

6-1-2020

## Force/Position Control for Dual-arm Space Robot Capturing Object

Qiuhuang Dong

1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;*

Chen Li

2. *School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;*

Haiyun Li

1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;*

Zhiyong Chen

2. *School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Force/Position Control for Dual-arm Space Robot Capturing Object

### Abstract

**Abstract:** The dynamics control and simulation of *dual-arm space robot* capture object was studied. The dynamics model of space robot was derived by the second Lagrange equation, for the *object capture* process, the *impact* influence on space robot base and arm was calculated by momentum theory. For the space robot and object *close-chain system* after capturing, a *force/position coordinate control* algorithm was designed to control the system motion and object clamp force; the stability, reliability and safety of capture process would be ensured by the control algorithm. The simulation result based on the dynamics model and control algorithm was carried out. The result indicates the validity of above analysis.

### Keywords

dual-arm space robot, capture object, impact, close-chain system, force/position control

### Recommended Citation

*Dong Qiu Huang, Chen Li, Li Haiyun, Chen Zhiyong.* Force/Position Control for Dual-arm Space Robot Capturing Object[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(2): 424-429.

## 双臂空间机器人捕获目标的力/位协调控制

董楸煌<sup>1</sup>, 陈力<sup>2</sup>, 李海芸<sup>1</sup>, 陈志勇<sup>2</sup>

(1.福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002; 2.福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 研究双臂空间机器人捕获目标过程的动力学控制和仿真。利用第二类拉格朗日方程建立空间机器人动力学模型, 并基于动量定理, 计算捕获目标过程机器人漂浮基座和机械臂运动状态受到的碰撞影响效应。针对捕获目标后形成的闭链系统, 设计力/位形协调控制算法对系统的运动状态和目标的夹持内力进行控制, 以保证捕获过程系统的稳定性、可靠性和安全性。基于动力学模型和控制算法进行数值仿真, 仿真结果验证了上述控制算法的有效性。

**关键词:** 双臂空间机器人; 捕获目标; 碰撞; 闭链系统; 力/位形控制

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 02-0424-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201702026

### Force/Position Control for Dual-arm Space Robot Capturing Object

Dong Qiuhuang<sup>1</sup>, Chen Li<sup>2</sup>, Li Haiyun<sup>1</sup>, Chen Zhiyong<sup>2</sup>

1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The dynamics control and simulation of *dual-arm space robot* capture object was studied. The dynamics model of space robot was derived by the second Lagrange equation, for the *object capture* process, the *impact* influence on space robot base and arm was calculated by momentum theory. For the space robot and object *close-chain system* after capturing, a *force/position coordinate control* algorithm was designed to control the system motion and object clamp force; the stability, reliability and safety of capture process would be ensured by the control algorithm. The simulation result based on the dynamics model and control algorithm was carried out. The result indicates the validity of above analysis.

**Keywords:** dual-arm space robot; capture object; impact; close-chain system; force/position control

## 引言

随着空间探索深入, 有越来越多舱外在轨操作任务需要完成, 利用空间机械臂协助或代替宇航员去完成这些任务, 将有效减小宇航员的工作压力和风险, 其相关技术的发展也越来越受重视<sup>[1-3]</sup>。美国、加拿大、欧空局、日本等国较早地开展空间机械臂技术的研究, 并完成在轨试验和工程应用, 积

累了丰富的技术和经验; 我国在空间机械臂领域的研究起步较晚, 但也取得一定的成果<sup>[4]</sup>。

上述实现应用的空间机械臂多是单臂结构, 双臂空间机器人是两机械臂组成的系统, 通过双臂协调操作将使其具有更大的灵活性、可靠性, 并完成更复杂的任务, 但是其运动学、动力学和控制系统也更加复杂, 很多单机械臂的研究成果难以推广应用于双臂空间机器人<sup>[5-6]</sup>。双臂空间机器人捕获目标过程包含捕获前、后非碰撞过程和捕获时的接触碰撞过程, 关于空间机器人捕获目标前、后的非碰撞过程已有较多研究成果。文献[7-8]分别针对刚性和柔性双臂空间机器人捕获目标前的动力学和控



