

空间机动目标双臂协调柔顺操作控制方法

刘磊^{1,2}, 张涛¹

1. 清华大学自动化系, 北京 100084

2. 空间智能控制技术全国重点实验室, 北京 100094



摘要 针对被操作目标运动状态变化导致双臂与目标间内力发生突变的问题, 提出了一种空间机动目标双臂协调柔顺操作控制方法。首先, 针对空间双臂协调柔顺操作任务, 分别建立双臂空间机器人开链动力学模型和闭链动力学模型; 其次, 考虑目标机动产生的扰动, 设计阻抗参数自主调整策略, 在双臂末端与目标间作用力发生较大变化时, 可以保证双臂协调操作任务的平稳性和安全性; 最后, 搭建双臂协调柔顺操作地面物理试验系统, 并开展物理仿真试验验证, 试验结果表明了本文所提方法的有效性。

关键词 在轨服务; 双机械臂; 柔顺控制; 协调控制; 机动目标

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

文章编号: 1006-3242(2024)01-0077-07

Dual-arm Coordinated Compliant Control for Maneuvering Orbital Targets

LIU Lei^{1,2}, ZHANG Tao¹

1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. National Key Laboratory of Space Intelligent Control, Beijing 100094, China

Abstract In order to cope with the sudden change of the internal forces between both manipulators and the target due to its unexpected maneuvering, a dual-arm coordinated compliant controller for maneuvering target is proposed. Firstly, the open chain dynamics and the closed chain dynamics of dual-arm space manipulators are established, respectively, for dual-arm coordinated compliant operation tasks. Then, by taking into consideration the disturbance caused by the unexpected maneuvering of the target, the autonomous adjustment strategy for the impedance parameters is designed, which can ensure the smoothness and safety of the dual-arm coordinated operation tasks in the case of significant changes of the internal forces between both the manipulators and the target. Finally, a physical simulation experiment system is deployed for dual-arm coordinated compliant operation, and an experiment is implemented, which shows the performance of the proposed dual-arm coordinated transfer controller.

Key words On-orbit service; Dual-arm; Compliant control; Coordinated control; Maneuvering target

资助项目: 国家自然科学基金(5197708)

收稿日期: 2023-10-08

作者简介: 刘磊(1974-), 男, 研究员, 主要从事空间操作控制和空间机构驱动控制等方面的研究, E-mail: liulei@spacechina.com; 张涛(1969-), 男, 博士, 教授, 主要从事非线性控制理论、智能控制和空间机器人等方面的研究。

中; τ^i 为第 i 部机械臂的关节力矩; F_h^i 为第 i 部机械臂末端所受的空间力, 投影在 F_{hi} 中。矩阵 H_m^i 和 J_m^i 与固定基座机械臂的对应矩阵完全相同, 其值仅与关节角 q^i 有关; c_m^i 除与 q^i 和 q^{-i} 相关外, 还与平台角速度 ω_b 相关, 这与固定基座机械臂不同。

将机械臂相关变量进行“堆叠”, 可得到更加紧凑的动力学方程, 即:

$$H_c \dot{u}_c + c_c = F_c + J_h^T F_h \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} H_c = \begin{bmatrix} H_b & H_{bm} \\ H_{bm}^T & H_m \end{bmatrix}, \dot{u}_c = \begin{bmatrix} A_b \\ \ddot{q} \end{bmatrix} \\ c_c = \begin{bmatrix} c_b \\ c_m \end{bmatrix}, F_c = \begin{bmatrix} F_b \\ \tau \end{bmatrix}, J_h^T = \begin{bmatrix} J_b^T \\ J_m^T \end{bmatrix} \\ H_m = \text{diag}(H_m^1, H_m^2, \dots, H_m^N) \\ c_m = [c_m^{1T} \ c_m^{2T} \ \dots \ c_m^{NT}]^T \\ \tau = [\tau^{1T} \ \tau^{2T} \ \dots \ \tau^{NT}]^T \\ F_h = [F_h^{1T} \ F_h^{2T} \ \dots \ F_h^{NT}]^T \\ J_b^T = [J_b^{1T} \ J_b^{2T} \ \dots \ J_b^{NT}] \\ J_m^T = \text{diag}(J_m^{1T}, J_m^{2T}, \dots, J_m^{NT}) \\ J_b^i = [{}^b \Phi^{hi}]^T \end{cases}$$

