

控制与决策

Control and Decision

多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略

陈钢, 黄泽远, 江涛, 李彤, 游红

引用本文:

陈钢,黄泽远,江涛,李彤,游红. 多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 112–120.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0073>

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>

[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](#)

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

控制与决策. 2021, 36(9): 2113–2122 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1754>

[基于多层次特征的机械臂单阶段抓取位姿检测](#)

Single-stage grasp pose detection of manipulator based on multi-level features

控制与决策. 2021, 36(8): 1815–1824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1840>

[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>

[机器人抓取检测技术的研究现状](#)

Recent researches on robot autonomous grasp technology

控制与决策. 2020, 35(12): 2817–2828 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1145>

多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略

陈钢[†], 黄泽远, 江涛, 李彤, 游红

(北京邮电大学 现代邮政学院(自动化学院), 北京 100876)

摘要: 针对影响多臂抓取稳定性的接触力不平衡和接触振动问题, 提出多臂空间机器人力分配和柔顺控制策略. 首先, 分析满足多臂稳定抓取的力学条件, 基于摩擦锥约束设计抓取力安全系数, 并将其引入力优化模型进行抓取力分配, 实现目标物体稳定抓取条件下受力最小; 然后, 分析抓取过渡过程的振动成因, 设计基于动能消耗的末端输出力控制策略实现快速振动抑制和柔顺抓取; 最后, 设计机械臂末端控制律切换策略, 一旦在抓取过渡过程中发生接触脱离可引导其快速返回物体表面. 仿真结果表明, 所提出方法提升了稳定抓取安全裕度, 显著降低了机械臂末端的振动幅值、持续时间和接触力, 提升了空间机器人多臂抓取目标操作的稳定性和柔顺性.

关键词: 多臂空间机器人; 稳定抓取; 力分配; 柔顺控制; 振动抑制; 动能消耗

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0073

引用格式: 陈钢, 黄泽远, 江涛, 等. 多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 112-120.

Force distribution and compliance control strategy for stable grasping of multi-arm space robot

CHEN Gang[†], HUANG Ze-yuan, JIANG Tao, LI Tong, YOU Hong

(School of Modern Post (School of Automation), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Aiming at the problem of unbalanced contact force and vibration that affects the grasping stability of multi-arm space robots, a force distribution and compliance control strategy is proposed. Firstly, the force balance conditions for stable grasping is analyzed, the safety factor based on the friction cone constraint is designed, which is then introduced into the force optimization model to distribute the grasping force, so as to minimize the force under the condition of stable grasping. Secondly, the causes of vibration in the grasping transition process are analyzed, then the end effector's output force control strategy based on kinetic energy consumption is designed to achieve rapid vibration suppression and compliant grasp. Furthermore, the control-law switching strategy is designed, so that once the contact-separation phenomenon occurs during the grasping transition process, the end effector can be quickly guided to return to the surface of the goal object. The simulation shows that the proposed method not only improves the stable grasping's safety margin, but also significantly reduces the vibration amplitude, duration and maximum contact force of the end effector, improving the stability and compliance of the multi-arm space robot for target grasping operations.

Keywords: multi-arm space robot; stable grasping; force distribution; compliant control; vibration suppression; kinetic energy consumption

0 引言

随着航天技术的发展, 人类空间探索活动日益频繁, 航天器装配和维修、空间碎片清理等在轨操作任务需求日益迫切. 空间机器人具有自主性高、灵活性好等特点^[1-2], 已广泛应用于舱体组装、卫星释放和回

收等在轨操作^[3-5]. 然而, 现有的单臂空间机器人难以抵御抓取目标物体过程中的碰撞扰动, 可能造成关节反驱、臂杆自碰撞、目标物体挣脱逃逸等严重后果. 多臂空间机器人不仅可拓展对目标物体的抓取包络, 且可同时为目标物体施加多点操作力, 极大地提高了空

收稿日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-08-09.

基金项目: 科工局稳定支持项目 (HTKJ2019KL502012); 国家自然科学基金项目 (62173044); 北京邮电大学博士生创新基金项目 (CX2021119).

责任编辑: 晔斌.

[†]通讯作者. E-mail: buptcg@163.com.

间目标抓取能力和效率^[6-7].

实现多臂空间机器人对目标物体稳定抓取的关键是抓取力的确定以及准确实施.为此,首先需要根据目标期望运动确定合力大小,进而根据抓取位置和稳定抓取力学条件进行各臂抓取力的分配;在此基础上,瞄准抓取过程中各臂末端与目标物体接触碰撞产生的振动问题,设计合适的控制策略,实现各臂对所分配抓取力的精确跟踪.因此,本文将从多臂抓取力分配和柔顺控制两方面进行阐述.

多臂抓取力分配是指为各机械臂分配将要施加到目标物体的末端抓取力,使其互相抵消或形成抓取合力,是实现稳定抓取的前提.Yoshikawa等^[8]给出了抓取内力的定义,并以最小模量来选取最优抓取内力.熊蔡华等^[9]通过结合神经网络与非线性规划来分配末端和目标物体在不同接触形式下的最优抓取力.陈栋金等^[10]采用Buss的梯度流算法,将末端与目标物体接触力进行线性组合来计算抓取力.王新庆等^[11]采用单位力向量非负线性组合来求解抓取力.然而,以上研究均假设目标物体参数完全已知.当目标物体摩擦系数、表面刚度与标称值不一致时,将造成抓取力分配不平衡,使得目标物体承受不稳定的合力,在轻微扰动作用下即可使得机械臂末端与目标物体间发生滑移,导致抓取稳定性变差.

在空间机器人按照分配的各臂抓取力接触目标物体的过程中,由于物体刚度、运动惯性等因素的存在,会导致机械臂末端与目标物体发生多次接触而产生振动,造成目标物体逃逸或零部件损坏.因此,需要在抓取过渡过程进行柔顺控制,从而保证多臂的稳定抓取.Raibert等^[12]在接触面垂直方向以及沿接触面方向分别进行力控制和位置控制以实现柔顺控制.Hogan^[13]将控制系统等效为质量阻尼弹簧系统,在环境模型参数已知条件下可实现良好的柔顺控制效果.Scherzinger等^[14]将导纳、阻抗与力控制结合至一种控制策略中,进一步改善了末端的柔顺性.Perrusquia等^[15]将强化学习应用于阻抗控制以适应未知环境.He等^[16]使用外环阻抗控制器控制目标的抓取合力,内环阻抗控制器控制抓取内力.Ren等^[17]结合被抓取物体质心参数估计和接触力估计,实现环境参数不确定条件下双臂机器人的柔顺控制.Rani等^[18]结合RBF神经网络设计了一种力位混合控制方法,在模型参数不确定、存在外部干扰力条件下实现多臂协调操作刚性物体.Ge等^[19]将阻抗控制方法应用于双臂空间机器人,研究了自由飞行模式下双臂对空间目标的柔顺抓取.以上方法仅解决了机械臂末

端与目标物体单次接触的响应问题,然而,末端与目标物体的相互作用机制复杂,会导致二者发生多次接触碰撞,加剧抓取过渡过程中的振动问题,影响多臂抓取的稳定性.