收稿日期: 2015-11-05 修回日期: 2016-01-10;  
基金项目: 国家自然科学基金(11372073, 11502052),  
福建省自然科学基金(2016J05110);  
作者简介: 董楸煌(1985-), 男, 福建泉州, 博士, 讲师, 研究方向为机器人动力学分析与控制。

<http://www.china-simulation.com>

制进行研究, 文献[9]研究双臂空间机器人协调操作目标的力/位置控制, 并未涉及捕获碰撞过程。文献[10]以减小碰撞对双臂空间机器人动量影响为优化目标, 对其捕获目标前的构型进行优化控制, 但只是采用单臂进行捕获, 没有充分利用另一机械臂, 且未考虑捕获后的控制问题。文献[11]仅针对单臂空间机械臂, 研究捕获目标受到的碰撞效应和后镇定控制。

本文将研究空间机器人双臂协调捕获目标过程受到的碰撞扰动影响, 及捕获后双臂协调对目标的操作控制。首先建立双臂空间机器人的动力学模型, 然后通过动量定理计算空间机器人捕获目标过程受到的碰撞扰动影响, 最后针对双臂捕获目标后形成的闭链几何约束系统, 设计相应控制算法实现捕获后双臂协调对目标的力/位形操作控制。

## 1 动力学建模

### 1.1 运动学分析

双臂空间机器人系统如图 1 所示对称结构, 由漂浮基座和两机械臂组成的多刚体系统。漂浮基座质心  $O_0$  相对于惯性坐标系  $OXY$  的位置矢量为  $\mathbf{r}_0 = (x_b \ y_b)^T$ , 姿态为  $\theta_0$ ; 两机械臂关节铰角分别为  $\theta_i (i=1, \dots, 6)$ 。取系统的广义坐标为:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{r}_0^T \ \boldsymbol{\theta}^T)^T$$

其中, 漂浮基位置  $\mathbf{r}_0$  为不受控状态矢量, 漂浮基姿态和机械臂关节角  $\boldsymbol{\theta}$  为受控状态矢量。

两机械臂末端手爪  $P_R$  和  $P_L$  相对于惯性坐标系的位置和姿态矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{PR} = \mathbf{r}_0 + l_0 \mathbf{e}_0 + l_1 \mathbf{e}_1 + l_2 \mathbf{e}_2 + l_3 \mathbf{e}_3 \\ \theta_{PR} = \theta_0 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\ \mathbf{r}_{PL} = \mathbf{r}_0 - l_0 \mathbf{e}_0 + l_4 \mathbf{e}_4 + l_5 \mathbf{e}_5 + l_6 \mathbf{e}_6 \\ \theta_{PL} = \pi + \theta_0 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $l_0$  为  $O_0$  到  $O_1$  的距离,  $l_i (i=1, 2, \dots, 6)$  为各连杆长度,  $\mathbf{e}_i$  为  $x_i (i=0, 1, \dots, 6)$  轴相对于惯性坐标系的基矢量。对式(1)求导, 可得末端手爪  $P_R$  和  $P_L$  相对于惯性坐标系的速度和广义速度间关系:

$$\mathbf{V}_p = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times 9}$  为对应的运动雅克比矩阵。式(2)即为双臂空间机器人系统的运动学关系, 是空间机器人系统的运动控制的理论基础。

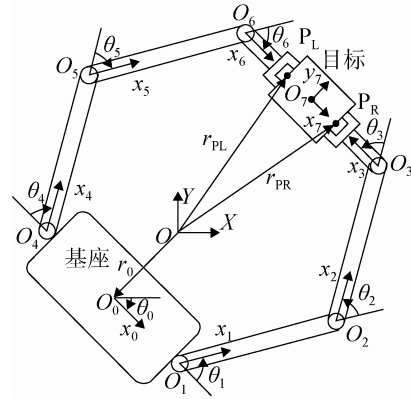


图 1 双臂空间机器人与目标  
Fig. 1 Dual-arm space robot and object

### 1.2 动力学建模

双臂空间机器人自由漂浮基座和机械臂的运动存在运动耦合, 其动力学建模更加复杂。根据多体系统动力学理论, 本文将利用第二类拉格朗日方程对上述空间机器人多刚体系统进行动力学建模。

