Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 9 Article 25

1-8-2019

Auxiliary Docking Maneuver Control Simulation of Dual-arm Space Manipulator After Capturing Operation

Cheng Jing
School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China;

Chen Li
School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China;

Auxiliary Docking Maneuver Control Simulation of Dual-arm Space Manipulator After Capturing Operation

Abstract

Abstract: The *auxiliary docking maneuver coordination control* problems for dual-arm space robot capturing a target are discussed. The *dynamic model of closed chain composite system* is established based on theorem of impulse and closed-loop constraints, the impact effect of composite system after capturing operation is analyzed at the same time. The *robust coordinated control method based on extended state observer* (ESO) is designed for the composite system with uncertain parameters. The extended state observer is used to estimate and compensate the unknown dynamics; the precision of docking maneuver is guaranteed by composition and state feedback control. The stability of system is demonstrated through Lyapunov theory. Numerical examples confirm the effectiveness of the proposed auxiliary docking maneuver control method.

Keywords

dual-arm space robot, capturing operation, closed chain system, extended state observer, auxiliary docking maneuver

Recommended Citation

Cheng Jing, Chen Li. Auxiliary Docking Maneuver Control Simulation of Dual-arm Space Manipulator After Capturing Operation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3429-3436.

第 30 卷第 9 期 系统仿真学报© Vol. 30 No. 9
2018 年 9 月 Journal of System Simulation Sep., 2018

空间机器人双臂捕获卫星后辅助对接操作控制仿真

程靖，陈力
(福州大学机械工程及自动化学院，福建省高端装备制造协同创新中心，福州 350116)

摘要：讨论了空间机器人双臂捕获卫星后*辅助对接操作的协调控制*问题。利用冲量定理、闭环约束条件建立了空间机器人双臂捕获卫星后*闭链混合体的系统动力学方程*，并分析了混合体系统受到的冲击效应。针对参数不确定的混合体系统，设计了*基于扩张状态观测器的协调鲁棒控制*方案。该方案利用扩张状态观测器对未知模型进行动态估计补偿，结合状态反馈控制保证了辅助对接操作控制的精度。通过 Lyapunov 理论，证明了系统的稳定性。通过数值仿真实验验证了所提闭链混合体系统辅助对接操作控制方案的有效性。

关键词：双臂空间机器人；捕获操作；闭链系统；扩张状态观测器；辅助对接操作
中图分类号：TP241 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2018) 09-3429-08
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809025

Auxiliary Docking Maneuver Control Simulation of Dual-arm Space Manipulator After Capturing Operation

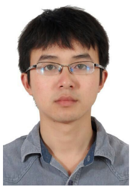
Cheng Jing, *Chen Li*
(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fujian Provincial Collaborative Innovation Center of High-End Equipment Manufacturing, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The *auxiliary docking maneuver coordination control* problems for dual-arm space robot capturing a target are discussed. The *dynamic model of closed chain composite system* is established based on theorem of impulse and closed-loop constraints, the impact effect of composite system after capturing operation is analyzed at the same time. The *robust coordinated control method based on extended state observer* (ESO) is designed for the composite system with uncertain parameters. The extended state observer is used to estimate and compensate the unknown dynamics; the precision of docking maneuver is guaranteed by composition and state feedback control. The stability of system is demonstrated through Lyapunov theory. Numerical examples confirm the effectiveness of the proposed auxiliary docking maneuver control method.

Keywords: dual-arm space robot; capturing operation; closed chain system; extended state observer; auxiliary docking maneuver

引言

空间机器人是在轨服务系统的重要组成部分，其在轨服务任务包括接收补给舱，空间站舱段组装，卫星燃料加注等。由于空间机器人系统具有广泛的适用性，国内外的研究人员都非常重视空间机器人系统的理论研究[1-3]。随着空间科学技术的逐步提高，空间机器人系统也逐渐由单臂空间机器人[4-7]发展到双臂乃至多臂空间机器人，这是由于双臂空间机器人在负载能力，运动稳定性及灵活性



收稿日期：2016-12-02 修回日期：2017-02-12；
基金项目：国家自然科学基金(11372073，11072061)，福建省工业机器人基础部件技术重大研发平台(2014H21010011)；
作者简介：程靖(1989-)，男，江西赣州，博士生，研究方向为空间机器人系统动力学与控制。

等方面都优于单臂空间机器人。需要注意的是，空间机器人进行在轨服务任务过程中必然存在捕获碰撞过程[8]，完成捕获操作后的双臂空间机器人与被捕获目标卫星组成的混合体系统处于受扰运动状态，之后还需要完成目标拖拽、交会对接等任务[9-10]。因此，研究冲击影响下混合体系统的辅助对接操作控制具有重要的现实意义。

在太空失重环境下，双臂空间机器人系统与被捕获目标卫星组成的闭链混合体系统，不仅有左右臂杆的运动干扰及耦合，而且存在基座与臂杆间的强耦合作用，使得地面成熟控制方案难以直接应用。此外，空间机器人在轨双臂捕获卫星操作的控制问题的难点还包括捕获操作双臂空间机器人捕获目标卫星前、后的动量、能量的传递变化，开、闭环结构变拓扑与捕获操作后闭链系统的闭环接触几何与运动学约束问题。陈志勇等[11]对带柔性关节的开链双臂空间机器人提出了滑模神经网络控制方案。王从庆等[12]研究了载体位置、姿态均不受控情况下闭链双臂空间机器人系统的鲁棒协调控制问题。Jia 等[13]对闭链双臂空间机器人提出了自适应控制方案。上述文献都未考虑冲击影响下的双臂空间机器人的控制问题。贾庆轩等[14]从等效质量角度出发，针对不同的操作环境，提出多体系统离散碰撞动力学建模及连续碰撞动力学建模方法，并分析碰撞对系统造成的影响。Shah 等[15]提出了双臂空间机器人捕获卫星操作过程点到点的运动轨迹最优规划方法。Hafez 等[16]为多臂空间机器人系统设计了无反作用力矩的视觉伺服控制方案，使末端执行器完成期望运动，以保证载体受到的扰动最小。黄攀峰等[17]对捕获操作后的空间机器人系统接管控制过程提出了修正的 SDRE 最优控制方案。程靖等[18]基于捕获操作后的双臂空间机器人系统，给出了自适应模糊控制方案，但仅考虑了关节角及姿态镇定控制问题。