综合考虑上述问题,本文提出多臂空间机器人力分配和柔顺控制策略.首先,针对多臂抓取力分配不平衡问题,基于抓取力摩擦锥约束设计抓取力安全系数,并将其引入抓取力优化模型,以提升各臂所分配抓取力的安全裕度;然后,针对抓取过渡过程中机械臂末端振动的问题,构建抓取接触过程动力学模型,分析末端振动产生的原因;最后,在此基础上,构建稳定抓取柔顺控制框架,通过设计消耗末端动能策略和避免接触脱离策略,以减小抓取过渡过程中机械臂末端与目标物体表面的接触力和接触振动,从而提升多臂抓取的柔顺性和稳定性.

1 多臂空间机器人最优抓取力分配策略

本节对多臂空间机器人和目标物体在抓取过程中的受力进行分析,设计基于抓取力安全系数的力分配优化策略,获得满足所设定安全裕度的各臂最优抓取力,作为控制系统的期望输出力.

1.1 多臂空间机器人抓取力分析

假设多臂空间机器人有 k 条机械臂,如图1所示,在目标物质心处建立物体坐标系 $O-xyz$, c_i 为第 i 条机械臂的末端与物体的接触点($i=1,2,\dots,k$), \mathbf{n}_i 为接触点 c_i 处垂直于接触面并指向物体内部的单位法向量, \mathbf{o}_i 和 \mathbf{t}_i 为接触点 c_i 处平行于接触面且互相垂直的2个单位切向量. \mathbf{f}_i 和 $\boldsymbol{\tau}_i$ 分别为机械臂 i 末端在 c_i 处施加的力和力矩.将它们沿 \mathbf{n}_i 、 \mathbf{o}_i 和 \mathbf{t}_i 方向分解,得到 $\mathbf{f}_i=(f_{i_n}, f_{i_o}, f_{i_t})^T$ 和 $\boldsymbol{\tau}_i=(\tau_{i_n}, \tau_{i_o}, \tau_{i_t})^T$.

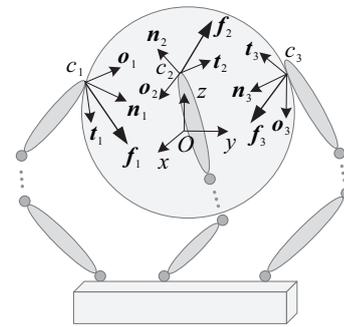


图1 多臂空间机器人抓取模型

\mathbf{f}_i 和 $\boldsymbol{\tau}_i$ 可表示为相对于物体质心的力螺旋,即

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{G}_i \mathbf{f}_i = [\mathbf{f}_i^T \quad \boldsymbol{\tau}_i^T]^T. \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i & \mathbf{o}_i & \mathbf{t}_i \\ \mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i & \mathbf{r}_i \times \mathbf{o}_i & \mathbf{r}_i \times \mathbf{t}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

为机械臂末端接触力转换到物体坐标系的线性映射矩阵, \mathbf{r}_i 为接触点 c_i 在物体坐标系中的位置向量. 因此, 全部机械臂在物体质心处产生的合力螺旋为

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{f}. \quad (3)$$

其中: $\mathbf{G} = [\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_k]$ 为多臂空间机器人的抓取矩阵, $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1^T, \mathbf{f}_2^T, \dots, \mathbf{f}_k^T]^T$ 为多臂空间机器人各机械臂末端力所组成的抓取力向量.

假设抓取目标物体所需要的合外力螺旋为 \mathbf{F}_e , 则多臂空间机器人与物体间的受力关系为

$$\mathbf{F}_e = -\mathbf{F} = -\mathbf{G} \cdot \mathbf{f}. \quad (4)$$

为确保各臂末端与目标物体表面不发生相对滑动, 设物体表面摩擦系数为 μ_i , 则末端力 \mathbf{f}_i 的约束条件为

$$\mathbf{V}_i = \{\mathbf{f}_i \in \mathbf{R}^3 \mid \sqrt{f_{i_o}^2 + f_{i_t}^2} \leq \mu_i |f_{i_n}|\}, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, k.$$

由式(4), 得到

$$\mathbf{f} = -\mathbf{G}^+ \mathbf{F}_e + \mathbf{N} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (6)$$

其中: $\mathbf{G}^+ = \mathbf{G}^T (\mathbf{G} \mathbf{G}^T)^{-1}$ 为 \mathbf{G} 的广义逆矩阵^[20]; \mathbf{N} 为抓取映射矩阵的 0 空间向量, 满足 $\mathbf{G} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{0}$; $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^{k \times 1}$ 为实数集内的任意向量, 当抓取位置不变时, 通过调节 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 可得到不同的抓取力向量.

由式(6)可知, 末端接触力分为两部分: 第1部分 $\mathbf{f}_c = -\mathbf{G}^+ \mathbf{F}_e$ 为实现任务需求所需的合外力; 第2部分 $\mathbf{f}_N = \mathbf{N} \boldsymbol{\varepsilon}$ 为满足力封闭条件的抓取内力, 以防止机械臂末端和物体的滑动. 因此, 可根据实际需要为各臂分配合适的抓取内力, 提升抓取稳定性.

1.2 基于稳定抓取安全系数的力分配优化

满足式(6)的解并不唯一, 但是在实际应用中, 应使得抓取力在满足约束条件的前提下尽可能小, 以保证目标物体不损坏且能量消耗最少. 但是, 当抓取力小到处于摩擦锥边界附近时, 易因外力扰动或控制误差产生相对滑动. 为此, 本文定义稳定抓取安全系数, 即通过设计具有安全裕度的摩擦锥约束, 确保抓取力始终位于摩擦锥内部, 提升抓取稳定性.