目标动力学模型采用单刚体的六自由度动力学方程表示

$$H_t \dot{u}_t + c_t = -J_{h^*}^T F_h \quad (3)$$

式中: \dot{u}_t 为 F_t 的空间加速度;

$$H_t = \begin{bmatrix} m_t E_3 & -m_t [{}^t p^{icm}]^\times \\ m_t [{}^t p^{icm}]^\times & I^{t/t} \end{bmatrix}; c_t = \begin{bmatrix} \omega_t^\times \omega_t^\times m_t {}^t p^{icm} \\ \omega_t^\times I^{t/t} \omega_t \end{bmatrix};$$

$$J_{h^*}^T = {}^t \Phi^{hi*} {}^t \Phi^{hi}; J_{h^*}^T = [J_{h^*}^{1T} \ J_{h^*}^{2T} \ \dots \ J_{h^*}^{NT}]^T。$$

1.2 闭链动力学模型

空间机器人与目标构成的闭链系统的动力学方程可由空间机器人开链动力学方程、目标动力学方程和闭链约束方程导出。

首先需要进行空间机器人-目标的闭链关系分析, 从速度层面和加速度层面建立抓捕点处的约束方程, 各臂与目标固连时, 系统的约束方程组可由各臂的加速度约束方程并列得到

$$J \dot{u} = k \quad (4)$$

综合式(2)~(4), 可以得到以系统加速度 \dot{u} 和机械臂末端受力 F_h 为未知量的动力学方程

$$\begin{bmatrix} H & J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ -F_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F - c \\ k \end{bmatrix} \quad (5)$$

若以机械臂末端对目标施加的力 $F_{h^*} = -F_h$ 为

未知量, 则式(5)可写为

$$\begin{bmatrix} H & J^T \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ F_{h^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F - c \\ k \end{bmatrix} \quad (6)$$

某部机械臂未完成抓捕时, 从约束方程和约束力中去掉相应的项即可。

2 空间机动目标双臂协调柔顺操作控制方法

为处理双臂协调操作过程中目标存在机动导致较大外部扰动的情况, 本文提出一种基于主从控制和阻抗控制的双臂协调操作控制方法。

2.1 基于主从控制和阻抗控制的协调操作方法

双臂对目标执行协调操作任务时, 主臂采用纯位置控制, 按照预设轨迹运动; 从臂采用阻抗控制, 与目标间保持某一预设接触力并跟随物体运动。

1) 主臂位置控制律设计

首先, 针对主臂设计位置控制律。给定关节角速度指令 \dot{q}_r 时, 主臂的控制律为

$$\tau = H_m K_{Dm} (\dot{q}_r - \dot{q}) + c_m \quad (7)$$

式中: K_{Dm} 为正定对称矩阵。

给定关节角 q_r 指令时, 主臂的控制律为

$$\tau = H_m K_{Dm} [K_{Pm} (q_r - q) - \dot{q}] + c_m \quad (8)$$

式中: K_{Pm} 为正定对称矩阵。

2) 从臂阻抗控制律设计

接下来, 针对从臂设计阻抗控制律。若从臂末端与目标间作用力小于某阈值时, 从臂采用定阻抗控制策略仍可实现双臂协调操作; 若从臂末端与目标间作用力大于某阈值时, 从臂采用定阻抗控制策略已经无法达到控制目标, 此时需要按一定策略对阻抗参数进行自主调整, 从而达到双臂协调柔顺操作的目的。

阻抗控制算法^[16]建立了力、位置及速度的阻抗关系式, 可同时实现对力和位置的控制。阻抗关系通常以如下二阶形式给出

$$F_h - F_h^d = M(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + B(\dot{x}_d - \dot{x}) + K(x_d - x) \quad (9)$$