为了克服上述空间机器人双臂捕获卫星后辅助对接操作协调控制的难点，文中基于碰撞理论及闭环约束，获得了冲击影响下闭链混合体系统的动力学模型。以此为基础，设计了基于扩张状态观测器的鲁棒协调控制方案，利用扩张状态观测器对未知模型进行动态估计补偿，结合状态反馈保证了辅助对接操作的控制精度。该控制方案具有结构简单，计算量小，易于实现的特点，并且不需要精确的系统动力学模型。最后，通过数值仿真分析，验证了所提辅助对接操作控制方案的有效性。

1 捕获卫星后闭链双臂空间机器人系统动力学模型

双臂空间机器人系统由漂浮载体，左右机械臂组成，如图 1 所示。

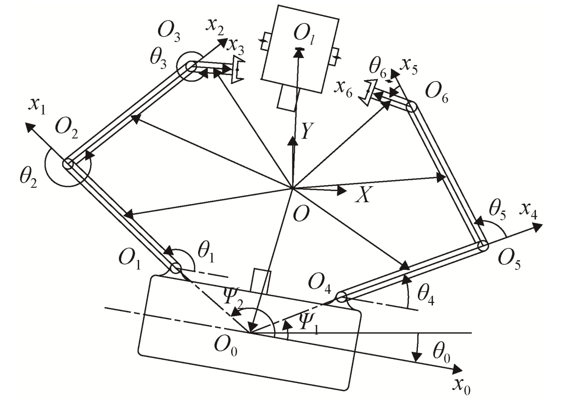


图 1 双臂空间机器人系统及目标系统
Fig. 1 Dual-arm space robot system and target system

将目标卫星视作自由浮动的均质刚体。根据拉格朗日方程及牛顿—欧拉法，双臂空间机器人及目标的动力学方程可分别表示为：

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\tau}_M+\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M}_l\ddot{\boldsymbol{q}}_l=\boldsymbol{J}_l^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}' \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\in\boldsymbol{R}^{9\times9}$；$\boldsymbol{M}_l\in\boldsymbol{R}^{3\times3}$ 分别表示空间机器人系统及目标系统对称、正定惯性矩阵，$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}\in\boldsymbol{R}^{9\times1}$ 是包含科氏力、离心力的列向量。$\boldsymbol{q}=[x_0\quad y_0\quad \theta_0\quad \boldsymbol{\theta}_L^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{\theta}_R^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$，为空间机器人系统广义坐标，$\boldsymbol{\theta}_L=[\theta_1\quad\theta_2\quad\theta_3]^{\mathrm{T}}$ 为左臂各关节的转角，$\boldsymbol{\theta}_R=[\theta_4\quad\theta_5\quad\theta_6]^{\mathrm{T}}$ 为右臂各关节的转角，θ_0 为载体姿态角，x_0、y_0 为载体质心位置坐标。$\boldsymbol{\tau}_M=[\boldsymbol{\tau}_B^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{\tau}_L^{\mathrm{T}}\quad\boldsymbol{\tau}_R^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 为载体及各关节驱动力列向量，$\boldsymbol{\tau}_B=[0\quad 0\quad \tau_{\mathrm{o}}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\tau}_L$、$\boldsymbol{\tau}_R\in\boldsymbol{R}^{3\times1}$ 分别为左右机械臂各关节的驱动力列向量。$\boldsymbol{J}\in\boldsymbol{R}^{6\times9}$ 由 $\boldsymbol{J}_L$、$\boldsymbol{J}_R$ 中

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss9/25
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809025

的元素组成，J_L、$J_R \in R^{3\times6}$ 分别为左右机械臂末端执行器对应的运动Jacobian矩阵。$q_l=[x_l \quad y_l \quad \theta_l]^T$ 为目标质心的位置坐标及姿态角，是被捕获目标卫星的对称、正定的惯量矩阵，$J_l=[J_{lL}^T \quad J_{lR}^T]^T$，$J_{lL}$、$J_{lR} \in R^{3\times3}$ 分别为左右捕获点对应的运动Jacobian 矩阵。F 与 F' 为左右捕获接触点受到的作用力及反作用力矢量。

F' 可做如下分解：

$$F'=(J_l^T)^+M_l\ddot{q}_l+F_I \tag{3}$$

式中：$(J_l^T)^+M_l\ddot{q}_l$ 是操作力项；$(J_l^T)^+$ 为 J_l^T 的伪逆。F_I 是左右臂末端与目标形成的组合体内部的拉、压力，定义在 J_l^T 零空间内，有 $J_l^TF_I=0$。根据牛顿定律，并结合式(1)、式(2)及式(3)可得：

$$M(q)\ddot{q}+H(q,\dot{q})\dot{q}=\tau_M-J^T(J_l^T)^+M_l\ddot{q}_l-J^TF_I \tag{4}$$