假设空间机器人捕获目标过程受到的外力只有两机械臂末端手爪和目标的接触碰撞力。首先, 根据虚功原理, 并结合运动学关系式(2), 漂浮基双臂空间机器人受到的广义力  $\mathbf{Q}_0$  为<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 1} \\ \boldsymbol{\tau}_a \end{pmatrix} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_p = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_p \quad (3)$$

其中,  $\boldsymbol{\tau}_a = (\tau_0 \ \tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5 \ \tau_6)^T$  为基座姿态和两机械臂关节铰控制输入力矩,  $\mathbf{F}_p$  为两末端手爪  $P_R$ ,  $P_L$  和目标的接触碰撞力。然后, 利用第二类拉格朗日方程, 可推导得到漂浮基双臂空间机器人动力学模型<sup>[14]</sup>:

$$\mathbf{D}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_p \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$  为系统对称正定的惯量矩阵,  $\mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{9 \times 1}$  为包含科氏力和离心力的列矢量。

### 1.3 接触碰撞动力学分析

如图 1 所示, 假设空间机器人捕获的目标为一

做平面自由运动刚体,且捕获操作在同一平面内完成,目标质心  $O_7$  位于其几何中心。在捕获目标过程中,目标上与两机械臂末端手爪的捕获接触点为:  $P'_R$ 、 $P'_L$ 。建立目标的连体坐标系  $O_7x_7y_7$ ,且  $x_7$  轴与矢量  $O_7P'_R$  重合。选取目标连体坐标系相对于惯性坐标系的位置和姿态:  $x_m$ 、 $y_m$  和  $\theta_m$  为广义坐标,即定义  $q_m = (x_m \ y_m \ \theta_m)^T$  为目标的广义坐标矢量,根据运动学关系可求得目标上两捕获接触点速度与目标广义速度间的运动学关系:

$$V_{P'} = J_t \dot{q}_m \quad (5)$$

$V_{P'} = (\dot{x}_{PR} \ \dot{y}_{PR} \ \omega_{PR} \ \dot{x}_{PL} \ \dot{y}_{PL} \ \omega_{PL})^T$  表示目标上两捕获接触点  $P'_R$ 、 $P'_L$  的运动速度矢量,  $J_t \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$  表示对应的运动雅克比矩阵。

假设在捕获目标过程中,目标除了与两机械臂末端手爪相互接触碰撞之外,不受其它外力作用,可推导得到其动力学模型如下<sup>[14]</sup>:

$$D_t \ddot{q}_m = J_t^T F_{P'} \quad (6)$$

式中,  $D_t$  为目标的惯量矩阵,  $F_{P'} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  为目标上两捕获接触点  $P'_R$ 、 $P'_L$  受到的机械臂末端手爪  $P_R$ 、 $P_L$  的作用力,并可基于式(6)分解为<sup>[9]</sup>:

$$F_{P'} = (J_t^T)^+ D_t \ddot{q}_m + F_1 \quad (7)$$

其中,  $(J_t^T)^+ D_t \ddot{q}_m$  项的作用将使目标产生运动;  $F_1$  为  $J_t^T$  零空间内的作用力,即:  $J_t^T F_1 = 0$ , 该作用力不会对目标的运动产生影响,主要是双臂对目标产生夹持作用力以防止松脱。

在捕获目标过程中,机械臂末端手爪和目标发生接触碰撞,根据作用力与反作用力关系,可知  $F_P = -F_{P'}$ , 并将式(7)和式(4)联立,得:

$$D \ddot{q} + H \dot{q} = \tau - J^T (J_t^T)^+ D_t \ddot{q}_m - J^T F_1 \quad (8)$$