式中: F_h 为机械臂末端与目标之间的接触力/力矩; F_h^d 为机械臂末端的期望接触力/力矩; M 为对称的惯性系数矩阵; B 为对称的阻尼系数矩阵; K 为对称的刚度系数矩阵; x_d 为机械臂末端的期望位姿; x 为机械臂末端实际位姿。

考虑机械臂末端接触力/力矩时, 若基座自由漂浮(姿轨控系统关闭), 则动力学方程可写为

$$\mathbf{H}_m \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_m = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}_m^T \mathbf{F}_h \quad (10)$$

根据式(9)~(10),利用逆动力学控制方法可设计定阻抗控制律如下

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{c}_m - \mathbf{J}_m^T \mathbf{F}_h + \mathbf{H}_m \mathbf{J}_m^{-1} \{ \ddot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{J}}_m \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{F}_h - \mathbf{F}_h^d - \mathbf{B}(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) - \mathbf{K}(\mathbf{x}_d - \mathbf{x})] \} \quad (11)$$

当机械臂末端与目标间接触力小于预设阈值 F_0 时,采用式(11)给出的定阻抗控制律;当被操作目标机动导致机械臂末端与目标间接触力大于预设阈值 F_0 时,则需要对式(11)中的阻抗参数 \mathbf{M} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{K} 按照下一节给出的策略进行调整。

2.2 自适应阻抗控制方法

本文采用弹簧-阻尼模型描述机械臂末端与环境之间的碰撞模型^[17]。通常情况下,机械臂刚度一般远大于目标刚度。在惯性坐标系下,接触力仅与机械臂末端位姿和空间速度有关,即

$$\mathbf{F}_h = \mathbf{K}_e(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) + \mathbf{B}_e(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_e) \quad (12)$$

假定被操作目标处于自由漂浮状态, \mathbf{x}_e 为在惯性坐标系下的目标位姿, $\dot{\mathbf{x}}_e$ 为目标空间速度, \mathbf{B}_e 为目标阻尼对角矩阵, \mathbf{K}_e 为目标刚度对角矩阵。将式(11)和(12)代入式(9),则有稳态位置、稳态接触力和稳态力误差 \mathbf{E}_{fss}

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{ss} = (\mathbf{K}\mathbf{x}_d + \mathbf{F}_h^d + \mathbf{K}_e\mathbf{x}_e)(\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)^{-1} \\ \mathbf{F}_{ss} = \mathbf{K}_e(\mathbf{x}_{ss} - \mathbf{x}_e) = \mathbf{K}_e[\mathbf{K}(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e) + \mathbf{F}_h^d](\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)^{-1} \\ \mathbf{E}_{fss} = \mathbf{F}_{ss} - \mathbf{F}_h^d = \mathbf{K}[\mathbf{K}_e(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_e) - \mathbf{F}_h^d](\mathbf{K} + \mathbf{K}_e)^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

弹簧-阻尼接触模型可以进行正交解耦,基于对机械臂末端接触力和位置的多次测量,可以通过极大似然法和最小二乘法等方法估计得到本体坐标系下 x 方向的目标刚度 \hat{K}_e 和目标阻尼 \hat{B}_e 。其余两个正交方向的目标刚度与目标阻尼可采用类似方法进行估计。

由式(12)可知,从臂采用定阻抗控制时,若目标存在机动,会使机械臂末端与目标间接触力大于预设阈值 F_0 ,进而导致较大的稳态力误差与稳态位置误差。因此,需要对阻抗控制律中的阻抗参数进行自适应设计。

由于机械臂与环境之间的接触力可以进行正交解耦,本文选择本体坐标系下的 x 方向进行研究,其余两个正交方向可以采用类似方法进行分析。定义 x 方向的阻抗控制性能指标如下

$$J_{im} = (\mathbf{x}_{ss} - \mathbf{x}_d)^2 + \alpha(\mathbf{F}_{ss} - \mathbf{F}_h^d)^2 \quad (14)$$