捕获操作完成后，空间机器人与目标物锁紧固连。考虑左臂末端执行器与捕获位置运动关系有：

$$J_L\dot{q}_f(t)=J_{lL}\dot{q}_l(t) \tag{5}$$

式中：$q_f=[x_0 \quad y_0 \quad \theta_0 \quad \theta_L^T]^T$ 并将其设为闭链系统广义坐标列向量。

根据多边形闭环约束条件，可得左右机械臂关节角的运动关系为：

$$G_L\dot{\theta}_L=G_R\dot{\theta}_R \tag{6}$$

式中：$G_L=[J_{0L}^T \quad I_{3\times1}]^T$；$G_R=[J_{0R}^T \quad I_{3\times1}]^T$。$J_{0L}\in R^{2\times3}$，$J_{0R}\in R^{2\times3}$ 分别为载体联体坐标系下左接触点对应的两个运动 Jacobian 矩阵。

由式(6)可推得：

$$\dot{q}=U^T\dot{q}_f \tag{7}$$

式中：$U=[I_{6\times6} \quad U_1^T]$，$U_1=[O_{3\times3} \quad G_R^{-1}G_L]$。

式(7)对时间求导得：

$$\ddot{q}=U^T\ddot{q}_f+\dot{U}^T\dot{q}_f \tag{8}$$

由文献[18]的推导过程可得捕获操作后系统的运动状态为：

$$\dot{q}_f(t_0+\Delta t)=L^{-1}[R\dot{q}_f(t_0)+UJ^T(J_l^T)^+M_l\dot{q}_l(t_0)] \tag{9}$$

其中 $L=R+UJ^T(J_l^T)^+M_lJ_{lL}^{-1}J_L$，$R=UMU^T$，$t_0$ 为接触瞬时时刻，$\Delta t\to0$ 为短暂的接触时间。

将式(5)、式(7)和式(8)代入式(4)可得捕获操作后的闭链系统动力学方程及：

$$M_h\ddot{q}_f+H_h\dot{q}_f=U\tau_M-UJ^TF_I \tag{10}$$

式中：$M_h=R+UJ^T(J_l^T)^+M_lJ_l^{-1}J_L$；$H_h=U[HU^T+M\dot{U}^T]+UJ^T(J_l^T)^+M_lJ_{lL}^{-1}(\dot{J}_L-\dot{J}_{lL}J_{lL}^{-1}\dot{J}_L)$。

2 基于扩张状态观测器的协调鲁棒控制设计

完成捕获操作后的空间机器人系统处于受扰运动状态，需要进行镇定运动及辅助对接操作控制。辅助对接操作协调控制问题可描述为：载荷在载体(空间站)的联体坐标系内按照既定的规律运动并到达指定位置。在分析了载体、载荷相对运动的运动学关系的基础上，设计载体姿态及各臂关节铰控制输入以实现对接操作的精确控制。

令：

$$\tau_h=U\tau_M，\quad F_{hI}=UJ^TF_I \tag{11}$$

将 τ_h 写成分块矩阵的形式：

$$\tau_h=[\tau_{h1}^T \quad \tau_{h2}^T]^T \tag{12}$$

式中：$\tau_{h1},\tau_{h2}\in R^{3\times1}$。

通过矩阵运算后可得 $F_{hI}=0$，即内力项对系统的运动无影响，并且有：

$$\tau_B=\tau_{h1}，\quad \Omega[\tau_L^T \quad \tau_R^T]^T=\tau_{h2} \tag{13}$$

式中：$\Omega=[I_{3\times3} \quad (G_R^{-1}G_L)^T]$。

故可将式(10)改写为分块矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} M_{h11} & M_{h12} \\ M_{h21} & M_{h22} \end{bmatrix}\ddot{q}_f+\begin{bmatrix} H_{h11} & H_{h12} \\ H_{h21} & H_{h22} \end{bmatrix}\dot{q}_f=\begin{bmatrix} 0_{2\times1} \\ \bar{\tau} \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中：M_{h11}、$H_{h11}\in R^{2\times2}$；M_{h12}、$H_{h12}\in R^{2\times4}$；M_{h21}、$H_{h21}\in R^{4\times2}$，M_{h22}、$H_{h22}\in R^{4\times4}$；$\bar{\tau}=[\tau_0 \quad \tau_{h2}^T]^T$。由于闭链混合体不受其他外力的作用，根据动力学方程的推导过程可知 H_{h11}、H_{h21} 矩阵元素均为零。则可获得闭链混合体系统完全驱动形式的动力学模型为：

$$\bar{M}\ddot{q}_\theta+\bar{H}\dot{q}_\theta=\bar{\tau} \tag{15}$$

式中：$\bar{M}=M_{h22}-M_{h21}M_{h11}^{-1}M_{h12}$；$\bar{H}=H_{h22}-M_{h21}M_{h11}^{-1}H_{h12}$；$q_\theta=[\theta_0 \quad \theta_L^T]^T$。

为了完成闭链混合体系统姿态运动镇定及对接操作联合控制，定义系统输出列向量为：

$$Y=[\theta_0 \quad x_l' \quad y_l' \quad \theta_l']^T \tag{16}$$

式中：x_l'、y_l'、θ_l' 分别为载荷质心在基联体坐标系下的位置及载荷姿态。

将上式对时间求导得：

$$\dot{\boldsymbol{Y}}=\boldsymbol{J}_Y(\boldsymbol{q}_\theta)\dot{\boldsymbol{q}}_\theta \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{J}_Y(\boldsymbol{q}_\theta)\in \boldsymbol{R}^{4\times4}$ 为载体联体坐标系下对应的广义运动 Jacobian 矩阵。