假设双臂空间机器人两机械臂末端手爪  $P_R$ 、 $P_L$ , 在  $t_0$  时刻与目标上对应的捕获接触点  $P'_R$ 、 $P'_L$  同时发生接触碰撞,经过短暂的  $\Delta t$  时段接触碰撞后两者锁紧固连,合为一闭链组合体系统,如图 1。根据动量定理,将式(8)在  $[t_0, t_0 + \Delta t]$  时段内积分得:

$$D(\dot{q}_{t_0+\Delta t} - \dot{q}_{t_0}) + J^T (J_t^T)^+ D_t(\dot{q}_{m(t_0+\Delta t)} - \dot{q}_{m(t_0)}) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\tau - H\dot{q} - J^T F_1) dt \quad (9)$$

为避免目标与机械臂接触碰撞,碰撞冲击力对关节造成冲击破坏,在接触碰撞过程中,令所有控制输入  $\tau = 0$ , 且各关节可自由转动,以缓冲目标对空间机器人的碰撞冲击。由于空间机器人系统的广义坐标、广义速度及  $F_1$  在  $\Delta t$  时段内的增量值均为有限量,而  $\Delta t$  是近似为 0 的极小量,则式(9)等号右边积分后的值近似为零,与等号左边的值相比可忽略不计,则式(9)可进一步化简为:

$$D(\dot{q}_{t_0+\Delta t} - \dot{q}_{t_0}) + J^T (J_t^T)^+ D_t(\dot{q}_{m(t_0+\Delta t)} - \dot{q}_{m(t_0)}) = 0 \quad (10)$$

空间机器人捕获目标后和目标形成闭链几何约束系统,则机械臂两手爪和目标上捕获接触点有相同速度,并结合两系统运动学关系式(2)和式(5),式(10)可化简为:

$$\dot{q}_{t_0+\Delta t} = G^{-1} [D\dot{q}_{t_0} + J^T (J_t^T)^+ D_t \dot{q}_{m(t_0)}] \quad (11)$$

式中,  $G = D + J^T (J_t^T)^+ D_t (J_t^T)^+ J$ 。式(11)表示空间机器人双臂协调捕获自由运动目标过程中,接触碰撞对其运动状态的影响效应。

#### 1.4 捕获目标后闭链系统的动力学模型

双臂空间机器人捕获目标后,两者形成闭链几何约束组合体系统。根据空间机器人系统和目标系统的对应运动学关系式(2)和式(5)得:

$$J\dot{q} = J_t \dot{q}_m \quad (12)$$

由作用力与反作用力关系推导得到的式(8)仍然成立,并将式(12)代入,可得到组合体动力学模型:

$$D_z \ddot{q} + H_z \dot{q} = \tau - J^T F_1 \quad (13)$$

式中,  $D_z = D + J^T (J_t^T)^+ D_t (J_t^T)^+ J$ ,  $H_z = H + J^T (J_t^T)^+ D_t (J_t^T)^+ [\dot{J} - \dot{J}_t (J_t^T)^+ J]$ 。根据空间机器人系统广义坐标受控和不受控,将式(13)写为如下分块子矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} D_{z11} & D_{z12} \\ D_{z21} & D_{z22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{r}_0 \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_{z11} & H_{z12} \\ H_{z21} & H_{z22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{r}_0 \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 1} \\ \tau \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} J_1^T \\ J_2^T \end{pmatrix} F_1 \quad (14)$$

式中:  $D_{z_{ij}}$ ,  $H_{z_{ij}}$  和  $J_i$  ( $i=1,2; j=1,2$ ) 分别为  $D_z$ ,  $H_z$  和  $J$  的分块子矩阵。

根据空间机器人系统动力学模型推导过程, 由式(14)中的上部可求得  $\ddot{\mathbf{j}}_0$  的表达式, 并代入式(14)下部消去  $\ddot{\mathbf{j}}_0$  项, 得到闭链组合体系统完全驱动形式的动力学模型为:

