一个关机阈值,当某个关节所受冲击力矩超过这个阈值时,所有电机关停,此时,RSEA柔顺机构内的弹簧将提供弹力来抵消部分冲击力矩.然而,在实际中,若只设置一个关机阈值,则电机将频繁开关机,容易造成电机损坏.因此,本文考虑在所提柔顺控制策略中设置开、关机阈值.当关节所受力矩超过关机阈值时,电机关停,当关节所受力矩小于开机阈值时,电机开启.

2 配置柔顺机构双臂空间机器人捕获卫星过程动力学建模

建立含柔顺机构双臂空间机器人系统与被捕获卫星系统模型,如图2所示.取 O_0 、 O_s 、 O_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)为基座质心、卫星质心、关节铰中心;取

XOY 、 $x_0O_0y_0$ 、 $x_sO_sy_s$ 、 $x_iO_iy_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为系统惯性参考坐标系、基座质心坐标系、卫星质心坐标系、关节中心坐标系 (y_0, y_s, y_i 方向分别与 x_0, x_s, x_i 垂直, 为简化模型, 未在图2标出); 取 b_L, b_R, b'_L, b'_R 为机械臂左右侧末端、卫星左右侧末端。

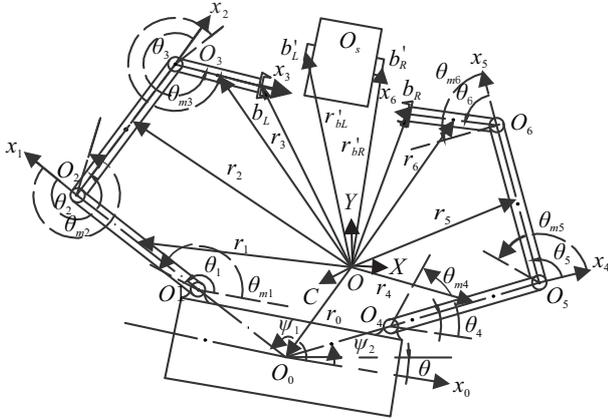


图2 配置RSEA双臂空间机器人系统与被捕卫星系统

定义本文符号: 假设基座质量、转动惯量和质心 O_0 到 O_1 或 O_4 的距离分别为 m_0, I_0, L_0 ; 卫星质量、转动惯量和质心到两侧末端的距离分别为 m_s, I_s, d_s ; 各臂杆质量、转动惯量、长度分别为 m_i, I_i, L_i ($i = 1, 2, \dots, 6$); 关节铰中心 O_i 到臂杆 i 的距离为 d_i ($i = 1, 2, \dots, 6$); 电机转子转动惯量为 I_{mi} ($i = 1, 2, \dots, 6$); 基座姿态角、卫星姿态角、关节转角和电机转角分别为 $\theta_0, \theta_s, \theta_i, \theta_{mi}$ ($i = 1, 2, \dots, 6$); RSEA 中弹簧刚度为 k_{si} ($i = 1, 2, \dots, 6$); 基座质心 O_0 与 O_1 或 O_4 连线相对于 x_0 轴的夹角分别为 ψ_1, ψ_2 。

由图2可知双臂空间机器人系统与卫星系统在惯性坐标系下的位置关系为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)^T, \\ \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_L + d_1 \mathbf{a}_1, \\ \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_L + L_1 \mathbf{a}_1 + d_2 \mathbf{a}_2, \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_L + L_1 \mathbf{a}_1 + L_2 \mathbf{a}_2 + d_3 \mathbf{a}_3, \\ \mathbf{r}_4 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_R + d_4 \mathbf{a}_4, \\ \mathbf{r}_5 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_R + L_4 \mathbf{a}_4 + d_5 \mathbf{a}_5, \\ \mathbf{r}_6 = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_R + L_4 \mathbf{a}_4 + L_5 \mathbf{a}_5 + d_6 \mathbf{a}_6, \\ \mathbf{r}_{bL} = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_L + L_1 \mathbf{a}_1 + L_2 \mathbf{a}_2 + L_3 \mathbf{a}_3, \\ \mathbf{r}_{bR} = \mathbf{r}_0 + L_0 \mathbf{a}_R + L_4 \mathbf{a}_4 + L_5 \mathbf{a}_5 + L_6 \mathbf{a}_6. \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_s = \begin{cases} (x_s, y_s)^T, \\ \mathbf{r}'_{bL} = \mathbf{r}_s - d_s \mathbf{a}_s, \\ \mathbf{r}'_{bR} = \mathbf{r}_s + d_s \mathbf{a}_s. \end{cases} \quad (2)$$

其中: x_0, y_0 为基座质心坐标, x_s, y_s 为卫星质心坐标; $\mathbf{a}_L, \mathbf{a}_R$ 分别为 $\overline{O_0O_1}$ 连线方向基向量; \mathbf{a}_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为各连体坐标系主轴方向单位向量; \mathbf{a}_s 为

卫星连体坐标系主轴方向单位向量; $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_s$ 分别为基座质心矢径和卫星质心矢径; \mathbf{r}_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为各臂杆质心矢径; $\mathbf{r}_{bL}, \mathbf{r}_{bR}, \mathbf{r}'_{bL}, \mathbf{r}'_{bR}$ 分别为机械臂左右侧末端矢径、卫星左右侧末端矢径。

通过对式(1)、(2)求导, 可得到空间机器人系统动能与卫星系统动能为

$$\begin{cases} T_r = \sum_{i=0}^6 \left(\frac{1}{2} I_i \boldsymbol{\omega}_i^2 + \frac{1}{2} m_i \dot{\mathbf{r}}_i^2 \right) + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{1}{2} I_{mj} \boldsymbol{\omega}_{mj}^2 \right), \\ T_s = \frac{1}{2} I_s \boldsymbol{\omega}_s^2 + \frac{1}{2} m_s \dot{\mathbf{r}}_s^2. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\boldsymbol{\omega}_i$ ($i = 0, 1, \dots, 6$), $\boldsymbol{\omega}_{mj}$ ($j = 1, 2, \dots, 6$), $\boldsymbol{\omega}_s$ 分别为基座角速度、电机角速度、卫星角速度。

空间机器人、卫星末端速度与广义速度的关系为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_b = \mathbf{J}_r \dot{\mathbf{q}}_r, \\ \mathbf{S}'_b = \mathbf{J}_s \dot{\mathbf{q}}_s. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{q}_r = [x_0, y_0, \theta_0, \boldsymbol{\theta}_L^T, \boldsymbol{\theta}_R^T]^T$ 为双臂空间机器人广义坐标列向量, $\boldsymbol{\theta}_L = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T, \boldsymbol{\theta}_R = [\theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$; $\mathbf{q}_s = [x_s, y_s, \theta_s]^T$ 为卫星广义坐标列向量; $\mathbf{S}_b = [\dot{x}_{bL}, \dot{y}_{bL}, \dot{\theta}_{bL}, \dot{x}_{bR}, \dot{y}_{bR}, \dot{\theta}_{bR}]^T$ 为双臂空间机器人机械臂左右侧末端线速度和角速度列向量; $\mathbf{S}'_b = [\dot{x}'_{bL}, \dot{y}'_{bL}, \dot{\theta}'_{bL}, \dot{x}'_{bR}, \dot{y}'_{bR}, \dot{\theta}'_{bR}]^T$ 为卫星末端线速度和角速度列向量; $\mathbf{J}_r \in \mathbf{R}^{6 \times 9}, \mathbf{J}_s \in \mathbf{R}^{6 \times 3}$ 分别为空间机器人末端、卫星末端雅克比矩阵。