若 $\boldsymbol{J}_Y(\boldsymbol{q}_\theta)$ 可逆，则由(17)式可推得：

$$\dot{\boldsymbol{q}}_\theta=\boldsymbol{J}_Y^{-1}\dot{\boldsymbol{Y}}，\ \ddot{\boldsymbol{q}}_\theta=\boldsymbol{J}_Y^{-1}[\ddot{\boldsymbol{Y}}-\dot{\boldsymbol{J}}_Y\dot{\boldsymbol{q}}_\theta] \tag{18}$$

利用(18)式将动力学方程(15)式转化为工作空间动力学方程：

$$\boldsymbol{M}_Y\ddot{\boldsymbol{Y}}+\boldsymbol{H}_Y\dot{\boldsymbol{Y}}=\overline{\boldsymbol{\tau}} \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{M}_Y=\bar{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{J}_Y^{-1}$，$\boldsymbol{H}_Y=(\bar{\boldsymbol{H}}-\bar{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{J}_Y^{-1}\dot{\boldsymbol{J}}_Y)\boldsymbol{J}_Y^{-1}$。

定义系统的跟踪误差及参考输出速度为：

$$\boldsymbol{e}=\boldsymbol{Y}_d-\boldsymbol{Y} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_d$ 为包含载体姿态及载荷位置姿态的期望运动轨迹列向量。

设计控制输入为：

$$\overline{\boldsymbol{\tau}}=\hat{\boldsymbol{M}}_Y[\ddot{\boldsymbol{Y}}_\mathrm{d}+\boldsymbol{u}]+\hat{\boldsymbol{H}}_Y\dot{\boldsymbol{Y}} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为鲁棒控制项。

将(21)式代入(19)式后可得误差动力学方程如下：

$$\ddot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{u}=\boldsymbol{N}(\boldsymbol{q}_f,\dot{\boldsymbol{q}}_f,\boldsymbol{Y},\dot{\boldsymbol{Y}}) \tag{22}$$

式中：$\boldsymbol{N}=\hat{\boldsymbol{M}}_Y^{-1}[(\boldsymbol{M}_Y-\hat{\boldsymbol{M}}_Y)\ddot{\boldsymbol{Y}}+(\boldsymbol{H}_Y-\hat{\boldsymbol{H}}_Y)\dot{\boldsymbol{Y}}]$，$\hat{\boldsymbol{M}}_Y$、$\hat{\boldsymbol{H}}_Y$ 为 $\boldsymbol{M}_Y$、$\boldsymbol{H}_Y$ 的估计值。

为了控制设计需要，将(22)式写成如下分散形式：

$$e_i+u_i=N_i(\boldsymbol{q}_f,\dot{\boldsymbol{q}}_f,\dot{\boldsymbol{Y}},\ddot{\boldsymbol{Y}})\ (i=1,2,3,4) \tag{23}$$

式中：下标 i 表示对应列向量的第 i 项。

定义状态变量 $x_{i1}=e_i$，$x_{i2}=\dot{e}_i$，则(23)式可写为如下状态方程的形式：

$$\begin{cases}\dot{x}_{i1}=x_{i2}\\ x_{i2}=N_i(\boldsymbol{q}_f,\dot{\boldsymbol{q}}_f,\dot{\boldsymbol{Y}},\ddot{\boldsymbol{Y}})-u_i\end{cases} \tag{24}$$

将上述方程中不确定项视为系统的一维扩张状态变量：令 $x_{i3}=N_i$，$\dot{x}_{i3}=\xi_i(t)$。$\xi_i(t)$ 为未知的有界函数，则(24)式可改写为：

$$\begin{cases}\dot{x}_{i1}=x_{i2}\\ \dot{x}_{i2}=x_{i3}-u_i\\ \dot{x}_{i3}=\xi_i(t)\end{cases} \tag{25}$$

假设载体载荷的位置及移动速度是可以通过测量或计算得到，则可设计一个二阶扩张状态观测器对未知动态进行估计：

$$\begin{cases}\sigma_{i1}=z_{i1}-x_{i2}\\ \dot{z}_{i1}=z_{i2}-\beta_1\sigma_{i1}-u_i\\ \dot{z}_{i2}=-\beta_2\mathrm{fal}(\sigma_{i1},\alpha,\gamma)\end{cases} \tag{26}$$

其中，非线性函数 fal() 定义如下：

$$\mathrm{fal}(\sigma,\alpha,\gamma)=\begin{cases}|\sigma|^\alpha\operatorname{sgn}\sigma(\sigma),\ |\sigma|>\gamma\\ \dfrac{\sigma}{\gamma^{1-\alpha}},\qquad |\sigma|\leqslant\gamma\end{cases} \tag{27}$$