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}_\theta \mathbf{F}_1 \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{M} = \mathbf{D}_{222} - \mathbf{D}_{221} \mathbf{D}_{211}^{-1} \mathbf{D}_{212}$ ,  $\mathbf{C} = \mathbf{H}_{222} - \mathbf{D}_{221} \mathbf{D}_{211}^{-1} \mathbf{H}_{212}$ ,  $\mathbf{J}_\theta = \mathbf{J}_2^T - \mathbf{D}_{221} \mathbf{D}_{211}^{-1} \mathbf{J}_1^T$ 。

完全驱动形式的动力学模型式(15)与欠驱动形式动力学模型式(14)是等价的, 但是在漂浮基座位置不受控情况下, 参照完全驱动形式动力学模型式(15)进行控制算法的设计将更加方便。

## 2 力/位形协调控制算法设计

双臂空间机器人捕获目标过程的接触碰撞会对其运动状态产生影响, 需要对漂浮基座姿态和机械臂关节角运动状态进行控制, 以及协调控制双臂对目标的夹持内力, 即力/位形协调控制。因此, 基于动力学模型式(15), 设计控制算法:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta) + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{J}_\theta \mathbf{F}_{1d} \quad (16)$$

式中,  $\boldsymbol{e}_\theta = \boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}_d$  为系统的状态误差,  $\boldsymbol{\theta}_d$  为期望状态指令,  $\mathbf{K}_v$  和  $\mathbf{K}_p$  为系统位形控制的正定反馈增益矩阵,  $\mathbf{F}_{1d}$  为双臂对目标的期望夹持内力。显然式(16)的前两项就是系统位形控制项, 最后一项是双臂对目标的夹持内力控制项。将式(16)代入式(15), 可得:

$$\mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta) = \mathbf{J}_\theta (\mathbf{F}_{1d} - \mathbf{F}_1) \quad (17)$$

将式(17)等号两边同时左乘  $\mathbf{J}_\theta^T \mathbf{J}_\theta^+$ , 得:

$$\mathbf{J}_\theta^T \mathbf{J}_\theta^+ \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta) = \mathbf{J}_\theta^T (\mathbf{F}_{1d} - \mathbf{F}_1) \quad (18)$$

由于  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{F}_{1d}$  均在  $\mathbf{J}_\theta^T$  的零空间内, 则式(18)为:

$$\tilde{\mathbf{M}}(\ddot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta) = 0 \quad (19)$$

式中,  $\tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{J}_\theta^T \mathbf{J}_\theta^+ \mathbf{M}$ 。假设  $\tilde{\mathbf{M}}^{-1}$  存在, 则式(19)等号两边同时左乘  $\tilde{\mathbf{M}}^{-1}$ , 得:

$$\ddot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta = 0 \quad (20)$$

因此, 根据式(20)可知, 利用上述控制算法式(16)对捕获目标后的闭链组合体系统进行控制, 只需选取适当的反馈增益, 将可使漂浮基座姿态和机械臂

关节角达到期望的稳定状态。另外, 由式(17)可得, 当  $t \rightarrow 0$  时:

$$\mathbf{F}_{1d} - \mathbf{F}_1 = \mathbf{J}_\theta^+ \mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_v \dot{\boldsymbol{e}}_\theta - \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_\theta) = 0$$

即:  $\mathbf{F}_1 \rightarrow \mathbf{F}_{1d}$ 。最终, 通过上述控制算法即可实现对闭链组合体系统进行力/位形协调控制。

## 3 数值仿真

以图 1 所示做平面运动漂浮基双臂空间机器人协调捕获自由运动目标过程为例进行数值仿真。空间机器人系统和目标相关参数为:

$$m_0 = 200 \text{ kg}, \quad m_i = 20 \text{ kg} (i=1,2,4,5),$$

$$m_i = 5 \text{ kg} (i=3,6), \quad m_7 = 50 \text{ kg};$$

$$I_0 = 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \quad I_i = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 (i=1,2,4,5),$$

$$I_i = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 (i=3,6), \quad I_7 = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$l_0 = 1 \text{ m}, \quad l_i = 2 \text{ m} (i=1,2 \dots 6), \quad l_7 = 0.5 \text{ m}。$$