式中: α 为权重系数,表示阻抗控制中力控制相对于位置控制的权重; J_{im} 用于表征柔顺控制效果的好

坏,较小数值意味着较好的控制效果。

将式(13)代入式(14)可得:

$$J_{im} = [\mathbf{F}_h^d + \hat{K}_e(\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_d)]^2 (1 + \alpha K^2)(K + \hat{K}_e)^{-2} \quad (15)$$

由式(15)可知, J_{im} 与目标刚度相关(J_{im} 最小时,刚度系数为最优值 K^*),因此可利用两者关系设计阻抗控制策略中刚度参数的自适应律

$$\min_K J_{im} = [\mathbf{F}_h^d + \hat{K}_e(\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_d)]^2 (1 + \alpha K^2)(K + \hat{K}_e)^{-2} \quad (16)$$

由式(16)可得刚度系数的自适应律

$$K^* = \alpha^{-1} \hat{K}_e^{-1} \quad (17)$$

由式(9)可知,采用阻抗控制策略时,机械臂与目标组成的闭环系统为二阶系统,处于过阻尼状态时,系统性能较优。假定系统的阻尼比为 ξ ,则

$$\xi^2 = \frac{(\mathbf{B} + \hat{B}_e)^2 \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{K} + \hat{K}_e)^{-1}}{4} \quad (18)$$

假定阻尼比 ξ 可调,则阻尼系数自适应律由式(19)给出

$$\mathbf{B}^* = \xi \sqrt{4\mathbf{M}_0(\mathbf{K}^* + \hat{K}_e) - \hat{B}_e} \quad (19)$$

惯性参数 \mathbf{M} 对接触力稳定值有显著影响,减小惯性参数可以有效改善接触力的过渡过程特性。因此,式(19)中惯性参数的初值 \mathbf{M}_0 应取一个较小的初值进行调试。

在设计惯性参数 \mathbf{M} 时,为使机械臂与目标组成的二阶系统处于过阻尼状态,需满足以下条件

$$\mathbf{M}^* \geq \frac{\mathbf{B}^* + \hat{B}_e}{2(\mathbf{K}^* + \hat{K}_e)} \quad (20)$$

考虑到较小的惯性参数对系统性能提升更有利,因此惯性参数自适应律由式(21)给出

$$\mathbf{M}^* = \frac{\mathbf{B}^* + \hat{B}_e}{2(\mathbf{K}^* + \hat{K}_e)} \quad (21)$$

其余两个正交方向的阻抗参数可采用类似方法得到。最终可以得到目标存在机动情况下的从臂自适应阻抗控制律。

3 试验校验

3.1 试验系统组成

本节以双臂协调转位任务为背景,验证本文提出的双臂协调柔顺操作控制方法。

首先搭建双臂协调转位操作控制试验系统,该试验系统由三自由度气浮平台、两部 UR10e 机械臂、五自由度气浮平台及目标卫星模型组成。其

中,两部机械臂安装于三自由度气浮平台上,作为服务航天器;目标卫星模型安装于五自由度气浮平台上,作为目标航天器。服务航天器和目标航天器均放置于大理石平台上,且处于气浮状态。双臂协调转位操作控制试验系统如图1所示。