式中：$0<\sigma<1$．γ、α、β_1、β_2 是大于零的系数。适当选取上述观测器参数，可保证 z_{i2} 对未知模型动态的估计补偿。

鲁棒控制项 u_i 可设计为：

$$u_i=k_{ip}x_{i1}+k_{iv}x_{i2}+z_{i2} \tag{28}$$

式中：z_{i2} 为鲁棒补偿项；k_{ip}、k_{ip} 为适当选取的系数。

引理 1[19] 对于不确定的系统方程(25)式，假定未知函数 $\xi_i(t)$ 是有界的。采用二阶扩张状态观测器对状态 x_{i2}、x_{i3} 进行估计时，如 $\beta_1^2>4.5c\beta_2\left|\dfrac{\mathrm{dfal}(\sigma_{i1},\alpha,\gamma)}{\mathrm{d}\sigma_{i1}}\right|$，$c$>1，则估计误差可收敛至一个闭区域。

$$\varDelta\sigma_{i1}=\sup_{|\xi_i\leqslant\eta|}\{|z_{i1}-x_{i2}|\}=\begin{cases}\left(\dfrac{2c\eta}{\beta_2(c-1)}\right)^{\frac{1}{\alpha}},\ \dfrac{2c\eta}{\beta_2(c-1)}>\gamma^\alpha\\ \dfrac{2c\eta}{\beta_2(c-1)}\gamma^{1-\alpha}，其他\end{cases} \tag{29}$$

$$\varDelta\sigma_{i2}=\sup_{|\xi_i\leqslant\eta|}\{|z_{i2}-x_{i3}|\}=\beta_2\varDelta\sigma_{i1}-\frac{\beta_3}{2\beta_2}\mathrm{fal}(\varDelta\sigma_{i1},\alpha,\gamma) \tag{30}$$

引理 2[20] 假设 $V(t)$ 是一个任意给定的连续李雅普诺夫函数，如果其满足 $\dot{V}\leqslant-\lambda V+\varphi(t)$，$\lambda$ 为大于零的常数，$\varphi(t)>0$；则当 $\varphi(t)=C$ 是常值(或 $\lim\limits_{t\to\infty}\varphi(t)=C$)时，系统是一致最终全局有界，即系统稳定。并且有：

$$V(t)\leqslant\frac{1}{\lambda}[C-(C-\lambda V(0)e^{-(\lambda t)})],\forall t>0 \tag{31}$$

针对参数不确定的闭链双臂空间机器人系统，在引理 1 的条件下，采用由式(21)、式(26)、式(28)组成的控制规律，可保证系统的跟踪误差按指数收敛到一个闭区域。

证明：令 $\boldsymbol{K}_\mathrm{P}=\mathrm{diag}\{[k_{1p},k_{2p},k_{3p},k_{4p}]\}$，$\boldsymbol{K}_\mathrm{V}=\mathrm{diag}\{[k_{1v},k_{2v},k_{3v},k_{4v}]\}$。定义李亚普诺夫函数：

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss9/25
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809025

$$V=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{e}+\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{e}} \tag{32}$$

对上式求导并利用式(22)，式(23)和式(28)可得：

$$\begin{aligned}
\dot{V}&=\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{e}+\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\ddot{\boldsymbol{e}}=\\
&\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{e}+\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}(-\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{e}-\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}}\dot{\boldsymbol{e}}-z_2+\boldsymbol{x}_3)=\\
&-\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}}\boldsymbol{e}+\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_3-z_2)<\\
&-\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}}\boldsymbol{e}+\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\dot{\boldsymbol{e}}\|\leqslant\\
&-\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}})\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}+\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\dot{\boldsymbol{e}}\|=\\
&-\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}})(2V-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{e})+\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\dot{\boldsymbol{e}}\|\leqslant\\
&-2\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}})V+\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{V}})\lambda_{\max}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}})\|\boldsymbol{e}\|^2+\\
&\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\dot{\boldsymbol{e}}\|\leqslant-\lambda V+\varphi(t)
\end{aligned} \tag{33}$$

式中：$\varphi(t)=\sup_{t\to\infty}\{\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_V)\times\lambda_{\max}(\boldsymbol{K}_P)\|\boldsymbol{e}\|^2+\|\Delta\sigma_2\|\cdot\|\dot{\boldsymbol{e}}\|\}=C$；$\lambda=2\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_V)$。$\lambda_{\min}(g)$ 和 $\lambda_{\max}(g)$ 分别为矩阵的最小和最大特征值。根据引理 2 可知系统是一致渐渐稳定的，而且 V 按指数收敛 $e^{-(\lambda t)}$，则跟踪误差 $\boldsymbol{E}=[\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\quad\dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 收敛到一个闭区域：

$$O_E=\left\{\boldsymbol{E}\,|\,\|\boldsymbol{E}\|^2\leqslant\frac{C}{(\lambda\cdot\min\{1,\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}})\})}\right\} \tag{34}$$

由式(13)中可知，降阶的空间机器人系统动力学方程式(15)中载体姿态的控制力矩列向量可直接获得，而关节力矩有多组解。为获得全部控制输入，可利用加权最小范数法分配关节控制力矩：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{\tau}_L\\ \boldsymbol{\tau}_R\end{bmatrix}=\boldsymbol{Z\Omega}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\Omega Z\Omega}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{\tau}_{h2} \tag{35}$$

式中：$\boldsymbol{Z}\in\boldsymbol{R}^{6x6}$ 为对称正定的权值矩阵。

3 仿真算例

为验证所提控制方案对冲击影响下的闭链双臂空间机器人系统的有效性，采用图 1 所示做平面运动的双臂空间机器人系统及目标系统，进行辅助对接操作过程数值仿真模拟。载体和负载的质心分别为 O_0、O_l，各臂杆转动铰的中心分别为 $O_i\ (i=1,2,\cdots,6)$，O_0O_1 和 O_0O_4 连线的长度都为 $d_0=1.062$ m。$\psi_1=2.791$ rad，$\psi_2=0.349$ rad。ψ_1、ψ_2 分别为载体质心 O_1、O_4 连线相对于 x_0 轴的夹角。空间机器人载体质量及转动惯量为 m_0=200 kg，I_0=90 kg·m^2。臂杆的转动惯量分别为 I_i=10 kg·m^2 $(i=1,2,4,5)$，$I_j=2\mathrm{kg\cdot m^2}$ $(j=3,6)$；质量分别选取为，$m_i=10$ kg $(i=1,2,4,5)$，m_j=2.5 kg $(j=3,6)$；长度为 $l_i=2$ m $(i=1,2,4,5)$，$l_j=0.5$ m $(j=3,6)$。目标卫星的质量为 $m_l=50$ kg，转动惯量为 $I_l=50\ \mathrm{kg\cdot m^2}$。$O_l$ 到左右捕获位置距离分别为 $d_L=d_R=0.5$ m。