假设空间机器人捕获目标前, 自由运动的目标正以一定的速度飞向静止、不受控的空间机器人的机械臂末端手爪, 此时空间机器人的静止初始构型为:  $\mathbf{q} = (0 \text{ m} \ 0 \text{ m} \ 0^\circ \ 60^\circ \ 60^\circ \ 60^\circ \ -60^\circ \ -60^\circ \ -60^\circ)^T$  在  $t_0 = 0 \text{ s}$  时刻, 空间机器人的两机械臂末端手爪  $\mathbf{P}_R$  和  $\mathbf{P}_L$  成功接触目标上对应的捕获手柄  $\mathbf{P}'_R$  和  $\mathbf{P}'_L$ , 并经过极其短暂接触碰撞后锁紧固连, 形成闭链几何约束组合体系统。而后开启漂浮基座姿态和两机械臂关节角控制器, 利用上述控制算法对闭链组合体系统进行控制, 以使漂浮基座姿态、机械臂关节角度和双臂对目标的夹持内力处于期望的稳定状态。

仿真时, 假设捕获前目标的飞行速度:  $\dot{x}_m = 0.2 \text{ m/s}$ ,  $\dot{y}_m = -0.2 \text{ m/s}$ ,  $\dot{\theta}_m = 10^\circ/\text{s}$ 。双臂对目标的夹持内力期望值取为:

$$\mathbf{F}_{1d} = (5 \text{ N} \ 0 \text{ N} \ 0 \text{ N} \cdot \text{m} \ -5 \text{ N} \ 0 \text{ N} \ 0 \text{ N} \cdot \text{m})^T。$$

双臂空间机器人捕获目标整个过程, 基座姿态、机械臂关节角度和双臂对目标夹持内力的仿真结果如图 2~5 所示, 根据仿真结果可知:

(1) 双臂空间机器人捕获目标后, 运动目标与双臂末端的接触碰撞对整个系统的运动状态产生一定的影响。在进行捕获后控制的初始阶段(0.2~5 s)

漂浮基座姿态、机械臂关节角度和双臂对目标的夹持内力均有一定的扰动。

(2) 根据图 2~4 的仿真结果, 漂浮基座姿态和两机械臂关节角度的运动存在相互耦合的作用。由于假设双臂捕获目标后, 机械臂末端手爪将和目标锁紧固连, 即双臂空间机器人捕获目标后, 两者将形成闭链几何约束的结构形式, 因此, 漂浮基座姿态、机械臂各连杆和目标的运动需相互协调, 以满足闭链几何约束条件。

(3) 同样由于闭链几何约束条件, 且根据图 5 双臂对目标的夹持内力仿真结果可知, 两机械臂对目标的夹持内力满足作用力与反作用力关系。

(4) 根据整个时间历程的仿真结果, 采用所设计力/位形协调控制算法, 捕获目标后, 双臂空间机器人漂浮基姿态、关节角和双臂对目标的夹持内力均能平稳的跟踪期望值(5 s 之后), 具有良好的协调控制效果, 以保证捕获目标后双臂空间机器人系统稳定。这也在控制算法稳定性证明基础上, 进一步验证所设计的控制算法的有效性。