记 $\rho_i \in [0, 1]$ 为第 i 条机械臂抓取点处的稳定抓取安全系数, 其定义为

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{f_{i_o}^2 + f_{i_t}^2}}{\mu_i |f_{i_n}|} \leq 1 - \rho_i, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (7)$$

其中: φ_i 为机械臂末端力与摩擦锥约束边界的比例, ρ_i 为设定的摩擦锥约束边界安全系数. 若 $\rho_i = 0$, 则表明抓取点 c_i 处的力刚好位于摩擦锥边界, 此时机械臂末端处于即将发生滑动的临界状态, 一旦出现扰动或

偏差时, 临界状态便会被破坏, 抓取的稳定性也会被破坏; 若 $\rho_i = 1$, 则表明抓取点 c_i 处不会发生相对滑动, 此刻抓取状态最稳定.

在引入安全系数 ρ_i 后, 稳定抓取条件可表示为

$$\mathbf{V}_i^+ = \left\{ \mathbf{f}_i \in \mathbf{R}^3 \mid \frac{\sqrt{f_{i_o}^2 + f_{i_t}^2}}{\mu_i |f_{i_n}|} \leq 1 - \rho_i \right\}. \quad (8)$$

因此, 得到多臂空间机器人的最小稳定抓取内力优化模型为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{f}_N \in \mathbf{R}^{3k}} h(\mathbf{f}_N) &= \mathbf{f}_N^T \mathbf{Q} \mathbf{f}_N. \\ \text{s.t. } \mathbf{G}(\mathbf{f}_c + \mathbf{f}_N) &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{V}_i^+, \quad i &= 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $h(\mathbf{f}_N)$ 为目标函数, 表示抓取内力 \mathbf{f}_N 的加权范数在满足稳定抓取条件下最小; \mathbf{Q} 为配置抓取内力比重的权重矩阵; s.t. 为如下 2 个约束条件: 1) 抓取力与目标物体的惯性力应满足受力平衡条件, 即式(4); 2) 抓取力应满足在稳定抓取安全系数限制下的稳定抓取条件 $\mathbf{V}_i^+ (i = 1, 2, \dots, k)$.

式(9)为具有等式约束和不等式约束的标准形式序列二次规划问题, 可利用 SQP 算法或遗传算法等方法进行求解^[21], 得到稳定抓取安全系数内的最优抓取内力 \mathbf{f}_N^* , 进而代入式(6)求得最优抓取力向量 \mathbf{f}^* , 从而将其 k 个分量作为 k 条臂的末端期望输出力, 利用下文的稳定抓取柔顺控制策略, 对目标物体实施稳定抓取操作.

2 多臂空间机器人稳定抓取柔顺控制策略

在抓取过程中, 各臂末端会在目标物体表面经历从非接触到接触的过渡过程. 此时由于目标物体表面弹性形变、系统惯性等诸多因素, 会使得末端在接触点处往复振动. 为此, 本节首先对抓取过渡过程的动力学响应进行分析; 然后设计相应的稳定抓取柔顺控制策略, 从消耗末端动能和避免接触脱离两方面减小末端在过渡过程中的振动, 提升抓取稳定性.

2.1 抓取接触过程动力学分析

假设多臂空间机器人第 i 条机械臂自由度为 n , 其关节空间动力学方程为

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}^T \mathbf{f}_t = \boldsymbol{\tau}. \quad (10)$$

其中: $\mathbf{H}(\mathbf{q})$ 为惯性矩阵, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为科氏力与离心力耦合项, \mathbf{q} 为机械臂关节角度, $\dot{\mathbf{q}}$ 和 $\ddot{\mathbf{q}}$ 为机械臂关节速度和加速度, \mathbf{J} 为机械臂雅可比矩阵, \mathbf{f}_t 为机械臂末端的实际输出力, $\boldsymbol{\tau}$ 为关节驱动力矩.

由式(10), 得到操作空间动力学方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{V} + \mathbf{f}_t = \mathbf{f}_g. \quad (11)$$

其中: M 为操作空间下的惯性矩阵, V 为操作空间下的科氏力项和离心力项, f_g 为广义驱动力项, 且

$$\begin{aligned} M &= J^{-T} H J^{-1}, \\ V &= J^{-T} C - M \dot{J} \dot{q}, \\ f_g &= J^{-T} \tau. \end{aligned} \quad (12)$$

当机器人还未抓取到目标物体时, 式(10)中的 $f_t = 0$. 当抓取到目标物体后, 由于末端速度不为0, 环境刚度和阻尼从0阶跃到目标物体表面参数值, 从而导致了抓取过程的不稳定. 此处本文将机械臂末端与目标物体接触面法线方向的动态过程等效为弹簧阻尼模型, 如图2所示.

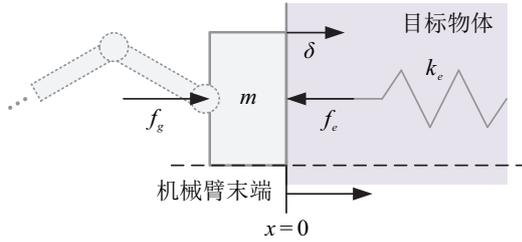


图2 末端与物体接触的弹簧阻尼模型

图2中: m 为将机械臂整体等效到末端的等效质量; x 为末端相对于目标物体表面的位置, $x > 0$ 表示末端与物体接触, 并使得物体发生形变量为 x 的弹性形变; δ 为末端接触物体表面时的速度; f_e 为二者接触时物体对末端的作用力, 且有

$$f_e = \begin{cases} 0, & x \leq 0; \\ -k_e x - D\dot{x}, & x > 0. \end{cases} \quad (13)$$

其中: k_e 为弹性系数, $D = \lambda x$ 为阻尼系数. 考虑到多数空间抓取目标刚度较大, 本文采用 Herbert & McWhannell 模型中的 λ 取值^[22], 即

$$\lambda = \frac{6(1 - c_r)}{(2c_r - 1)^2 + 3} \frac{k_e}{\delta}, \quad (14)$$

其中 c_r 为表征物体表面形变恢复能力的恢复系数. 在机械臂末端以速度 δ 与物体发生接触后, 末端会侵入物体表面, 并使得二者间产生式(13)所示的实际接触力. 当实际接触力与期望抓取力不相等时, 将无法产生操作目标物体所必要的合外力, 因此, 通常以如下控制律对末端输出力进行调整:

$$f_g = f_d + k_{pf}(f_d - f_t) + k_{df}(\dot{f}_d - \dot{f}_t). \quad (15)$$

其中: f_d 为机械臂末端对目标物体表面的期望力, 其等于最优抓取力 f_i^* 在接触面法线方向上的分量 f_{in}^* , 且为常数, 因此 $\dot{f}_d = 0$; f_t 为末端与物体的实际接触力, 且 $f_t = -f_e$.