取估计模型为：$\hat{\boldsymbol{M}}_Y=0.8\boldsymbol{M}_Y$，$\hat{\boldsymbol{H}}_Y=0.8\boldsymbol{H}_Y$。

设接触碰撞前瞬间漂浮载体姿态及载荷的位置姿态为：

$$\boldsymbol{Y}=[10^\circ\quad 0\,\mathrm{m}\quad 3.8281\,\mathrm{m}\quad 0^\circ]^{\mathrm{T}}$$

被捕获目标相对于空间机器人的初始速度为：$\dot{x}_{l0}=-0.1$ m/s，$\dot{y}_{l0}=-0.1$ m/s，$\dot{\theta}_{l0}=-0.35$ rad/s

满足引理 1 的条件下，式(28)中的相关增益系数选取如下：γ=0.1，α=0.5，β_1=5，β_2=0.1，k_{ip}=10，k_{iv}=5。式(35)中取 $\boldsymbol{Z}$=diag{[1 0.8 0.6 1 0.8 0.6]}，之后求得一组控制力矩值，以完成关节运动控制。

仿真总时间为 100 s，在碰撞结束后的 2 s 的反应时间内系统处于不受控状态，之后开启控制：采用所提控制方案进行分段控制，以完成载体受扰姿态镇定与被捕获目标对接操作所需求的位置与角度的精确控制。仿真全程内对接操作分如下两段进行：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_d^1=[10^\circ\quad 0\,\mathrm{m}\quad 2.5\mathrm{m}\quad 0^\circ]^{\mathrm{T}} \qquad (2<t\leqslant 20)\\ \boldsymbol{X}_d^2=\left[10^\circ\quad 0\,\mathrm{m}\quad [2.5-\dfrac{0.5401}{80}(t-20)]\mathrm{m}\quad 0^\circ\right]^{\mathrm{T}}\\ (20<t\leqslant 100)\end{cases}$$

在 20 s 时刻之前将载荷移动到指定位置及姿态角，之后再进行精细的对接操作控制，以避免接触位置发生冲击破坏。从图 2~5 为系统运动过程的轨迹跟踪情况，图 5 为对应的分段动态演示。数值仿真结果表明，采用所提控制方案进行分段控制可保证载体受扰姿态镇定与被捕获目标对接操作所需求的位置与角度的精确控制。

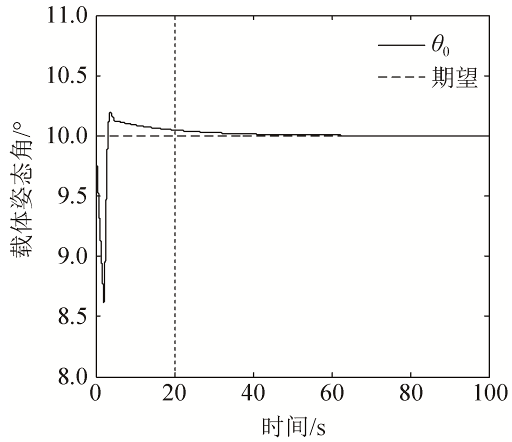


图 2　载体姿态角变化情况
Fig. 2　Time history of base attitude

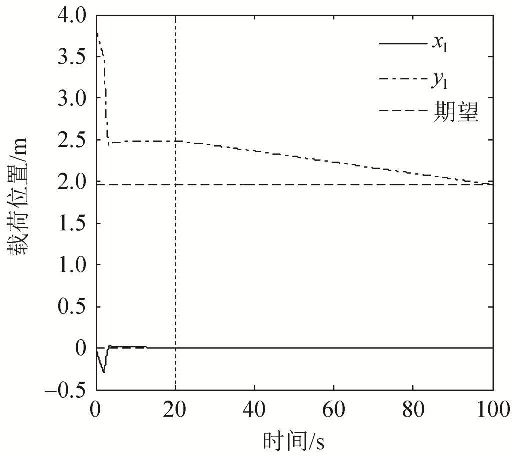


图 3　载荷位置变化情况
Fig. 3　Time history of load position

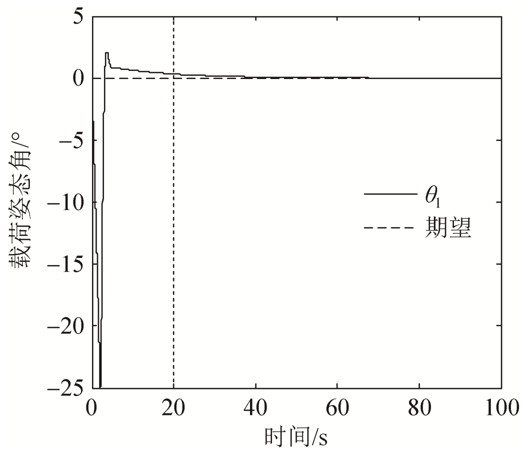
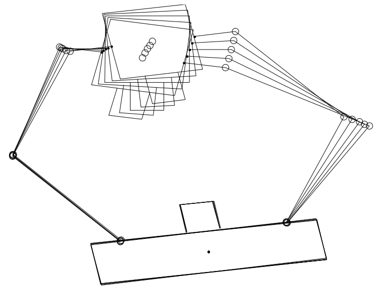
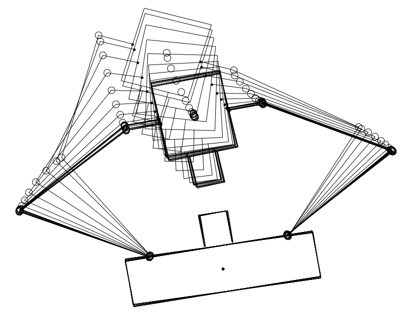