忽略太空微重力, 空间机器人系统势能 U_r 只与 RSEA 的弹性势能相关, 卫星系统势能 U_s 为零, 有

$$\begin{cases} U_r = \sum_{i=0}^6 \left[\frac{3}{2} k_{si} (\Delta x_{Li}^2 + \Delta x_{Ri}^2) \right], \\ U_s = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\Delta x_{Li} = -\Delta x_{Ri} = R \sin \phi_i$ 为第 i 个 RSEA 挡块上左右两侧弹簧的变形量, ϕ_i 为扫臂与输入圆盘之间的角度差。

根据第2类拉格朗日方程, 联立式(3)~(5), 推导出捕获操作前含 RSEA 的双臂空间机器人系统动力学方程及卫星系统动力学方程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{D}_r(\mathbf{q}_r) \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r) \dot{\mathbf{q}}_r = \boldsymbol{\tau}_r + \mathbf{J}_r^T \mathbf{F}_r, \\ \mathbf{I}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{K}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_\theta) = \boldsymbol{\tau}_m, \\ \mathbf{K}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_\theta) = \boldsymbol{\tau}_\theta. \end{cases} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_s(\mathbf{q}_s) \ddot{\mathbf{q}}_s = \mathbf{J}_s^T \mathbf{F}'_r. \quad (7)$$

其中: $\mathbf{D}_r(\mathbf{q}_r) \in \mathbf{R}^{9 \times 9}, \mathbf{D}_s(\mathbf{q}_s) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 分别为空间机器人系统和卫星系统具有对称、正定性的惯量阵; $\mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r) \dot{\mathbf{q}}_r$ 表示空间机器人系统包含科氏力和离心力阵; $\mathbf{q}_m = [\theta_{m1}, \theta_{m2}, \theta_{m3}, \theta_{m4}, \theta_{m5}, \theta_{m6}]^T$ 为电机

转角列向量; $\mathbf{q}_\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$ 为关节转角列向量; $\boldsymbol{\tau}_r = [\boldsymbol{\tau}_B^T, \boldsymbol{\tau}_L^T, \boldsymbol{\tau}_R^T]^T$, $\boldsymbol{\tau}_\theta = [\boldsymbol{\tau}_L^T, \boldsymbol{\tau}_R^T]^T$, $\boldsymbol{\tau}_B = [0, 0, \tau_0]^T$ 为基座控制力矩列向量, $\boldsymbol{\tau}_L = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$, $\boldsymbol{\tau}_R = [\tau_4, \tau_5, \tau_6]^T$ 分别为左右侧空间机器人机械臂控制力矩列向量; $\mathbf{I}_m = \text{diag}(I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}, I_{m4}, I_{m5}, I_{m6})$ 为电机转动惯量阵; $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ 为关节等效刚度阵; \mathbf{F}_r 、 $\mathbf{F}'_r \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 分别为空间机器人和卫星上的作用力和反作用力列向量, 且满足 $\mathbf{F}_r = -\mathbf{F}'_r$.

由于空间机械臂与卫星间的相互作用力, 两者运动状态发生变化. 卫星末端反作用力可分解为

$$\mathbf{F}'_r = (\mathbf{J}_s^T)^+ \mathbf{D}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{F}_I. \quad (8)$$

其中: $(\mathbf{J}_s^T)^+ = \mathbf{J}_s (\mathbf{J}_s^T \mathbf{J}_s)^{-1}$ 表示 \mathbf{J}_s^T 的伪逆; \mathbf{F}_I 为内力项, 表示空间机械臂对卫星的压力或拉力, 满足 $\mathbf{J}_s^T \mathbf{F}_I = 0$.

结合式(6)~(8)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_r(\mathbf{q}_r) \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r) \dot{\mathbf{q}}_r = \\ \boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{J}_r^T (\mathbf{J}_s^T)^+ \mathbf{D}_s \ddot{\mathbf{q}}_s - \mathbf{J}_r^T \mathbf{F}_I. \end{aligned} \quad (9)$$

根据动量定理, 对式(9)两端积分可得

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [\mathbf{D}_r(\mathbf{q}_r) \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r) \dot{\mathbf{q}}_r] dt = \\ \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} [\boldsymbol{\tau}_r - \mathbf{J}_r^T (\mathbf{J}_s^T)^+ \mathbf{D}_s \ddot{\mathbf{q}}_s - \mathbf{J}_r^T \mathbf{F}_I] dt. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: t_0 为碰撞发生前的时刻, Δt 为碰撞时间. 由于 Δt 非常小, 可近似认为该时段系统广义坐标不发生突变, 只有广义加速度和广义速度发生突变. 同时, 在碰撞时刻, 空间机器人关节电机处于关停状态, 以避免其受到过大冲击力. 另外, 由于 \mathbf{F}_I 远小于冲击力, 内力项 \mathbf{F}_I 可省略. 式(10)可近似为

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_r[\dot{\mathbf{q}}_r(t_0 + \Delta t) - \dot{\mathbf{q}}_r(t_0)] + \\ \mathbf{J}_r^T (\mathbf{J}_s^T)^+ \mathbf{D}_s [\dot{\mathbf{q}}_s(t_0 + \Delta t) - \dot{\mathbf{q}}_s(t_0)] = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (11)$$

捕获完成后, 双臂空间机器人与卫星锁紧连接. 定义 $\mathbf{q}_L = [x_0, y_0, \theta_0, \boldsymbol{\theta}_L^T]^T$ 为闭链系统广义坐标. 在连体坐标系 $x_0 O_0 y_0$ 下, 机械臂左侧末端矢径 \mathbf{r}'_{bL} 及其导数 $\dot{\mathbf{r}}'_{bL}$ 、卫星左侧末端矢径 \mathbf{r}'_{sL} 及其导数 $\dot{\mathbf{r}}'_{sL}$ 为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{bL}(t_0 + \Delta t) = \mathbf{r}_{0L} + L_1 \mathbf{a}_{01} + L_2 \mathbf{a}_{02} + L_3 \mathbf{a}_{03}, \\ \mathbf{r}'_{bL}(t_0 + \Delta t) = \\ \mathbf{r}_{0R} + L_4 \mathbf{a}_{04} + L_5 \mathbf{a}_{05} + (L_6 + 2d_s) \mathbf{a}_{06}, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}}_{bL}(t_0 + \Delta t) = \dot{\mathbf{r}}_{0L} + L_1 \dot{\mathbf{a}}_{01} + L_2 \dot{\mathbf{a}}_{02} + L_3 \dot{\mathbf{a}}_{03}, \\ \dot{\mathbf{r}}'_{bL}(t_0 + \Delta t) = \\ \dot{\mathbf{r}}_{0R} + L_4 \dot{\mathbf{a}}_{04} + L_5 \dot{\mathbf{a}}_{05} + (L_6 + 2d_s) \dot{\mathbf{a}}_{06}. \end{cases} \quad (13)$$

且相关点的位置和速度存在如下约束:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{bL}(t_0 + \Delta t) = \mathbf{r}'_{bL}(t_0 + \Delta t), \\ \dot{\mathbf{r}}_{bL}(t_0 + \Delta t) = \dot{\mathbf{r}}'_{bL}(t_0 + \Delta t). \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\mathbf{r}_{0L} = (x_{0L}, y_{0L})^T$ 、 $\mathbf{r}_{0R} = (x_{0R}, y_{0R})^T$ 分别为连体坐标系 $x_0 O_0 y_0$ 下基座质心 O_0 到 O_1 、 O_4 的矢径; \mathbf{a}_{0i} ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为连体坐标系 $x_0 O_0 y_0$ 下各主轴方向单位向量.