然而, 由于惯性的存在, 当机械臂末端接触物体表面时, 可能导致末端无法在到达期望接触力后立即

停止运动, 而是继续侵入物体内部, 直至末端速度降为0. 在该过程中, 有一部分能量被物体阻尼吸收, 另一部分形成弹性势能并反作用于末端, 使其被反弹至使得 $f_t < f_d$ 的位置, 甚至被反弹出物体表面. 随后, 在控制律(15)的作用下, 再次尝试使得 $f_t = f_d$. 以上2个阶段不断重复, 造成了机械臂末端在抓取目标物体时的振动现象, 其详细分析如图3所示.

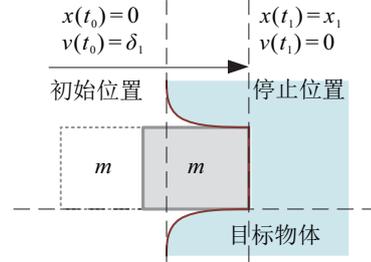


图3 末端与目标物体接触第1阶段示意图

图3中: 假设在 t_0 时刻末端与目标物体表面首次碰撞接触, 此时末端位置 $x(t_0) = 0$, 末端速度 $v(t_0) = \delta_1$; 二者接触后, 机械臂末端的侵入速度逐渐下降, 直至 t_1 时刻停止侵入, 此时末端位置 $x(t_1) = x_1$, 末端速度 $v(t_1) = 0$. 该阶段能量方程为

$$E_i + E_a + E_f = 0, \quad (16)$$

其中 E_i 、 E_a 和 E_t 分别为机械臂的初始动能、末端输出力与目标物体表面反作用力所作的功, 即

$$E_i = \frac{1}{2} m \delta_1^2, \quad E_a = \int_0^{x_1} f dx, \quad E_f = \int_0^{x_1} f_e dx. \quad (17)$$

将式(17)代入(16), 得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m \delta_1^2 + (1 + k_{pf}) f_d x_1 = \\ \frac{1}{2} k_e \left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df} D}{m} \right) x_1^2 + \\ \left[\left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df} D}{m} \right) D + k_{df} k_e \right] \hat{x}_1. \end{aligned} \quad (18)$$

其中

$$\hat{x}_1 = \int_0^{x_1} \dot{x} dx, \quad (19)$$

其描述了末端动能的消耗程度, \hat{x}_1 越小, 表明末端动能消耗得越快.

然后, 在物体表面反作用力与末端输出力控制律的双重作用下, 末端开始反向运动. 当运动至 $f_t < f_d$ 后, 末端输出力控制律将驱动末端使其速度逐渐变小, 直至 t_2 时刻末端速度 $v(t_2) = 0$, 此时末端位置 $x(t_2) = x_2$. 其存在如下两种状态.

1) $x_2 \geq 0$ 表示在末端仍然与物体保持接触的情况下, 末端反向运动的速度在该处下降为0. 物体表面反作用力与末端输出力在该阶段全过程做功, 如图4(a)所示;

2) $x_2 < 0$ 表示末端在被弹出物体表面后, 才在末

端输出力控制律作用下使其速度降为0. 末端输出力在该阶段全过程做功, 物体表面反作用力在末端离开物体表面后不做功, 如图4(b)所示.

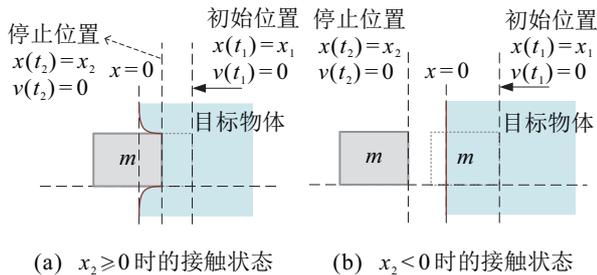


图4 末端与物体接触第2阶段示意图

综上, 在第2阶段, 能量方程中的各项分别为

$$\begin{aligned}
 E_i &= 0; \\
 E_a &= \int_{x_1}^{x_2} f dx; \\
 E_f &= \int_{x_1}^{x_2} f_e dx = \begin{cases} \int_{x_1}^{x_2} f_e dt, & x_2 \geq 0; \\ \int_{x_1}^0 f_e dt, & x_2 < 0. \end{cases} \quad (20)
 \end{aligned}$$

若 $x_2 < 0$, 则机械臂末端在控制律作用下将再次与目标物体表面发生碰撞接触. 假设该碰撞接触发生于 t_3 时刻, 此时末端速度 $v(t_3) = \delta_2$, 则满足

$$\begin{cases} a_2 = (1 + k_{pf})f_d/m, \\ x_2 = -\frac{1}{2}a_2(t_3 - t_2)^2, \\ \delta_2 = a_2(t_3 - t_2). \end{cases} \quad (21)$$

从而, 在机械臂末端将以速度 δ_2 与目标物体表面产生接触碰撞后, 将再次重复上述3个阶段, 不断循环, 直至机械臂末端不再被反弹出物体表面.

综合上述分析, 目标物体是否被稳定抓取表现为相邻2次接触碰撞过程的动能变化量, 即

$$\Delta E_{j,j+1} = \frac{1}{2}m(\delta_{j+1}^2 - \delta_j^2), \quad j = 1, 2, \dots \quad (22)$$

当 $\Delta E_{j,j+1} \geq 0$ 时, 表示机械臂动能会持续增长或保持不变, 末端将在物体表面往复振荡, 无法实现末端期望接触力的稳定输出; 而当 $\Delta E_{j,j+1} < 0$ 时, 机械臂动能将逐渐衰减, 末端与物体表面的碰撞冲击逐渐降低, 最终收敛于期望接触力, 形成稳定接触状态. 为此, 应对控制律(15)进行改进, 尽快消耗末端动能以满足 $\Delta E_{j,j+1} < 0$, 保证目标物体的稳定抓取.