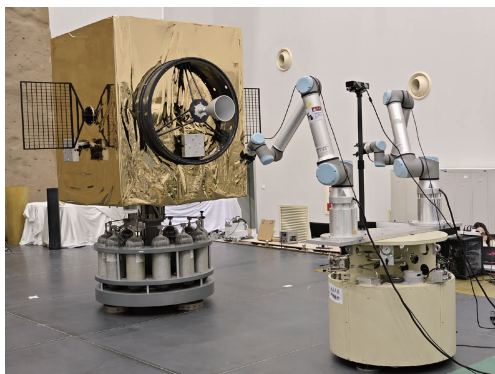


图1 双臂协调柔顺操作控制试验系统

3.2 试验过程及结果

本节针对双臂转位过程中施加干扰的工况进行双臂协调柔顺操作控制地面物理试验验证。

以机械臂1作为从臂,机械臂2作为主臂,设计了双臂主从协调柔顺控制器实现对转位轨迹的跟踪,即从臂设置为阻抗控制模式,主臂设置为位置控制模式。

为了方便,转位轨迹以机械臂1作为基准进行设计,即转位轨迹的起点为机械臂1合爪时的位姿;终点位置在起点的+Y方向0.1 m处,终点姿态由起点姿态沿Z轴负方向旋转0.2 rad得到,服务星-机械臂-目标星的组合体在起点与终点之间的构型变化如图2所示。基于机械臂1的转位轨迹,借助双臂抓取目标星后形成的闭链系统运动学关系,可以实时计算得到机械臂2的转位轨迹。

对于轨迹规划而言,借助基于5次多项式函数的轨迹规划算法来获得目标转位的运动轨迹。在控制器设计方面,双臂采用了主从协调的控制架构,即主臂采用位置控制模式、从臂采用阻抗控制模式。不同于从臂以随动方式运动,这里主臂、从臂均规划了期望运动轨迹。主臂、从臂均按照期望轨迹运动,不仅可以共同为目标星转位提供驱动力,还能限制目标星在转位时沿竖直方向自由旋转。从臂在沿轨迹运动时保持阻抗控制模式,可以对转位过程中的内、外力扰动进行柔顺。同时,在双臂主从协调的控制架构内增加了刚度阻尼系数自主调整模块。当机械臂末端检测到的干扰外力超过阈值25 N后,主臂切换至阻抗控制模式,并且

双臂阻抗模型的刚度系数和阻尼系数进行自适应调整,保证双臂在较大干扰外力下能够顺从外力运动。此外,控制策略中含有轨迹重规划功能。在双臂顺从外力运动过程中,当外力撤销后,重规划功能可根据双臂当前位置和初始目标位置重新规划一段轨迹,保证双臂能够完成初始的转位任务。

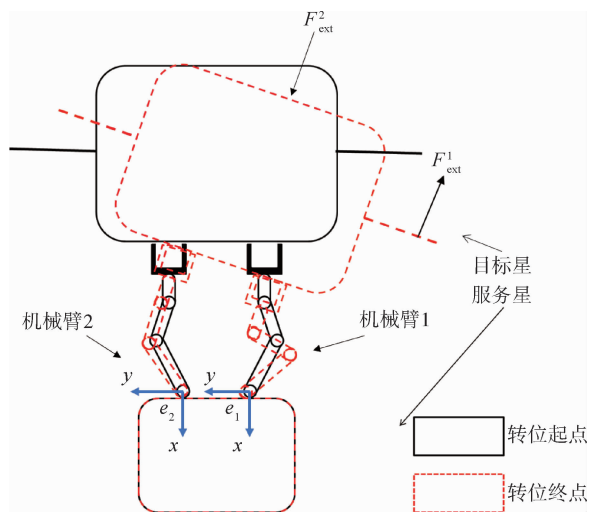


图2 转位起点与终点的组合体构型示意图

图3和4展示了试验过程中两套机械臂的末端接触力变化情况。首先,在10 s左右双臂完成了末端手爪的合爪操作,并且接触力很快能够收敛至期望值。在试验进行至20 s左右时,双臂开始执行转位操作。转位过程持续了约7 s,转位期间人为对目标星施加了外界干扰力 F_{ext}^1 ,之后双臂末端接触力开始迅速增加。机械臂1的末端接触力率先超过阈值25 N,从而触发双臂切换阻抗模式的指令。施加外扰后,从臂阻抗模型的刚度系数由160 N/m调整至10 N/m,阻尼系数由300 N/m/s调整至50 N/m/s。此时,双臂不再沿转位轨迹移动,双臂末端位置开始跟随外力作用而变化。

外界干扰力 F_{ext}^1 在31 s左右完成了撤除,并在经历了一个稳定阶段后,轨迹在42 s左右开始重规划,同时阻抗刚度与阻尼系数均重新回到施加外扰前的初值。轨迹规划结果符合要求,并且双臂能够抓持目标星沿重规划轨迹重新到达预设的转位目标位置。