结合式(12)~(14)可得左、右机械臂间的运动关系

$$\begin{cases} \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 = c, \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_6 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

由六边形内角和定理可得 $c = -\pi$, 综合式(14)、(15)可得闭链系统运动约束方程

$$\mathbf{J}_{0L} \dot{\boldsymbol{\theta}}_L = \mathbf{J}_{0R} \dot{\boldsymbol{\theta}}_R. \quad (16)$$

其中: $\mathbf{J}_{0L} = [\mathbf{J}_{0L}^T, \mathbf{E}_{3 \times 1}]^T$, $\mathbf{J}_{0R} = [\mathbf{J}_{0R}^T, \mathbf{E}_{3 \times 1}]^T$, $\mathbf{J}_{0L1} \in \mathbf{R}^{2 \times 3}$ 、 $\mathbf{J}_{0R1} \in \mathbf{R}^{2 \times 3}$ 分别为基座连体坐标系 $x_0 O_0 y_0$ 下两运动相关点对应的运动雅克比矩阵, $\mathbf{E}_{3 \times 1}$ 为元素均为1的 3×1 阶矩阵.

由式(16)可得

$$\dot{\mathbf{q}}_r = \mathbf{U}^T \dot{\mathbf{q}}_L. \quad (17)$$

其中: $\mathbf{U} = [\mathbf{E}_{6 \times 6}, \mathbf{U}_1^T]$, $\mathbf{U}_1 = [\mathbf{0}_{3 \times 3}, \mathbf{J}_{0R}^{-1} \mathbf{J}_{0L}]$.

考虑机械臂左侧末端与卫星左侧末端运动关系, 结合式(16)可得

$$\mathbf{J}_{rL} \dot{\mathbf{q}}_L(t) = \mathbf{J}_{sL} \dot{\mathbf{q}}_s(t). \quad (18)$$

其中: $\mathbf{J}_{rL} = [\mathbf{J}_{rL1}^T, \mathbf{G}_1^T]^T$, $\mathbf{J}_{sL} = [\mathbf{J}_{sL1}^T, \mathbf{G}_2^T]^T$, $\mathbf{J}_{rL1} \in \mathbf{R}^{2 \times 6}$ 、 $\mathbf{J}_{sL1} \in \mathbf{R}^{2 \times 3}$ 分别为机械臂左侧末端、卫星左侧末端在惯性参考坐标系下对应的运动雅克比矩阵, $\mathbf{G}_1 = [\mathbf{0}_{1 \times 2}, \mathbf{E}_{1 \times 4}]$, $\mathbf{G}_2 = [\mathbf{0}_{1 \times 2}, \mathbf{1}]$.

由式(18)可得

$$\dot{\mathbf{q}}_s(t_0 + \Delta t) = \mathbf{J}_{sL}^{-1} \mathbf{J}_{rL} \dot{\mathbf{q}}_L(t_0 + \Delta t). \quad (19)$$

将式(17)、(19)代入(11)可得

$$\dot{\mathbf{q}}_s(t_0 + \Delta t) = \mathbf{A}^{-1} [\mathbf{L} \dot{\mathbf{q}}_L(t_0) + \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}}_s(t_0)]. \quad (20)$$

其中: $\mathbf{A} = \mathbf{L} + \mathbf{B} \mathbf{J}_{sL}^{-1} \mathbf{J}_{rL}$, $\mathbf{B} = \mathbf{U} \mathbf{J}_r^T (\mathbf{J}_s^T)^+ \mathbf{D}_s$, $\mathbf{L} = \mathbf{U} \mathbf{D}_r \mathbf{U}^T$. 根据捕获操作后空间机器人运动状态, 并结合式(11), 可得碰撞冲量 \mathbf{I}_r 为

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_r = (\mathbf{J}_r^T)^+ \mathbf{D}_r [(\mathbf{U}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{L} - \mathbf{U}^T) \dot{\mathbf{q}}_L(t_0) + \\ \mathbf{U}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}}_s(t_0)]. \end{aligned} \quad (21)$$

由于 Δt 很小, 碰撞力 \mathbf{F}_r 可表示为

$$\mathbf{F}_r = \frac{\mathbf{I}_r}{\Delta t}. \quad (22)$$

对式(17)、(19)求导, 整理后可得

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{q}}_r = \dot{\mathbf{U}}^T \dot{\mathbf{q}}_L + \mathbf{U}^T \ddot{\mathbf{q}}_L, \\ \ddot{\mathbf{q}}_s = \mathbf{J}_{sL}^{-1} (\dot{\mathbf{J}}_{rL} \dot{\mathbf{q}}_L + \mathbf{J}_{rL} \ddot{\mathbf{q}}_L - \dot{\mathbf{J}}_{sL} \mathbf{J}_{sL}^{-1} \mathbf{J}_{rL} \dot{\mathbf{q}}_L). \end{cases} \quad (23)$$

由式(17)、(19)、(23)和(9)可得

$$\mathbf{D}_h \ddot{\mathbf{q}}_L + \mathbf{C}_h \dot{\mathbf{q}}_L = \boldsymbol{\tau}_h - \mathbf{F}_{Ih}. \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_h &= \mathbf{A}, \boldsymbol{\tau}_h = \mathbf{U} \boldsymbol{\tau}_r, \mathbf{F}_{Ih} = \mathbf{U} \mathbf{J}_r^T \mathbf{F}_I, \\ \mathbf{C}_h &= \mathbf{U} \mathbf{C}_r \mathbf{U}^T + \mathbf{U} \mathbf{D}_r \dot{\mathbf{U}}^T + \\ &\quad \mathbf{B} \mathbf{J}_{sL}^{-1} (\dot{\mathbf{J}}_{rL} - \dot{\mathbf{J}}_{sL} \mathbf{J}_{sL}^{-1} \mathbf{J}_{rL}). \end{aligned}$$

为了得到完全能控的混合系统动力学方程,将式(24)写成如下分块形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{h11} & \mathbf{D}_{h12} \\ \mathbf{D}_{h21} & \mathbf{D}_{h22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_N \\ \ddot{\mathbf{q}}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{h11} & \mathbf{C}_{h12} \\ \mathbf{C}_{h21} & \mathbf{C}_{h22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_N \\ \dot{\mathbf{q}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \boldsymbol{\tau}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{F}_{Ihb} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

其中: $\mathbf{D}_{h11} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}, \mathbf{D}_{h12} \in \mathbf{R}^{2 \times 4}, \mathbf{D}_{h21} \in \mathbf{R}^{4 \times 2}, \mathbf{D}_{h22} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}; \mathbf{C}_{h11} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}, \mathbf{C}_{h12} \in \mathbf{R}^{2 \times 4}, \mathbf{C}_{h21} \in \mathbf{R}^{4 \times 2}, \mathbf{C}_{h22} \in \mathbf{R}^{4 \times 4}; \mathbf{q}_N = [x_0, y_0]^T, \mathbf{q}_c = [\theta_0, \boldsymbol{\theta}_L^T]^T; \boldsymbol{\tau}_c = [\tau_0, \boldsymbol{\tau}_{hb}]^T, \boldsymbol{\tau}_{hb} = \boldsymbol{\Lambda} [\boldsymbol{\tau}_L^T, \boldsymbol{\tau}_R^T]^T, \boldsymbol{\Lambda} = [\mathbf{E}_{3 \times 3}, (\mathbf{J}_{0R}^{-1} \mathbf{J}_{0L})^T]^T; \mathbf{F}_{Ih} = [\mathbf{F}_{Iha}^T, \mathbf{F}_{Ihb}^T]^T, \mathbf{F}_{Ihb} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$.

由式(25)可得闭环混合系统完全能控形式的动力学方程为

$$\begin{cases} \mathbf{D}_c \ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{q}}_c = \boldsymbol{\tau}_c, \\ \mathbf{I}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \mathbf{K}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_\theta) = \boldsymbol{\tau}_m, \\ \mathbf{K}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_\theta) = \boldsymbol{\tau}_\theta. \end{cases} \quad (26)$$

其中: $\mathbf{D}_c = \mathbf{D}_{h22} - \mathbf{D}_{h21} \mathbf{D}_{h11}^{-1} \mathbf{D}_{h12}, \mathbf{C}_c = \mathbf{C}_{h22} - \mathbf{D}_{h21} \mathbf{D}_{h11}^{-1} \mathbf{C}_{h12}$.