2.2 基于动能消耗的末端输出力控制策略

为了尽快消耗机械臂的动能, 抑制机械臂末端在与目标物体表面接触后的振动, 在式(15)的基础上引入速度反馈项, 即

$$f_g = f_d + k_{pf}(f_d - f_t) + k_{df}(\dot{f}_d - \dot{f}_t) - k_v \dot{x}, \quad (23)$$

其中 k_v 为速度反馈系数. 将式(23)代入(16)得到机械臂能量方程

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2}m\delta_1^2 + (1 + k_{pf})f_d x_1 = \\
 &\frac{1}{2}k_e \left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df}D}{m}\right) x_1^2 + \\
 &\left[\left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df}D}{m}\right)D + k_{df}k_e + k_v\right] \hat{x}_1. \quad (24)
 \end{aligned}$$

与式(18)相比, 式(24)等号右侧 \hat{x}_1 的系数增加了一项 k_v . 除 \hat{x}_1 外, 式(24)中的其他参数均为定值. 由于等式恒成立, 可通过调节 k_v 来减小 \hat{x}_1 , 加速末端动能的消耗. 然而, \hat{x}_1 对 k_v 的取值比较敏感, 过大可能会造成 \hat{x}_1 无法满足恒等式成立条件而失去稳定, 过小则无法消耗动能以抑制振动.

考虑到末端振动频率越高, 其加速度也越大. 因此, 在式(23)的基础上引入加速度反馈进行改进, 即

$$f_g = f_d + k_{pf}(f_d - f_t) + k_{df}(\dot{f}_d - \dot{f}_t) - \int_0^{t_1} k_a(\ddot{x} + k_v \dot{x}) dt, \quad (25)$$

其中 k_a 为加速度反馈系数. 同理, 可将式(25)代入(16)得到机械臂能量方程

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2}m\delta_1^2 + (1 + k_{pf})f_d x_1 = \\
 &\frac{1}{2}k_e \left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df}D}{m}\right) x_1^2 + \\
 &\left[\left(1 + k_{pf} - \frac{k_{df}D}{m}\right)D + k_{df}k_e\right] \hat{x}_1 + \\
 &k_a \hat{x}_1 + \frac{1}{2}k_a k_v x_1^2. \quad (26)
 \end{aligned}$$

式(26)与(18)相比, \hat{x}_1 的系数增加了一项 k_a , x_1^2 的系数增加了一项 $k_a k_v/2$. 当 x_1^2 项增大时将导致 \hat{x}_1 项减小, 故可通过调节系数 $k_a k_v/2$ 来改变 x_1^2 的大小, 进而间接地调节 \hat{x}_1 . 同时, $k_a k_v/2$ 与 k_e 无关, 因此摆脱了对目标物体实际物理参数的依赖, 扩大了 \hat{x}_1 的调节范围, 降低了参数的敏感程度.

式(25)为第 i 条机械臂在自身末端坐标系下描述的末端输出力在 n_i 方向上的分量. 对于 o_i 和 t_i 方向, 可取相同形式得到完整的末端力控制律

$$\begin{aligned}
 {}^e f_{ig} &= f_{id} + K_{i_{pf}}(f_{id} - f_{ie}) + K_{i_{df}}(\dot{f}_{id} - \dot{f}_{ie}) - \\
 &\int_0^{t_1} K_{i_a}(\ddot{X}_i + K_{i_v} \dot{X}_i) dt. \quad (27)
 \end{aligned}$$

从而, 采用上述控制律可有效消耗机械臂动能, 降低末端与物体表面碰撞冲击振动, 并快速到达末端期望输出力.

2.3 考虑接触脱离的末端控制律切换策略

如第2.1节所述, 当物体表面刚度较大时, 末端与物体接触后可能发生脱离. 为此, 本节设计了末端控

制律切换策略,使得机械臂末端能够尽快回到物体表面,进一步提高抓取稳定性。

记第*i*条机械臂末端接触力传感器阈值为 f_{ib} ,在该阈值下末端相对于物体表面的位置在末端坐标系下的表示为 ${}^e x_{ib}$,则设计末端控制律切换策略为

$$\begin{aligned} {}^e f_{ig} &= f_{id} + k_{i_{pf}}(f_{id} - f_{it}) + k_{i_{df}}(f_{id} - \dot{f}_{it}) - \\ &\int_0^{t_1} k_{i_a}(\ddot{x}_i + k_{i_v}\dot{x}_i)dt, \quad {}^e x_{ie} \geq {}^e x_{ib}; \\ {}^e x_{ig} &= x_{id} + k_{i_d}(\dot{x}_{id} - \dot{x}_i) + k_{i_p}(x_{id} - x_i), \\ &{}^e x_{ie} < {}^e x_{ib}. \end{aligned} \quad (28)$$

不妨设末端与目标物体表面发生第*j*次接触时速度为 δ_j ,随后末端将侵入物体表面,即 ${}^e x_{ie} > {}^e x_{ib}$,从而开始末端输出力控制 ${}^e f_{ig}$ 。此后在控制律和物体阻尼作用下,末端动能与弹性势能之和逐渐减小。若末端在弹性势能全部释放后以速度 δ_j^- 被反弹出物体表面,即 ${}^e x_{ie} < {}^e x_{ib}$,则必然满足 $\delta_j^- < \delta_j$ 。随后切换为末端位置控制,使得末端再次回到物体表面,此时二者的接触速度满足 $\delta_{j+1} < \delta_j^-$,从而得到 $\delta_{j+1} < \delta_j$ 。因此由式(25)可知,控制律(28)能够使得 $\Delta E_{j,j+1} < 0$ 成立,从而确保该控制策略的稳定性。

式(28)为第*i*条机械臂在自身末端坐标系下描述的末端力/运动控制律在 n_i 上的分量。对于 o_i 和 t_i 方向,可取相同形式,从而得到与式(27)相同的力控制律 ${}^e f_{ig}$ 以及如下式所示的运动控制律 ${}^e x_{ig}$:

$$\begin{aligned} {}^e x_i &= \ddot{X}_{id} + K_{id}(\dot{X}_{id} - \dot{X}_i) + \\ &K_{ip}(X_{ip} - X_i) + C_i. \end{aligned} \quad (29)$$

综合式(27)和(29),得到多臂空间机器人第*i*条机械臂的关节力矩控制律为

$$\tau_i = J_i^T(\bar{S}_i M_i^L R_i^e x_{ig} + S_i^L R_i^e f_{ig}). \quad (30)$$