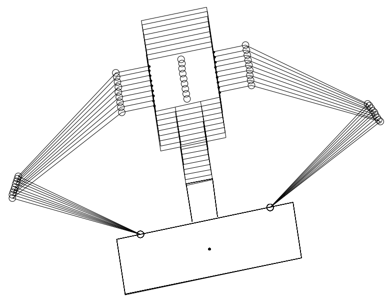
图 4　载荷姿态角变化情况
Fig. 4　Time history of load attitude



(a) 控制开启前闭链系统运动状态



(b) 控制器开启后第一阶段



(c) 控制开启后第二阶段

图 5　捕获操作后闭链系统运动过程(分段控制)
Fig. 5　Closed chain system motion process after capturing operation(subdivision control)

图 5(a)为形成闭链系统后载体、载荷的受扰运动情况，图 5(b)显示了开及姿态调整并到达指定相对位置，图 5(c)载体载荷的对接操作过程，最终误差 $e_i \leqslant 1\times10^{-4}$ (量纲为米或度)。若不进行分段操作，直接设定终端位形 $\boldsymbol{X}_d = [10^\circ \quad 0\ \mathrm{m} \quad 1.959\,9\ \mathrm{m} \quad 0^\circ]^{\mathrm{T}}$，即点点控制。仿真总时长为 30 s，获得闭链系统运动过程见图 6。在点到点的控制过程中，当 t=3.5 s 时，载荷在 y_0 方向位置误差 $e_3 = -0.11\ \mathrm{m}$，即对接位置发生了碰撞干涉情况，这对于对接操作过程是有损害的。

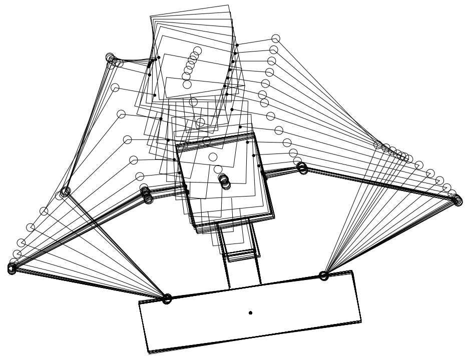


图 6　捕获操作后闭链系统运动过程(点点控制)
Fig. 6　Closed chain system motion process after capturing operation(point to point control)

为了更好的验证控制算法的鲁棒性能，同时考虑到太空环境与任务的复杂性，下面增加了对参数不确定性变化的仿真结果对比分析。当负载参数发生突变时：目标卫星质量及转动惯量为 m_l=100 kg，$I_l = 80\,\mathrm{kg \cdot m^2}$ $(t \geqslant 40\,\mathrm{s})$。仍然采用上述分段操作步骤及相同控制器参数进行仿真验证，结果如图 7~9 所示。

由仿真结果可以看出，控制器具有良好的跟踪性能，当 t=40 s 时，有效负载发生变化，对载体、载荷姿态角及载荷的位置产生了非常小的扰动，同时控制器在短的时间内达到较好的跟踪精度，最终误差仍为 $e_i \leqslant 1\times10^{-4}$ (量纲为米或度)。说明该控制算法对系统具有良好的鲁棒性。