3 控制器设计

3.1 快变子系统控制器设计

引入RSEA柔顺机构后,空间机器人具有一定的关节柔性,运动过程中机械臂将产生弹性振动,为减小弹性振动对机械臂控制精度和稳定性的影响,基于奇异摄动法,将捕获操作后的闭环混合系统分解为快变子系统和慢变子系统,分别进行控制.由此关节驱动电机的输出力矩可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_m = \boldsymbol{\tau}_s + \boldsymbol{\tau}_f. \quad (27)$$

其中: $\boldsymbol{\tau}_s \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 为慢变子系统控制力矩, $\boldsymbol{\tau}_f \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$ 为快变子系统控制力矩.

定义正比例因子 ε 及正定对角阵 \mathbf{K}_1 , 其与关节等效刚度阵 \mathbf{K} 的关系如下:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{K}_1}{\varepsilon^2}. \quad (28)$$

定义弹簧弹力 $\mathbf{T}_\theta = \mathbf{K}(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_\theta)$ 为快变量,并为快变子系统设计如下速度差值反馈控制:

$$\boldsymbol{\tau}_f = -\mathbf{K}_f(\dot{\mathbf{q}}_m - \dot{\mathbf{q}}_\theta). \quad (29)$$

其中: $\mathbf{K}_f = \mathbf{K}_2/\varepsilon, \mathbf{K}_2 \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 为正定对角阵. 结合式(26)~(29),解得快变子系统动力学方程

$$\varepsilon^2 \mathbf{I}_m \ddot{\mathbf{T}}_\theta + \varepsilon \mathbf{K}_2 \dot{\mathbf{T}}_\theta + \mathbf{K}_1 \mathbf{T}_\theta = \mathbf{K}_1(\boldsymbol{\tau}_s - \mathbf{I}_m \ddot{\mathbf{q}}_\theta). \quad (30)$$

由式(28)可知, ε 趋近于0时, \mathbf{K} 趋近于无穷,电机与机械臂关节之间可等效为刚性连接,即满足 $\mathbf{q}_m = \mathbf{q}_\theta, \dot{\mathbf{q}}_m = \dot{\mathbf{q}}_\theta, \ddot{\mathbf{q}}_m = \ddot{\mathbf{q}}_\theta$. 结合式(26)和(27)可解得慢变子系统动力学方程

$$\mathbf{D}_{c\theta} \ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{C}_{c\theta} \dot{\mathbf{q}}_c = \boldsymbol{\tau}_{s\theta}. \quad (31)$$

其中: $\mathbf{D}_{c\theta} = \mathbf{D}_c + \mathbf{I}_{m\theta}, \mathbf{C}_{c\theta}$ 为 \mathbf{C}_c 中 $\mathbf{q}_m = \mathbf{q}_\theta$ 时对应的矩阵, $\mathbf{I}_{m\theta} = [\mathbf{0}_{4 \times 1}, \mathbf{I}_{m\theta 1}]^T, \mathbf{I}_{m\theta 1} = [\mathbf{0}_{3 \times 1}, (\boldsymbol{\Lambda} \mathbf{I}_m)^T]^T; \boldsymbol{\tau}_{s\theta} = [\tau_0, (\boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\tau}_s)^T]^T$.

3.2 慢变子系统控制器设计

3.2.1 事件采样输出反馈

事件采样输出反馈控制与传统的周期性反馈控制不同,其为基于事件的控制实现,即事件触发机制与传感器协同作用,以确定控制器采用传感器测量值的时刻^[22].

为了表示控制器采用传感器测量值的时刻,需定义一个时刻序列 $\{t_k\}_{k=0}^\infty$, 其中 $t_0 = 0$. 在采样时刻 t_k , 控制器采用的传感器测量值 $\gamma(t_k)$ 更新,而在任意两个采样时刻之间,控制器采用的传感器测量值不变,即满足如下关系:

$$\tilde{\gamma}(t) = \gamma(t_k). \quad (32)$$

其中: $t_k \leq t \leq t_{k+1}, \forall k \in \{0, N\}$.

由于传感器测量值未实时更新,需定义采样误差

$$\begin{cases} \bar{e}_{\text{ET}}(t) = \gamma(t_k) - \tilde{\gamma}(t), \\ \bar{e}_{\text{ET}}(t_k) = \mathbf{0}. \end{cases} \quad (33)$$

3.2.2 神经网络速度观测器设计

考虑空间机器人捕获操作过程的碰撞冲击,定义有界扰动项 $\boldsymbol{\tau}_d$, 则式(31)可写为

$$\mathbf{D}_{c\theta} \ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{C}_{c\theta} \dot{\mathbf{q}}_c + \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau}_{s\theta}, \quad (34)$$

其满足如下结构特性.

特性1 $\mathbf{D}_{c\theta}, \mathbf{C}_{c\theta}$ 满足一致有界性,即

$$B_{m1} \leq \|\mathbf{D}_{c\theta}\| \leq B_{m2}, \|\mathbf{C}_{c\theta}\| \leq C_b \|\dot{\mathbf{q}}_c\|,$$

其中 B_{m1}, B_{m2}, C_b 为正常数.

特性2 矩阵 $\dot{\mathbf{D}}_{c\theta} - 2\mathbf{C}_{c\theta}$ 满足斜对称性,适当选取 $\mathbf{C}_{c\theta}$, 对于任意的 $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$, 有

$$\frac{1}{2} \mathbf{z}^T \dot{\mathbf{D}}_{c\theta} \mathbf{z} - \mathbf{z}^T \mathbf{C}_{c\theta} \mathbf{z} = \mathbf{0}.$$

式(34)可写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_c \\ \ddot{q}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_c \\ -D_{cb}^{-1}C_{cb}\dot{q}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{cb}^{-1} \end{bmatrix} \tau_{s\theta} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D_{cb}^{-1} \end{bmatrix} \tau_d. \quad (35)$$

式(35)又可写成如下状态向量形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = h(x, \tau_{s\theta}). \end{cases} \quad (36)$$

其中: $x = [x_1^T, x_2^T]^T$, x_1, x_2 分别为关节位置、关节速度; $h(x, \tau_{s\theta}) = -D_{cb}^{-1}(C_{cb}\dot{q}_c + \tau_d - \tau_{s\theta})$.

由于 $h(x, \tau_{s\theta})$ 为未知的非线性函数, 考虑利用神经网络逼近, 即

$$h(x, \tau_{s\theta}) = W_0^T \sigma_0(x, \tau_{s\theta}) + \varepsilon_0(x). \quad (37)$$

其中: W_0 为未知的权值矩阵, $\sigma_0(x, \tau_{s\theta})$ 为高斯基函数, $\varepsilon_0(x)$ 为逼近误差.

假设1 逼近误差 $\varepsilon_0(x)$ 有界, 存在 $\varepsilon_{0M} > 0$, 使得 $\|\varepsilon_0(x)\| \leq \varepsilon_{0M}$; 未知权值矩阵 W_0 有界, 存在 $W_{0M} > 0$, 使得 $\|W_0\| \leq W_{0M}$; 高斯基函数 $\sigma_0(x, \tau_{s\theta})$ 满足 $\|\sigma_0(x, \tau_{s\theta})\| \leq \sqrt{N_0}$, N_0 为隐藏层中神经元的个数.

由此可知, $h(x, \tau_{s\theta})$ 的估计值如下:

$$\hat{h}(x, \tau_{s\theta}) = \hat{W}_0^T \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}). \quad (38)$$

其中: \hat{W}_0^T 为 W_0^T 的估计值, $\hat{x} = [\hat{x}_1^T, \hat{x}_2^T]^T$ 为 x 的估计值. 设计如下神经网络速度观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + K_d \tilde{x}_1, \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{W}_0^T \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) + K \tilde{x}_1 + K_p \dot{\hat{x}}_1. \end{cases} \quad (39)$$

其中: K_d, K, K_p 为观测器增益项, $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$ 为位置估计误差.