其中: S_i 和 \bar{S}_i 分别为机械臂*i*末端未与目标物体接触时的位置控制开关,以及末端在与目标物体表面接触后的力控制开关; ${}^L R_i$ 为机械臂*i*末端坐标系相对于惯性系的变换矩阵。

综上所述,多臂空间机器人稳定抓取柔顺控制律可表示为

$$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T, \dots, \tau_i^T, \dots, \tau_k^T]^T, \quad (31)$$

其中 τ_i 为式(30)所示的第*i*条机械臂的控制律。多臂空间机器人稳定抓取柔顺控制如图5所示。该控制策略由*k*条机械臂的子控制器组成,每个子控制器均对应式(28)的上式/下式两部分,两者间通过切换开关进行切换,并输出该机械臂的关节力矩,从而实现末端振动的快速抑制以及期望抓取力的快速到达,提升末端与物体接触的柔顺性,完成目标物体的稳定抓

取。

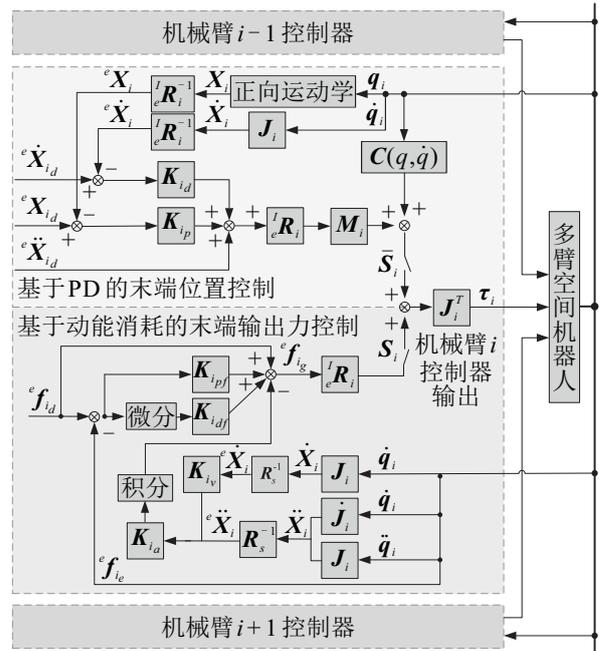


图5 多臂空间机器人稳定抓取柔顺控制

3 仿真实验

3.1 仿真对象描述

本节以3臂空间机器人为仿真对象对所提出方法进行验证。设3条臂结构和参数均相同,其参数如表1所示。抓取目标为半径 $r = 0.3\text{m}$ 的球体,物体坐标系位于球心处,表面摩擦系数 $\mu = 0.3$ 。3臂末端接触点分布如图6所示,期望接触力 $f_d = 10\text{N}$ 。

表1 机械臂1参数

连杆	α_{i-1}/rad	a_{i-1}/m	θ_i/rad	d_i/m	m/kg
1	$-\pi/2$	0	π	0.2	4.2
2	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0.15	4.2
3	$-\pi/2$	0	0	0.15	7.0
4	0	0.5	0	0.15	7.0
5	0	0.5	0	0.15	4.2
6	$\pi/2$	0	$\pi/2$	0.15	4.2
7	$\pi/2$	0	π	0.2	4.2

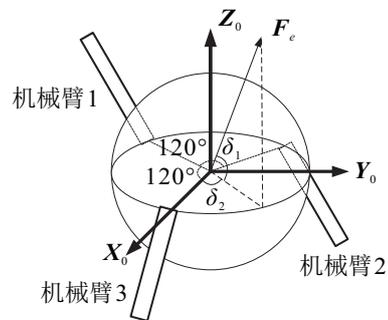


图6 3臂空间机器人抓取模型

3.2 多臂空间机器人抓取力分配策略仿真验证

假设抓取目标球体的合外力螺旋 F_c 在物体坐标系下为

$$\mathbf{F}_e = (\cos \delta_1 \cos \delta_2, \cos \delta_1 \sin \delta_2, \sin \delta_1, 0, 0, 0)^T.$$

为验证基于抓取安全系数的力分配优化策略,分别对不设置安全系数,即 $\rho_{1\sim 3} = 0$ 时以及设置安全系数 $\rho_{1\sim 3} = 0.3$ 时的力分配结果进行仿真对比.

首先,取 $\rho_{1\sim 3} = 0$,令抓取权重矩阵 \mathbf{Q} 为单位阵,并以 $\delta_1 \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 和 $\delta_2 \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 为自变量,应用SQP算法每隔 2.5° 遍历求解优化问题(9),即可得到将不同方向抓取合力 \mathbf{F}_e 分配到各机械臂后的最优抓取力 \mathbf{f}^* 以及对应的目标函数值obj,即

$$\mathbf{f}^* = [\mathbf{f}_1^{*T}, \mathbf{f}_2^{*T}, \mathbf{f}_3^{*T}]^T,$$

$$\text{obj} = h(\mathbf{f}_N^*) = (\mathbf{f}^* + \mathbf{G}^+ \mathbf{F}_e)^T \mathbf{Q} (\mathbf{f}^* + \mathbf{G}^+ \mathbf{F}_e).$$

仿真结果如图7所示.由图7(a)可见,obj的值主要与 δ_1 相关,当 $\delta_1 \in [-10^\circ, 10^\circ]$ 时,obj=0.在该取值下,可取抓取内力 $\mathbf{f}_N = \mathbf{0}$ 使得抓取力 \mathbf{f}^* 位于摩擦锥内;在 $\delta_1 = 72.5^\circ$ 、 $\delta_2 = 180^\circ$ 处取得最大值 $\text{obj}_{\max} = 11.78$,此时抓取内力 \mathbf{f}_N 最大.将不同方向 \mathbf{F}_e 下求解得到的最优抓取力 $\mathbf{f}_1^* \sim \mathbf{f}_3^*$ 代入式(7),可得到它们与各自摩擦锥边界的比值 $\varphi_1 \sim \varphi_3$,如图7(b)~图7(d)

所示.图7(b)~图7(d)中:粗虚线框($\varphi_i = 1, i = 1, 2, 3$)为该处的最优抓取力恰好位于摩擦锥边界;点线框($\varphi_i = 0.7$)为该处的最优抓取力位于安全系数 $\rho = 0.3$ 时的摩擦锥边界.由图7(b)~图7(d)可见, $\varphi_i = 1$ 为普遍情况,表明各臂末端的最优抓取力大部分位于摩擦锥边界,此时一旦有所扰动即会产生滑移.