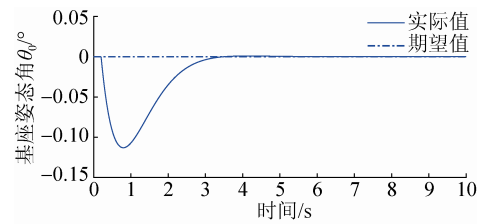


图 2 漂浮基座姿态

Fig. 2 The attitude of free-floating base

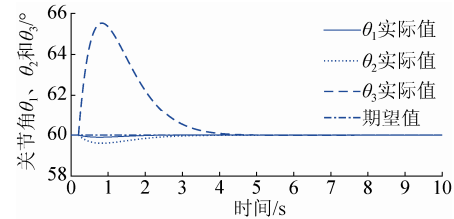


图 3 右机械臂关节角度

Fig. 3 The joint angle of right arm

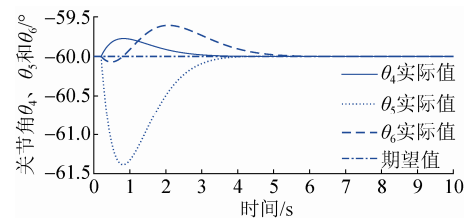


图 4 左机械臂关节角度

Fig. 4 The joint angle of left arm

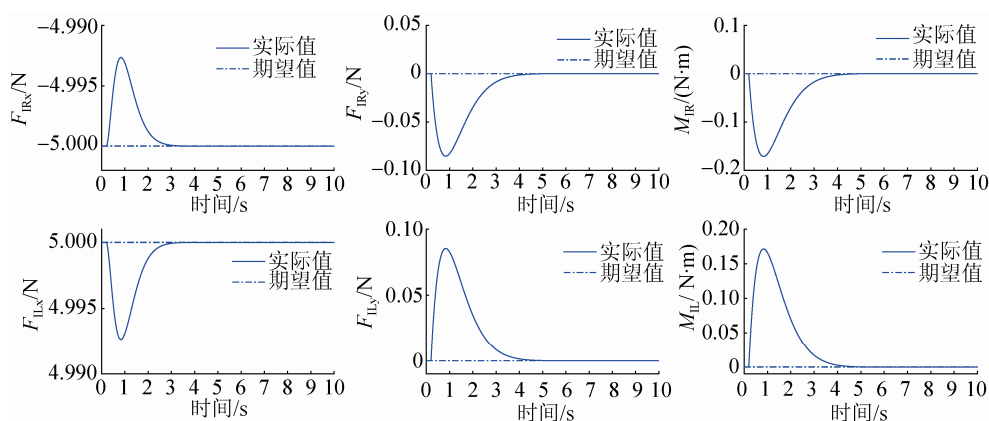


图 5 空间机器人两机械臂对目标的夹持力

Fig. 5 The clamping force of the space robot dual-arm acting on the object

## 4 结论

空间机器人在捕获目标过程中, 漂浮基座、机械臂和目标之间存在动力学耦合作用。特别是在捕获目标的接触碰撞过程不可避免, 原来自由运动的目标将会对空间机器人漂浮基座和机械臂的运动状态产生很大的扰动影响。基于完全驱动形式的动

力学模型设计的力/位形协调控制算法, 除了能将漂浮基座姿态、机械臂关节角度的状态调整到期望的稳定状态, 同时还可以控制两机械臂末端手爪对目标的夹持内力, 以避免目标松脱和夹持过紧, 保证目标捕获过程的安全性; 通过控制算法稳定性证明和数值仿真验证上述控制算法的可行性和有效