定义状态估计误差 $\tilde{x} = [\tilde{x}_1^T, \tilde{x}_2^T]^T$, 其中 $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$ 为速度估计误差, 则式(39)可写成

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - K_d \tilde{x}_1, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -K_d \tilde{x}_2 - (K - K_p K_d) \tilde{x}_1 + \tilde{W}_0^T \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) + \varepsilon_1(\tilde{x}). \end{cases} \quad (40)$$

其中: 定义估计权值误差 $\tilde{W}_0^T = W_0^T - \hat{W}_0^T$, $\varepsilon_1(\tilde{x}) = W_0^T [\sigma_0(x, \tau_{s\theta}) - \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) + \varepsilon_0(x)]$.

由式(36)和(39)定义 \dot{W}_0 的更新率如下:

$$\dot{W}_0 = -\Gamma_0 K_d \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) \tilde{x}_1^T - \Gamma_0 \kappa_0 \dot{W}_0, \quad (41)$$

其中 Γ_0 和 κ_0 都为正实数.

定理1 若 $K_d K > \frac{1}{2} K_p^2 + \frac{1}{2} N_0$, $K_p > \frac{1}{2} K_d^2 + \frac{1}{2} N_0 + \frac{1}{2}$, $\kappa_0 > \frac{1}{2} K_d^2 + \frac{1}{2}$, 则神经网络速度观测器状态估计误差及权值估计误差均满足局部一致有界.

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) = \frac{1}{2} \tilde{x}_1^T K \tilde{x}_1 + \frac{1}{2} \tilde{x}_2^T \tilde{x}_2 + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_0^T \Gamma_0^{-1} \tilde{W}_0). \quad (42)$$

对式(42)求导可得

$$\dot{V}_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) = \dot{\tilde{x}}_1^T K \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2^T \dot{\tilde{x}}_2 + \text{tr}(\dot{\tilde{W}}_0^T \Gamma_0^{-1} \tilde{W}_0). \quad (43)$$

由式(41)可知 $\dot{W}_0 = -\dot{\tilde{W}}_0$, 结合式(40)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) = & -K_d \tilde{x}_1^T K \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2^T K_p \tilde{x}_2 + \\ & \tilde{x}_2^T K_p K_d \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2^T \tilde{W}_0^T \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) + \\ & \tilde{x}_2^T \varepsilon_1(\tilde{x}) + \text{tr}[\tilde{W}_0^T K_d \sigma_0(\hat{x}, \tau_{s\theta}) \tilde{x}_1^T + \\ & \tilde{W}_0^T \kappa_0 W_0 - \tilde{W}_0^T \kappa_0 \tilde{W}_0]. \end{aligned} \quad (44)$$

由式(44)可知

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) \leq & -K_d K \|\tilde{x}_1\|^2 - K_p \|\tilde{x}_2\|^2 - \\ & \kappa_0 \|\tilde{W}_0\|^2 + \|\tilde{x}_2\| K_p K_d \|\tilde{x}_1\| + \\ & \|\tilde{x}_2\| \|\tilde{W}_0^T\| \sqrt{N_0} + \|\tilde{x}_2\| \|\varepsilon_1(\tilde{x})\| + \\ & \|\tilde{W}_0\| K_d \sqrt{N_0} \|\tilde{x}_1\| + \|\tilde{W}_0\| \kappa_0 W_{0M}. \end{aligned} \quad (45)$$

式(45)应用 Young 不等式关系得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) \leq & -\eta_1 \|\tilde{x}_1\|^2 - \eta_2 \|\tilde{x}_2\|^2 - \eta_3 \|\tilde{W}_0\|^2 + \beta_0. \end{aligned} \quad (46)$$

其中: $\eta_1 = K_d K - \frac{1}{2} K_p^2 - \frac{1}{2} N_0$, $\eta_2 = K_p - \frac{1}{2} K_d^2 - \frac{1}{2} N_0 - \frac{1}{2}$, $\eta_3 = \kappa_0 - \frac{1}{2} K_d^2 - \frac{1}{2}$, $\beta_0 = \frac{1}{2} \|\varepsilon_1(\tilde{x})\|^2 + \kappa_0^2 W_{0M}^2$.

观察式(46)可知, 若满足 $\eta_1, \eta_2, \eta_3 > 0$, $\|\tilde{x}_1\| > \sqrt{\frac{\beta_0}{\eta_1}}$, $\|\tilde{x}_2\| > \sqrt{\frac{\beta_0}{\eta_2}}$, $\|\tilde{W}_0\| > \sqrt{\frac{\beta_0}{\eta_3}}$, 则上述 Lyapunov 函数负定, 由此神经网络观测器估计误差和权值均局部一致有界. \square

3.2.3 基于事件采样输出反馈的神经网络控制器设计

为使空间机器人跟踪期望轨迹, 定义跟踪误差

$$e = q_{cd} - q_c, \quad (47)$$

其中 q_{cd} 为期望轨迹.

假设2 $q_{cd} \in \mathbf{R}^n$, 存在 $q_B > 0$, 使得 $\|Q_{cd}\| \leq q_B$, 其中 $Q_{cd} = [q_{cd}^T, \dot{q}_{cd}^T, \ddot{q}_{cd}^T]^T$.

定义 $\lambda > 0$, 则滤波跟踪误差为

$$r = \dot{e} + \lambda e. \quad (48)$$

对式(48)求导可得

$$\dot{r} = \ddot{e} + \lambda \dot{e}. \quad (49)$$

将式(47)~(49)代入(34),可得

$$D_{c\theta}\dot{r} = -C_{c\theta}r - \tau_{s\theta} + f(z) + \tau_d. \quad (50)$$

其中: $f(z) = D_{c\theta}(\ddot{q}_{cd} + \lambda\dot{e}) + C_{c\theta}(\dot{q}_{cd} + \lambda e)$, $z = [e^T, \dot{e}^T, q_{cd}^T, \dot{q}_{cd}^T, \ddot{q}_{cd}^T]^T$.

若 $f(z)$ 已知,则控制力矩可设计为

$$\tau_{s\theta} = f(z) + k_v r, \quad (51)$$

其中 $k_v \in R^{4 \times 4}$ 为对称正定矩阵.

事实上,由于存在模型不确定, $f(z)$ 是未知的,考虑利用神经网络逼近,即

$$f(z) = W_1^T \sigma_1(z) + \varepsilon_1(z). \quad (52)$$

其中: W_1 为未知的权值矩阵, $\sigma_1(z)$ 为高斯基函数, $\varepsilon_1(z)$ 为逼近误差.

假设3 逼近误差 $\varepsilon_1(z)$ 有界,存在 $\varepsilon_{1M} > 0$, 使得 $\|\varepsilon_1(z)\| \leq \varepsilon_{1M}$; 未知权值矩阵 W_1 有界,存在 $W_{1M} > 0$, 使得 $\|W_1\| \leq W_{1M}$; 高斯基函数 $\sigma_1(z)$ 满足 $\|\sigma_1(z)\| \leq \sqrt{N_1}$, N_1 为隐藏层中神经元的个数.

由此, $f(z)$ 的估计值表示为

$$\hat{f}(z) = \hat{W}_1^T \sigma_1(\hat{z}). \quad (53)$$

其中: \hat{W}_1^T 为 W_1 的估计权值; $\hat{z} = [\hat{e}^T, \hat{\dot{e}}^T, \hat{q}_{cd}^T, \hat{\dot{q}}_{cd}^T, \hat{\ddot{q}}_{cd}^T]^T$ 为神经网络输入; $\hat{e} = q_{cd} - \hat{x}_1, \hat{\dot{e}} = \dot{q}_{cd} - \hat{\dot{x}}_2$.