然后,取 $\rho_{1\sim 3} = 0.3$,其他参数不变.仿真结果如图8所示.由图8可见,图8(a)形状与图7(a)类似,但是obj均有所增大,在 $\delta_1 = 80^\circ$ 、 $\delta_2 = 180^\circ$ 处取得最大值 $\text{obj}_{\max} = 23.32$.表明为实现更稳定的抓取,需在一定程度上增加 \mathbf{f}_N 的大小.由图8(b)~图8(d)可见,对于不同 δ_1 和 δ_2 , $\varphi_i = 0.7$ 为普遍情况,表明对于不同方向的 \mathbf{F}_e ,各臂末端的最优抓取力绝大部分位于摩擦锥内部,大大增加了抵御扰动的安全裕度.

综合对比图7与图8可知,在引入抓取安全系数后,对于绝大多数方向的抓取合力,分配到各臂末端的最优抓取力从摩擦锥边界处移动至摩擦锥内部,提升了保证稳定抓取的安全裕度,表明所提出最优抓取力分配策略的有效性.

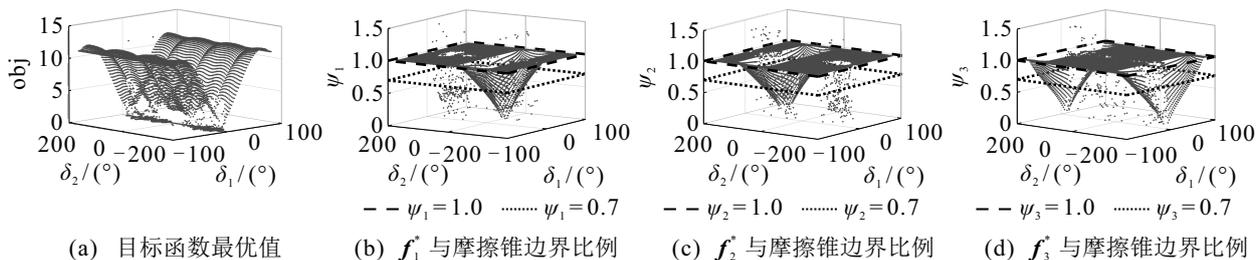


图7 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 0$ 时的最优抓取力分配结果

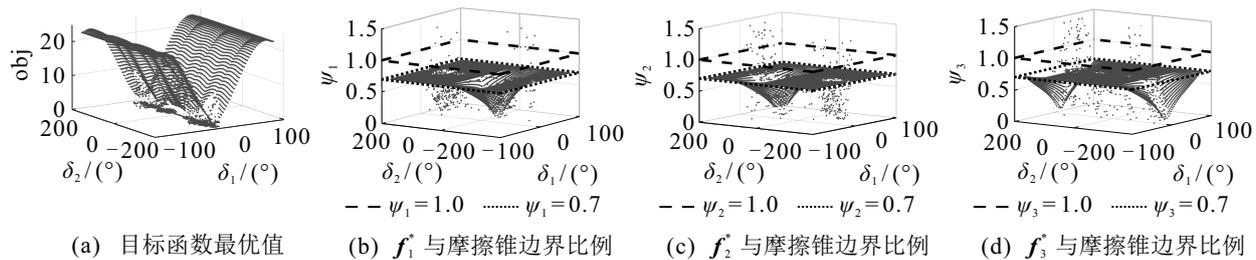


图8 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 0.3$ 时的最优抓取力分配结果

3.3 稳定抓取柔顺控制策略仿真与分析

3.3.1 基于动能消耗的末端出力控制策略仿真

假设目标球体表面刚度 $k_e = 1 \times 10^3 \text{ N/m}$,机械臂末端期望接触力 $f_d = 10 \text{ N}$,并以 $\delta_1 = 0.2 \text{ m/s}$ 的速度接触目标表面.机械臂采用控制律(27)进行控制,并与控制律(15)以及作为基准的阻抗控制方法进行对比.在该过程中,由于球体表面刚度较小,末端没有脱离球体表面.仿真结果如图9所示.

由图9可见,控制律(15)和阻抗控制律得到的末端最大接触力分别为 27.756 N 、 26.780 N ;最大侵入深度分别为 0.024 m 、 0.023 m ;最终稳定到期望力的时间分别为 19.12 s 、 2.64 s .而对于控制律(27),末端最大接触力为 15.623 N ,与上述2个方法相比,分别下降了 43.7% 、 41.7% ;末端最大侵入深度为 0.015 m ,分别下降了 37.5% 、 34.8% ;最终稳定在期望力的时间为 1.12 s ,分别缩短了 94.1% 、 57.6% .

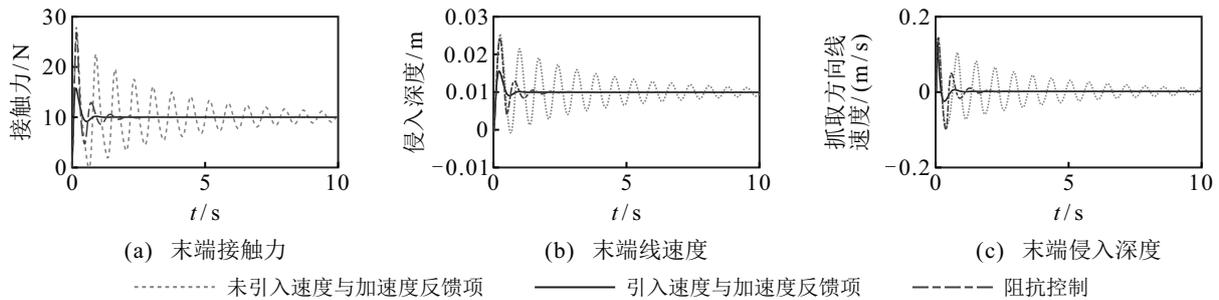


图9 小刚度目标球体抓取过渡过程柔顺控制仿真结果

根据仿真结果可知,采用控制律(27)后,末端振动频率和幅值大幅降低,有效地消耗了系统的动能,且最大侵入深度显著减小,展现出比控制律(15)和阻抗控制律更好的柔顺性,保证了末端在未离开目标物体表面条件下的稳定抓取。