4 结论

针对被操作目标运动状态发生突变的双臂协调柔顺操作控制任务,提出了一种空间机动目标双

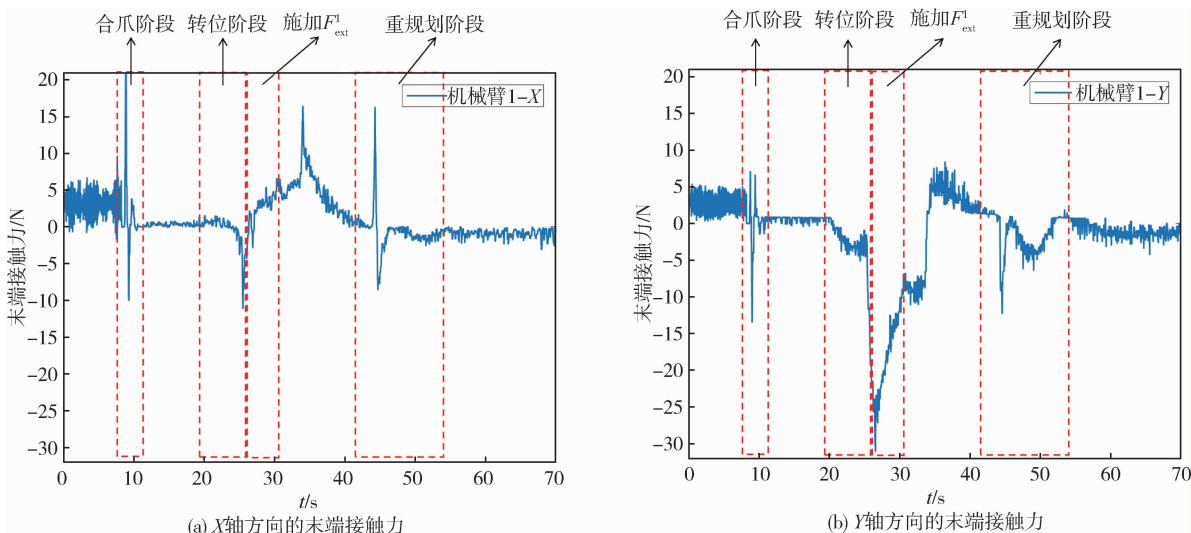


图 3 机械臂 1 末端接触力变化曲线

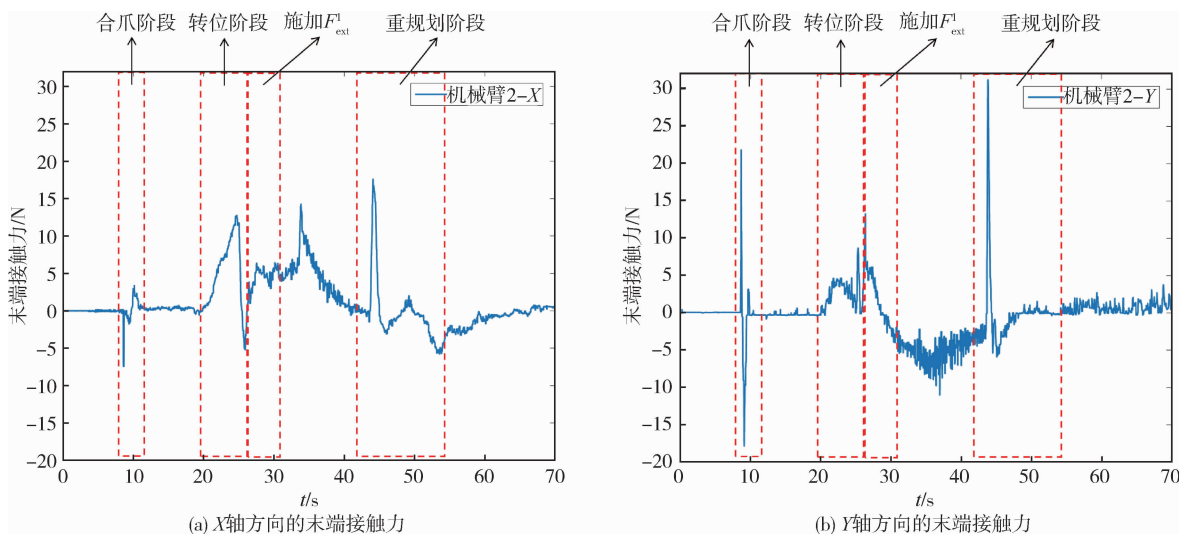


图 4 机械臂 2 末端接触力变化曲线

臂协调柔顺操作自适应控制方法。基于双臂末端与目标间作用力变化的分析,设计阻抗参数自主调整策略,从而能够保证双臂协调操作任务的平稳性和安全性。文中给出的双臂协调柔顺操作地面物理仿真试验结果,验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

[1] MARKC P, KAMATH S. Review of active space debris removal methods [J]. Space Policy, 2019, 47 (2) : 194-206.

[2] 彭世刚, 王鹏飞, 程祥, 等. 交互式感知遥操作在轨服务的展望 [J]. 航天控制, 2022, 40 (1) : 3-10. (PENG Shigang, WANG Pengfei, CHENG Xiang, et al. Prospect of interactive sensing teleoperation on orbit

service [J]. Aerospace Control, 2022, 40 (1) : 3-10.)

[3] 王涛, 张锴, 王新波, 等. GEO 卫星在轨服务路径规划方法 [J]. 航天控制, 2022, 40 (6) : 11-16. (WANG Tao, ZHANG Kai, WANG Xinbo, et al. A path planning method for GEO satellite on-orbit service [J]. Aerospace Control, 2022, 40 (6) : 11-16.)

[4] 李青, 刘爱芳, 王永梅, 等. 美国空间攻防体系发展与能力研究 [J]. 航天器工程, 2018, 27 (3) : 95-103. (LI Qing, LIU Aifang, WANG Yongmei, et al. Research on development and ability of American space offensive and defensive system [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27 (3) : 95-103.)

[5] SEYED S, NADIA F, AUDE B. A unified framework for coordinated multi-arm motion planning [J]. The International Journal of Robotics Research, 2018, 37

- (10): 1205-1232.
- [6] 丁希仑. 拟人双臂机器人技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] SHIN S Y, KIM C H. Human-like motion generation and control for humanoid's dual arm object manipulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2265-2276.
- [8] SMITH C, KARAYIANNIDIS Y, NALPANTIDIS L, et al. Dual arm manipulation - A survey [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(10): 1340-1353.