定义估计滤波误差

$$\hat{r} = \dot{e} + \lambda\hat{e}. \quad (54)$$

结合式(52)~(54),得到近似的控制力矩

$$\tau_{s\theta} = \hat{W}_1^T \sigma_1(\hat{z}) + k_v \hat{r}. \quad (55)$$

定义 \hat{W}_1 的更新率如下:

$$\dot{\hat{W}}_1 = \Gamma_1 \sigma_1(\hat{z}) \hat{r}^T - \kappa_1 \Gamma_1 \hat{W}_1, \quad (56)$$

其中 Γ_1 和 κ_1 都为正实数.

定理2 在满足定理1的基础上,若再满足 $\kappa_1 > 0.5$, $\lambda_{\min}(k_v) > 0.5$, 则控制器的轨迹跟踪误差及权值估计误差均满足局部一致有界.

证明 定义Lyapunov函数

$$V = V_0(\tilde{x}, \tilde{W}_0) + V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1), \quad (57)$$

其中 $V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1) = \frac{1}{2} \hat{r}^T D_{c\theta} \hat{r} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_1^T \Gamma_1^{-1} \tilde{W}_1)$.

由式(56)可知 $\dot{\hat{W}}_1 = -\hat{W}_1$, 对 $V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1)$ 求导可得

$$\begin{aligned} V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1) &= \hat{r}^T [\varepsilon_1 + \tau_d + W_1^T (\sigma_1(z) - \sigma_1(\hat{z}))] + \\ &\text{tr} \left[\tilde{W}_1^T \kappa_1 (W_1 - \tilde{W}_1) - \frac{1}{2} \hat{r}^T (D_{c\theta} - \right. \\ &\left. 2C_{c\theta}) \hat{r} \right] - \hat{r}^T k_v \hat{r}. \end{aligned} \quad (58)$$

根据特性2,结合Youngs不等式可得

$$V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1) \leq -\|k_v\| \|\hat{r}\|^2 - \left(\kappa_1 - \frac{1}{2}\right) \|\tilde{W}_1^T\|^2 +$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \kappa_1^2 W_{1M}^2 + \|\hat{r}^T\| \|\varepsilon_1 + \tau_d + \\ &W_1^T [\sigma_1(z) - \sigma_1(\hat{z})]\|. \end{aligned} \quad (59)$$

式(59)再次应用Youngs不等式可得

$$\begin{aligned} V_1(\hat{r}, \tilde{W}_1) &\leq \\ &- \left[\lambda_{\min}(k_v) - \frac{1}{2} \right] \|\hat{r}\|^2 - \left(\kappa_1 - \frac{1}{2} \right) \|\tilde{W}_1^T\|^2 + \beta_1, \end{aligned} \quad (60)$$

其中

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \\ &\frac{1}{2} \kappa_1^2 W_{1M}^2 + \frac{1}{2} \|\varepsilon_1 + \tau_d + W_1^T [\sigma_1(z) - \sigma_1(\hat{z})]\|^2. \end{aligned}$$

结合式(60)及定理1可得

$$\begin{aligned} V &\leq - \left[\lambda_{\min}(k_v) - \frac{1}{2} \right] \|\hat{r}\|^2 - \left(\kappa_1 - \frac{1}{2} \right) \|\tilde{W}_1^T\|^2 - \\ &\eta_1 \|\tilde{x}_1\|^2 - \eta_2 \|\tilde{x}_2\|^2 - \eta_3 \|\tilde{W}_0\|^2 + \beta, \end{aligned} \quad (61)$$

其中 $\beta = \beta_0 + \beta_1$. 若满足 $\eta_1, \eta_2, \eta_3 > 0, \kappa_1, \lambda_{\min}(k_v) > 0.5, \|\tilde{x}_1\| > \sqrt{\frac{\beta}{\eta_1}}, \|\tilde{x}_2\| > \sqrt{\frac{\beta}{\eta_2}}, \|\tilde{W}_0\| > \sqrt{\frac{\beta}{\eta_3}}, \|\tilde{W}_1\| > \sqrt{\frac{\beta}{(\kappa_1 - 1/2)}}, \|\hat{r}\| > \sqrt{\frac{\beta}{[\lambda_{\min}(k_v) - 1/2]}}$, 则上述Lyapunov函数负定,由此控制器的轨迹跟踪误差及权值估计误差均满足局部一致有界. □

基于式(52)~(55),结合事件采样输出反馈控制机制,定义如下触发条件^[23]:

$$\|e_{ET}\|^2 \leq \sigma u_k \|\hat{r}\|^2. \quad (62)$$

其中: $e_{ET} = e(t) - e(t_k)$; $\sigma, u_k \in (0, 1)$, 并且 $u_k = 2\sigma / [\|\hat{W}_1\|^2 L_\phi^2 + \|k_v\|^2]$, $\sigma \leq \lambda_{\min}(k_v) - \frac{3}{2}, L_\phi > 0$.

若式(62)成立,则 \hat{W}_1 不更新,控制力矩为

$$\tau_{s\theta} = f(\tilde{z}) + k_v \tilde{r}(t). \quad (63)$$

其中: $t_k \leq t < t_{k+1}, \tilde{r}(t) = \hat{r}(t) - e_{ET}, f(\tilde{z})$ 为 $\tilde{z} = z(t_k)$ 时 $f(z)$ 的值.

若式(62)不成立,则更新权值 \hat{W}_1 ,并将更新采样时刻记为 t_k ,此时控制力矩取式(55).

由式(30)可知,快变子系统的控制力矩为 τ_s ,而实际设计的是 $\tau_{s\theta}$,因此将 $\tau_{s\theta}$ 分解为 $\tau_{s\theta} = [\tau_0, \tau_{bs\theta}^T]^T$, 其中 $\tau_{bs\theta} \in R^{3 \times 1}$, 由前文可知 $\tau_{s\theta} = [\tau_0, (A\tau_s)^T]^T$, 结合加权最小范数法可得

$$\tau_s = GA^T(AGA^T)^{-1} \tau_{bs\theta}, \quad (64)$$

其中 $G \in R^{6 \times 6}$ 为对称正定的权值矩阵.

4 仿真算例

4.1 碰撞过程中RSEA避撞性能仿真

双臂空间机器人捕获卫星操作如图2所示,空间机器人系统参数如下: $m_0 = 60 \text{ kg}, L_0 = 1.1 \text{ m}, m_i = 6 \text{ kg} (i = 1, 2, 4, 5), L_i = 1 \text{ m} (i = 1, 2, 4, 5), d_i =$

$0.5\text{ m}(i = 1, 2, 4, 5), m_j = 3\text{ kg}(j = 3, 6), L_j = 0.5\text{ m}(j = 3, 6), d_j = 0.25\text{ m}(j = 3, 6), \psi_1 = 2.79\text{ rad}, \psi_2 = 0.35\text{ rad}, k_{s_i} = 700\text{ N/m}(i = 1, 2, \dots, 6), I_0 = 40\text{ kg} \cdot \text{m}^2, I_i = 1\text{ kg} \cdot \text{m}^2(i = 1, 2, 4, 5), I_{m_i} = 0.05\text{ kg} \cdot \text{m}^2(i = 1, 2, \dots, 6), I_j = 0.5\text{ kg} \cdot \text{m}^2(j = 3, 6)$. 卫星系统参数如下: $m_s = 7\text{ kg}, d_s = 0.25\text{ m}, I_s = 4\text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 在捕获操作前,选取双臂空间机器人的初始位置为 $\mathbf{q}_r = [0.3, 0.3, 10^\circ, 120^\circ, -60^\circ, -60^\circ, 60^\circ, 60^\circ, 60^\circ]^T$. 关节等效刚度计算公式如下:

$$\mathbf{K} = 2\mathbf{K}_s(3R^2 + r^2)(2\cos^2\varphi - 1). \quad (65)$$

其中: $\mathbf{K}_s = \text{diag}(k_{s1}, k_{s2}, k_{s3}, k_{s4}, k_{s5}, k_{s6}), r = 0.01\text{ m}, R = 0.1\text{ m}, \varphi = \text{diag}(3^\circ, 2^\circ, 1^\circ, -3^\circ, -2^\circ, -1^\circ)$ 为机械臂末端载荷 $\mathbf{F}_r = [20\text{ N}, 20\text{ N}, 0, 20\text{ N}, 20\text{ N}, 0]^T$ 时扫臂的转角.