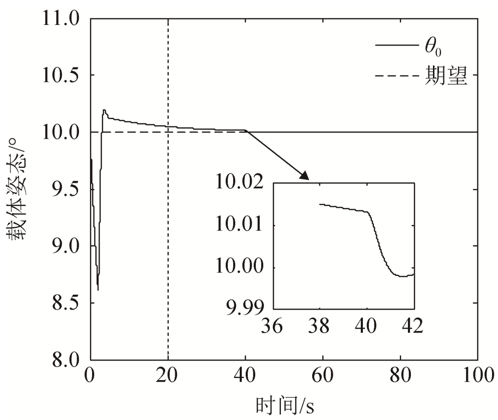


图 7　载体姿态角变化情况
Fig. 7　Time history of base attitude

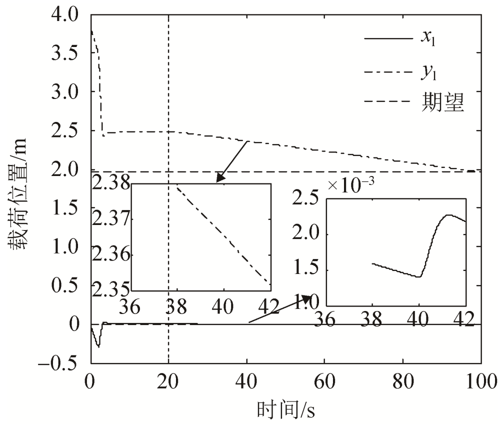


图 8　载荷位置变化情况
Fig. 8　Time history of load position

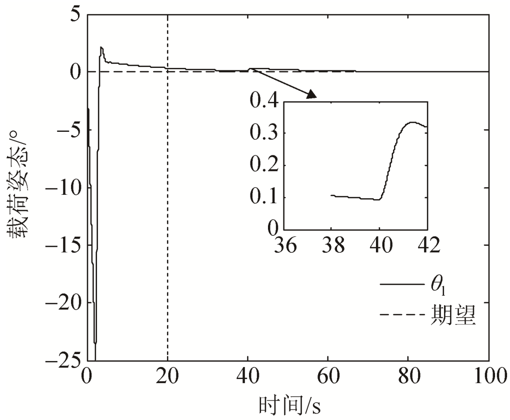


图 9　载荷姿态角变化情况
Fig. 9　Time history of load attitude

4　结论

本文基于碰撞理论及闭环约束条件获得了双臂空间机器人捕获目标卫星后的闭链系统动力学方程，并求得混合体的受扰运动状态。若不对冲击影响下的闭链混合体系统加以控制，将会导致持续的翻滚。所提控制方案结构简单，计算量小，易于实现，可适用于参数不确定的系统，并且不要求动力学方程关于惯性参数的线性化。系统仿真结果表明，采用的分段控制方案可以精确实现辅助对接操作控制。同时，经过适当的矢量运算，上述控制方案也可推广至三维运动的空间机器人系统中。

参考文献:

[1] Narikiyo T, Ohmiya M. Control of a planar space robot: Theory and experiments[J]. Control Engineering, 2006,

8(14): 875-883.

[2] Abad A F, Ma O, Pham K, et al. A review of space robotics technologies for on-orbit servicing[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 68(1): 1-26.

[3] Huang P, Zhang F, Meng Z. Adaptive control for spacedebris removal with uncertain kinematics, dynamics and states[J]. Acta Astronautica, 2016, 128(1): 416-430.

[4] Cheng J, Chen L. Collision analysis for free-flying space manipulator with flexible arms capturing satellite adaptive neural network control and vibration suppression for combined system[C]// The 67th International Astronautical Congress 2016, Guadalajara, IAF, 2016. (EI: 20171403524924)

[5] 洪在地，贠超，陈力. 柔性臂漂浮基空间机器人建模与轨迹跟踪控制[J]. 机器人, 2007, 29(1): 92-96.
Hong Z D, Yun C, Chen L. Modeling and trajectory tracking control of a free-floating space robot with flexible manipulators[J]. Robot, 2007, 29(1): 92-96.

[6] Pazelli T F, Terra M H, Siqueira A A, et al. Experimental investigation on adaptive robust controller design applied to a free-floating space manipulator[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(1): 395-408.

[7] 董楸煌，陈力. 空间机器人捕获目标过程的自适应仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2969-2973.
Dong Q H, Chen L. Adaptive control simulation of space manipulator capturing target[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2969-2973.

[8] Isenberg R D. Target rendezvous with a space robot using relative position and attitude measurements[C]// Proceedings of the IEEE Southeast Con 2015, Florida: IEEE, 2015: 1-6.

[9] Debus T J, Dougherty S P. Overview and performance of the front-end robotics enabling near-term demonstration (FREND) robotic arm[C]// AIAA Infotech and Aerospace Conference. Seattle, Washington, USA: AIAA, 2009: 187.

[10] Boge T, Wimmer T, Ma O, et al. EPOS: using robotics for RvD simulation of on-orbit servicing missions[C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Toronto, 2010: 1-15.

[11] 陈志勇，陈力. 柔性关节双臂空间机器人的滑模神经网络控制[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2950-2956.
Chen Z Y, Chen L. Sliding-mode Neural Network Control of Flexible-joint Dual-arm Space Robot[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2950-2956.

[12] 王从庆，石宗坤，袁华. 自由浮动空间双臂机器人的鲁棒协调控制[J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 16-20.
Wang C Q, Shi Z K, Yuan H. Robust Coordinated Control of A Free-Floating Dual-arm Space Robot[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(4): 16-20.

[13] Jia Y H, Hu Q, Xu S J. Dynamics and Adaptive Control of a Dual-arm Space Robot with Closed-loop Constraints and Uncertain Inertial Parameters[J]. Acta Mechanica Sinica, 2014, 30(1): 112-124.

[14] 贾庆轩，张龙，陈刚，等. 基于等效质量的太空机械臂多体系统碰撞分析[J]. 宇航学报，2015, 36(12): 1356-1362.
Jia Q X, Zhang L, Chen G, et al. Collision Analysis of Space Manipulator Multi-Body System Based on Equivalent Mass[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(12): 1356-1362.

[15] Shah S V, Sharf I, Misra A K. Reactionless path planning strategies for capture of tumbling objects in space using a dual-arm robotic system[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences, Boston, MA: AIAA, 2013.

[16] Hafez A A, Mithun P, Anurag V A, et al. Reactionless visual servoing of a multi-arm space robot combinedwith other manipulation tasks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 91(1): 1-10.

[17] 王明，黄攀峰，孟中杰，等. 空间机器人抓捕目标后姿态接管控制[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3165-3175.
Wang M, Huang P F, Meng Z J, et al. Attitude takeover control after capture of target by a space robot[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3165-3175.

[18] 程靖，陈力. 空间机器人双臂捕获卫星力学分析及镇定控制[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 832-842.
Cheng J, Chen L. Mechanical analysis and calm control of dual-arm space robot for capturing a satellite[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 832-842.

[19] Shi X P, Liu S R, Liu F. New robust control strategy for module manipulators via sliding mode control with an extended state observer [J]. Proc IMechE Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2010, 224(5): 545-555.

[20] Qu Z, Dawson M D, Lim S Y, et al. A new class of robust control laws for tracking of robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1994, 13(4): 355-363.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss9/25
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809025