- [9] UCHIYAMA M, DAUCHEZ P. A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia, USA, April 24-29, 1988.
- [10] WIMBOCK T, OTT C, HIRZINGER G. Impedance behaviors for two-handed manipulation: design and experiments [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, April 10-14, 2007.
- [11] BONITZ R G, HSIA T C. Internal force-based impedance control for cooperating manipulators [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 78-89.
- [12] LEE J, CHANG P H, JAMISOLA R S. Relative impedance control for dual-arm robots performing asymmetric bimanual tasks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3786-3796.
- [13] CACCAVALE F, CHIACCHIO P, MARINO A, et al. Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators [J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2008, 13(5): 576-586.
- [14] HECK D, KOSTIC D, DENASI A, et al. Internal and external force-based impedance control for cooperative manipulation [C]// European Control Conference, Zurich, Switzerland, July 17-19, 2013.
- [15] REN Y, LIU Y C, JIN M H, et al. Biomimetic object impedance control for dual-arm cooperative 7-DOF manipulators [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 75: 273-287.
- [16] DUAN J J, GAN Y H, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 102: 54-65.
- [17] 戚毅凡, 贾英宏, 赵宝山, 等. 面向未知环境的空间机械臂自适应阻抗控制研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2023, 49(2): 51-57. (QI Yifan, JIA Yinghong, ZHAO Baoshan, et al. Adaptive impedance control of space manipulator oriented to unknown environment [J]. Aerospace Control and Application, 2023, 49(2): 51-57.)