为验证RSEA柔顺机构的防撞性能,在捕获非合作卫星的碰撞过程中,采用多组卫星速度对关节力矩仿真,结果如表1所示,卫星速度第1、2项表示线速度,单位为 m/s ,第3项为角速度,单位为 rad/s ,所受冲击力矩单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$.

表1 多组卫星速度下RSEA防撞性能比较

卫星速度	无RSEA关节最大冲击力矩	含RSEA关节最大冲击力矩	RSEA缓冲力矩占比/%
$[0.2, 0, 0]^T$	78.9	34.1	56.8
$[0.2, 0.2, 0]^T$	123.2	50.6	58.9
$[0.2, 0.2, 0.1]^T$	145.1	65.2	55.1

由表1可知,在捕获非合作卫星的碰撞过程中,不同卫星速度下,RSEA至少能缓冲55.1%的关节最大冲击力矩,进而保护关节电机.

4.2 捕获操作完成后防撞柔顺控制策略性能仿真

选取防撞柔顺控制参数: $K_d = 10, K_p = 10, K = 10, \Gamma_0 = 1, \kappa = 1, \lambda = 5, L_\phi = 1, \mathbf{k}_v = \text{diag}(500, 500, 500, 500, 500, 500), \sigma = 0.8, \varepsilon = 0.3, \mathbf{K}_v = \text{diag}(50, 50, 50, 50, 50, 50)$. 卫星初始速度 $\dot{\mathbf{q}}_s = [0.2\text{ m/s}, 0.2\text{ m/s}, 0.1\text{ rad/s}]^T$. 有界外部扰动项 $\boldsymbol{\tau}_d = [\sin t, \cos t, \sin t]^T$,仿真时间为20s.

假设双臂空间机器人关节电机至多可承受 $70\text{ N} \cdot \text{m}$ 的冲击力矩,设定关节电机关机阈值 $59\text{ N} \cdot \text{m}$,开机阈值 $45\text{ N} \cdot \text{m}$,开启与RSEA柔顺机构配合的防撞柔顺控制,仿真结果如图3~图11所示.

图3、图4为开启防撞柔顺控制后关节电机开关机信号机及关节电机所受冲击力矩,由图4可知,关节所受冲击力矩保持在设定的安全区间内.

图5~图7为采用基于事件采样输出反馈的神经网络控制方案所得轨迹跟踪效果.

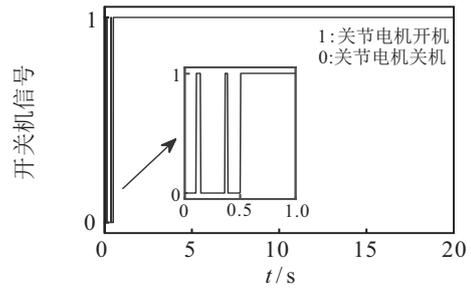
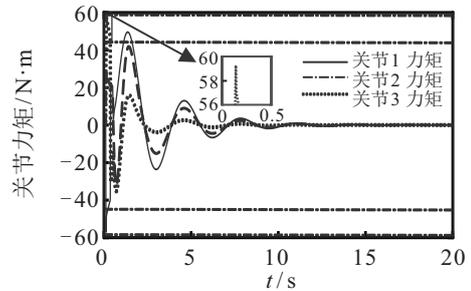
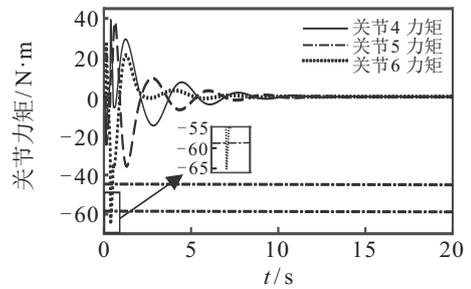


图3 开启防撞柔顺控制关节电机开关机信号



(a) 关节1 关节3力矩



(b) 关节4~关节6力矩

图4 开启防撞柔顺控制关节力矩

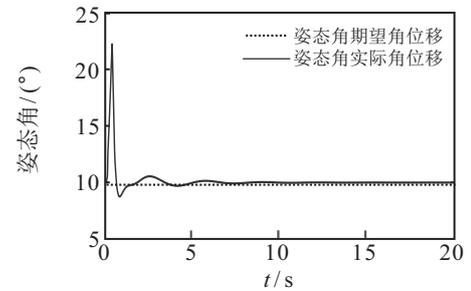


图5 开启防撞柔顺控制基座姿态角位移

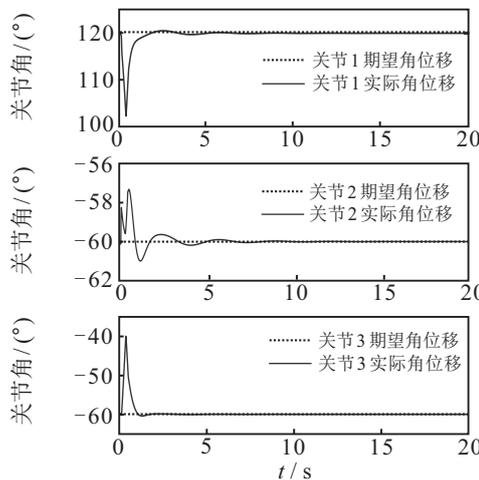


图6 开启防撞柔顺控制关节角位移(关节1~关节3)

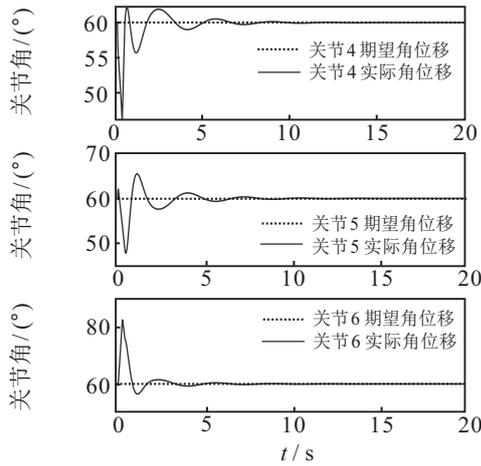


图7 开启避撞柔顺控制关节角位移(关节4~ 关节6)

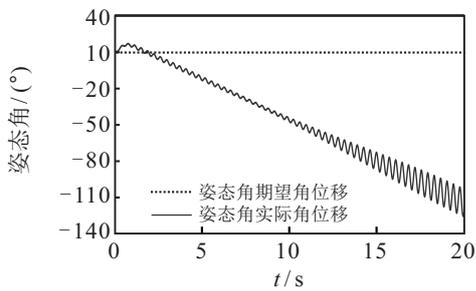


图8 关闭快变子控制器基座姿态角位移

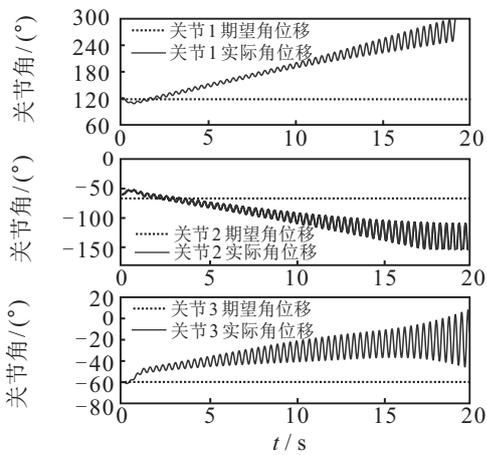


图9 关闭快变子控制器关节角位移(关节1~ 关节3)