性。所提出的捕获策略和控制方法是在一定假设情况下设计的, 虽然具有一定的局限性, 但是对于工程实际的应用仍具有一定的理论参考价值。

### 参考文献:

- [1] Flores-Abad, Ma O, Pham K, et al. A Review of Space Robotics Technologies for on-Orbit Servicing [J]. Progress in Aerospace Sciences (S0376-0421), 2014, 68(6): 1-26.
- [2] 牟宗高, 徐文福, 孟得山. 空间机器人一体化仿真系统的研究与实现 [J]. 宇航学报, 2013, 34(8): 1084-1090. (Mu Zonggao, Xu Wenfu, Meng Deshan. Research and Implementation of Integrated Simulation System of Space Robot [J]. Journal of Astronautics (S1000-1328), 2013, 34(8): 1084-1090.)
- [3] Dubowsky S, Papadopoulos E. The Kinematics, Dynamics, and Control of Free-Flying and Free-Floating Space Robotic Systems [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation (S1042-296X), 1993, 9(5): 531-543.
- [4] 刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述 [J]. 载人航天, 2015, 21(5): 435-443. (Liu Hong, Jiang Zainan, Liu Yechao. Review of Space Manipulator Technology [J]. Manned Spaceflight (S1674-5825), 2015, 21(5): 435-443.)
- [5] 李俊峰, 王照林. 带空间机械臂的充液航天器姿态动力学研究 [J]. 宇航学报, 1999, 20(2): 81-86. (Li Junfeng, Wang Zhaolin. Study on Attitude Dynamics of a Liquid-Filled Spacecraft with Manipulators [J]. Journal of Astronautics (S1000-1328), 1999, 20(2): 81-86.)
- [6] 戈新生, 陈立群, 吕群. 空间机械臂非完整运动规划的遗传算法研究 [J]. 宇航学报, 2005, 26(3): 262-266. (Ge Xinsheng, Cheng Liqun, Lv Jie. Nonholonomic Motion Planning of a Space Manipulator System Using Genetic Algorithm [J]. Journal of Astronautics (S1000-1328), 2005, 26(3): 262-266.)
- [7] 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): 1098-1105. (Su Wenjing, Wu Licheng, Sun Fuchun, et al. Dynamics Modeling Control and Simulation for Flexible Dual-Arm Space Robot [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2003, 15(8): 1098-1105.)
- [8] 郭益深, 陈力. 双臂空间机器人的自适应鲁棒性联合控制 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(3): 625-628. (Guo Yishen, Chen Li. Adaptive Robust Control for Free-Floating Space Robot System with Dual-Arm to Track Desired Trajectory in Joint Space [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2009, 21(3): 625-628.)
- [9] 陈志煌, 陈力. 闭链双臂空间机器人抓持载荷基于径向基函数神经网络的补偿控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 38-44. (Chen Zhihuang, Chen Li. Compensation Control for Grasped Object of Dual-Arm Space Robot with Closed-chain Based on Radial Basis Function Neural Network [J]. Journal of Mechanical Engineering (S0577-6686), 2011, 47(7): 38-44.)
- [10] 郭闻昊, 王天舒. 空间机器人抓捕目标星碰撞前构型优化 [J]. 宇航学报, 2015, 36(4): 390-396. (Guo Wenhao, Wang Tianshu. Pre-Impact Configuration Optimization for a Space Robot Capturing Target Satellite [J]. Journal of Astronautics (S1000-1328), 2015, 36(4): 390-396.)
- [11] Dong Q, Chen L. Impact Dynamics Analysis of Free-Floating Space Manipulator Capturing Satellite on Orbit and Robust Adaptive Compound Algorithm Design for Suppressing Motion [J]. Applied Mathematics and Mechanics (S0253-4827), 2014, 35(4): 413-422.
- [12] 董楸煌, 陈力. 空间机械臂捕获目标过程的自适应控制仿真 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2969-2973. (Dong Qiuhuang, Chen Li. Adaptive Control Simulation of Space Manipulator Capturing Target [J]. Journal of system Simulation (S1004-731X), 2014, 26(12): 2969-2973.)
- [13] 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. (Xiong Youlun, Ding Han, Liu Enchang. Robotics [M]. Beijing, China: China Machine Press, 1993.)
- [14] 刘延柱, 潘振宽, 戈新生. 多体系统动力学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014. (Liu yanzhu, Pan Zhenkuan, Ge Xinsheng. Dynamics of Multibody System [M]. Second Edition. Beijing, China: Higher Education Press, 2014.)

(上接第 423 页)

- [7] Aykent B, Paillot D, Mérienne F, et al. Study of the influence of different washout algorithms on simulator sickness for a driving simulation task [C]// ASME 2011 World Conference on Innovative Virtual Reality. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2011: 331-341.
- [8] Young L R, Oman C M. Model for vestibular adaptation to horizontal rotation [J]. Aerospace Medicine (S0001-9402), 1969, 40(10): 1076.
- [9] 王辉, 陈学森. 飞行模拟器六自由度运动平台的仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(5): 778-782. (Wang Hui, Chen Xuesen. Simulating Six-DOF Motion Platform of Flight Simulator [J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(5): 778-782.)