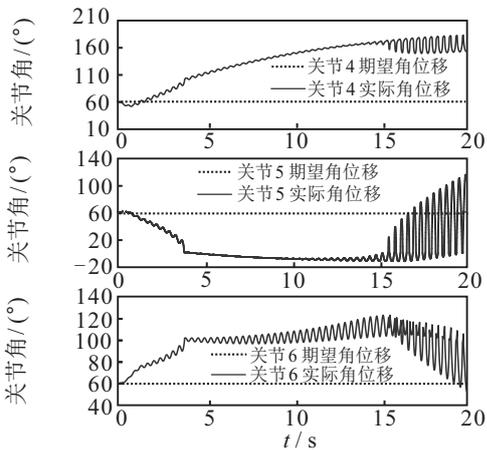


图10 关闭快变子控制器关节角位移(关节4~ 关节6)

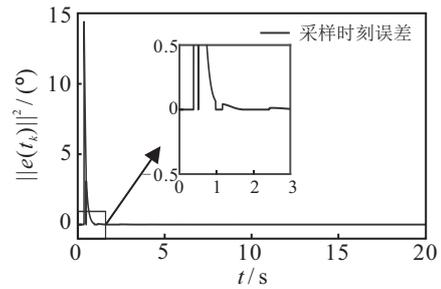


图11 采样时刻误差

图8~ 图10为关闭快变子控制器的轨迹跟踪效果,可知,由于未抑制系统的弹性振动,系统最终将发散。

图11为采样时刻误差,误差不变表示采样时刻不更新和神经网络权值不更新。

5 结论

在空间机器人捕获非合作卫星的碰撞过程及捕获后的镇定过程,为保护机械臂关节不受冲击破坏,本文设计了一种配置RSEA柔顺机构的双臂空间机器人,并提出了与之结合的避撞柔顺控制策略.通过仿真实验可知,RSEA在碰撞过程中可有效缓冲冲击力矩,结合避撞柔顺控制策略后可实现关节电机的保护.另外,基于事件采样输出反馈的神经网络控制,在保证精确跟踪轨迹的同时,有效减少了控制器中神经网络权值的更新频率,提高了控制系统的运行效率。

参考文献(References)

- [1] Pedro Rodríguez P, Marco De S, Roberto L. Velocity matching compliant control for a space robot during capture of a free-floating target[C]. Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2018: 1-9.
- [2] 羊帆, 张国良, 田琦, 等. 自由漂浮空间机器人末端轨迹优化自适应控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(9): 1699-1707.
(Yang F, Zhang G L, Tian Q, et al. Optimal adaptive tracking control of effector trajectory for free-floating space robot[J]. Control and Decision, 2018, 33(9): 1699-1707.)
- [3] AI-Isawi M M A, Sasiadek J Z. Guidance and control of a robot capturing an uncooperative space target[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 93(3/4): 713-721.
- [4] 刘福才, 梁利环, 秦利, 等. 考虑重力影响的空间机械臂轨迹跟踪滑模控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1856-1860.
(Liu F C, Liang L H, Qin L, et al. Track tracking sliding mode control for space manipulator trajectory tracking considering effects of gravity[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1856-1860.)
- [5] Boning P, Dubowsky S. A kinematic approach to determining the optimal actuator sensor architecture for

- space robots[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, 30(9): 1194-1204.
- [6] Coleshill E, Oshinowo L, Rembala R, et al. Dextre: Improving maintenance operations on the international space station[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(9): 869-874.
- [7] 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 C Q, Zhang C L. Dynamic control of a free-floating flexible dual-arm space robotic system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 196-200.)
- [8] 贾庆轩, 徐涛, 陈钢, 等. 基于扰动观测器的机器人宇航员协调操作阻抗控制[J]. *机器人*, 2018, 40(6): 860-869.
(Jia Q X, Xu T, Chen G, et al. Coordinated impedance control of robonaut based on disturbance observer[J]. *Robot*, 2018, 40(6): 860-869.)
- [9] Flores-Abad A, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, 68(8): 1-26.
- [10] 郭闯强, 倪风雷, 刘宏. 多目标位姿约束下空间机器人载体姿态扰动优化[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(2): 230-236.
(Guo C Q, Ni F L, Liu H. Spacecraft attitude disturbance optimization of space robot under multi-position restraint[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, 35(2): 230-236.)
- [11] Diftler M A, Mehling J, Abdallah M E, et al. Robonaut 2: The first humanoid robot in space[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE, 2011: 2178-2183.
- [12] Bouakrif F. Iterative learning control for affine and non-affine nonlinear systems[J]. *Advances and Applications in Nonlinear Control Systems*, 2016, 635(3): 555-574.
- [13] 徐文福, 刘厚德, 李成, 等. 双臂空间机器人捕获运动目标的自主路径规划[J]. *机器人*, 2012, 34(6): 704-714.
(Xu W F, Liu H D, Li C, et al. Autonomous path planning of dual-arm space robot for capturing moving target[J]. *Robot*, 2012, 34(6): 704-714.)
- [14] Gasbarri P, Pisculli A. Dynamic/control interactions between flexible orbiting space-robot during grasping, docking and post-docking manoeuvres[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 110(5): 225-238.
- [15] 程靖, 陈力. 空间机器人双臂捕获航天器后姿态管理、辅助对接操作一体化ELM神经网络控制[J]. *机器人*, 2017, 39(5): 724-732.
(Cheng J, Chen L. Elm neural network control of attitude management and auxiliary docking maneuver after dual-arm space robot capturing spacecraft[J]. *Robot*, 2017, 39(5): 724-732.)
- [16] 张秀丽, 谷小旭, 赵洪福, 等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. *机器人*, 2016, 38(4): 385-394.
(Zhang X L, Gu X X, Zhao H F, et al. Design of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. *Robot*, 2016, 38(4): 385-394.)
- [17] 谢立敏, 陈力. 漂浮基柔性空间机器人的鲁棒控制及振动抑制[J]. *力学学报*, 2012, 44(6): 1057-1065.
(Xie L M, Chen L. Robust control and vibration suppression of free-floating flexible space robot[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(6): 1057-1065.)
- [18] Boufadene M, Belkheiri M, Rabhi A. Adaptive nonlinear observer augmented by radial basis neural network for a nonlinear sensorless control of an induction machine[J]. *International Journal of Automation and Control*, 2018, 12(1): 27-43.
- [19] 梁定坤, 孙宁, 吴易鸣, 等. 采用扰动估计的气动人工肌肉系统非线性控制[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(11): 1912-1919.
(Liang D K, Sun N, Wu Y M, et al. Nonlinear control for pneumatic artificial muscle system with disturbance estimation[J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(11): 1912-1919.)
- [20] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [21] He W, Dong Y T, Sun C Y. Adaptive neural impedance control of a robotic manipulator with input saturation[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, 46(3): 334-344.
- [22] Pekarovskiy A, Nierhoff T, Hirche S, et al. Dynamically consistent online adaptation of fast motions for robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(1): 166-182.
- [23] Avimanyu S, Xu H, Sarangapani J. Neural network-based event triggered state feedback control of nonlinear continuous time systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2016, 27(3): 497-509.

作者简介

曾晨东(1996—), 男, 博士生, 从事空间机器人系统动力学与控制的研究, E-mail: 1040362961@qq.com;

艾海平(1991—), 男, 讲师, 博士, 从事空间机器人动力学与控制的研究, E-mail: ahpwuhan@163.com;

陈力(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间机器人系统动力学与控制等研究, E-mail: chnle@fzu.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)