3.3.2 考虑接触脱离的末端控制律切换策略仿真

取目标球体表面刚度 $k_e = 1 \times 10^5 \text{ N/m}$,末端期望接触力 $f_d = 10 \text{ N}$,并以 $\delta_1 = 0.008 \text{ m/s}$ 的速度接触物体表面.机械臂采用控制律(30)进行控制,并与控制律(27)以及阻抗控制律进行对比.由于表面刚度较大,末端会因碰撞冲击产生多次接触-脱离现象.仿真结果如图10所示。

由图10可见,在使用阻抗控制律时,在0.40~0.52 s以及0.59~0.64 s两个时间段内末端接触力为0,表明末端与物体表面产生了3次接触碰撞和2次

脱离,在3.04 s时稳定至期望接触力;最大接触力为91.127 N,最大侵入深度为 $9.03 \times 10^{-4} \text{ m}$.当使用控制律(27)时,在0.37~0.94 s时间段内与物体表面脱离,直至0.94 s时返回物体表面;在2.84 s时稳定至期望接触力;最大接触力为85.570 N;最大侵入深度为 $8.54 \times 10^{-4} \text{ m}$.而在采用控制律(30)后,末端在0.37 s时脱离物体表面,在0.47 s时迅速返回,接触脱离状态总时长分别缩短了41.6%、82.4%;在2.72 s时稳定至期望接触力,分别缩短了10.5%、4.2%;最大侵入深度为 $8.54 \times 10^{-4} \text{ m}$,比阻抗控制降低了5.7%.因此,与控制律(27)和阻抗控制律相比,控制律(30)不仅减小了末端最大侵入深度,使得末端接触力快速达到期望接触力外,还抑制了末端脱离抓取表面的多次碰撞接触现象,降低了两者的接触力,具有良好的柔顺性,实现了对大刚度目标物体的稳定抓取。

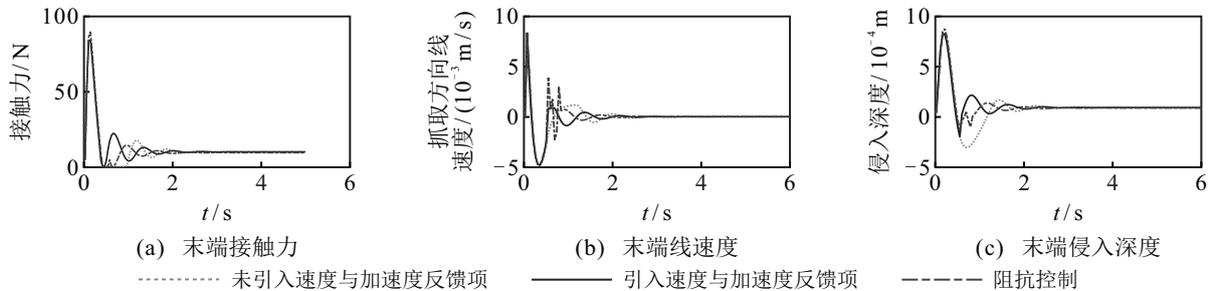


图10 大刚度目标球体抓取过渡过程柔顺控制仿真结果

4 结论

本文针对影响多臂抓取稳定性的接触力不平衡和抓取过渡过程接触振动问题,提出了一种多臂空间机器人稳定抓取力分配和柔顺控制策略:设计基于摩擦锥安全系数的抓取力优化模型,对抓取力进行分配,实现了目标物体稳定抓取条件下的抓取内力最小化;分析抓取过渡过程中持续接触振动和接触脱离振动的产生原因,并设计基于动能消耗的末端输出力控制策略和考虑接触脱离的末端控制律切换策略,二者配合实现末端振动的抑制.仿真结果表明,所提出最优抓取力分配策略有效提升了稳定抓取的安全裕

度;所提出稳定抓取柔顺控制策略缩短了末端的振动时间,降低了最大接触力和物体表面侵入深度,表明了所提方法的有效性.后续研究将引入多臂协调操作策略,进一步提升多臂空间机器人抓取操作的稳定性。

参考文献(References)

[1] McGregor R, Oshinowo L. Flight 6A: Deployment and checkout of the space station remote manipulator system[C]. Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001. St-Hubert, 2001: 1-9.

- [2] Yoshida K, Hashizume K, Abiko S. Zero reaction maneuver: Flight validation with ETS-VII space robot and extension to kinematically redundant arm[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, 2001: 441-446.
- [3] 黄攀峰, 鲁迎波, 王明, 等. 参数未知航天器的姿态接管控制[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1547-1555. (Huang P F, Lu Y B, Wang M, et al. Attitude takeover control for spacecraft with unknown parameter[J]. Control and Decision, 2017, 32(9): 1547-1555.)
- [4] Li W J, Cheng D Y, Liu X G, et al. On-orbit service of spacecraft: A review of engineering developments[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 108: 32-120.
- [5] Ding X L, Wang Y C, Wang Y B, et al. A review of structures, verification, and calibration technologies of space robotic systems for on-orbit servicing[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(3): 462-480.
- [6] Zhou Y Q, Luo J J, Wang M M. Dynamic coupling analysis of multi-arm space robot[J]. Acta Astronautica, 2019, 160: 583-593.
- [7] Xu R N, Luo J J, Wang M M. Kinematic and dynamic manipulability analysis for free-floating space robots with closed chain constraints[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020, 130: 103548.
- [8] Yoshikawa T, Nagai K. Evaluation and determination of grasping forces for multifingered hands[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings. Philadelphia, 1988: 245-248.
- [9] 熊蔡华, 熊有伦, 张征, 等. 基于人工神经网络的抓取规划[J]. 中国工程机械, 1997, (2): 11-17. (Xiong C H, Xiong Y L, Zhang Z, et al. Artificial neural network based on grasp planning for multifingered robot hand[J]. China Mechanical Engineering, 1997, (2): 11-17)
- [10] 陈栋金, 姜力, 王新庆. 多指抓取力的线性组合计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(1): 55-59. (Chen D J, Jiang L, Wang X Q. Computation of multi-fingered grasping force with linear combination[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(1): 55-59.)
- [11] 王新庆, 陈栋金, 姜力. 非负线性组合多指抓取动态力优化方法[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2015, 40(5): 1169-1176. (Wang X Q, Chen D J, Jiang L. Nonnegative linear combination dynamic force optimization of multi-fingered grasp[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2015, 40(5): 1169-1176.)
- [12] Raibert M H, Craig J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1981, 102(2): 126-133.
- [13] Hogan N. Impedance control-an approach to manipulation. I-theory. II-implementation. III-applications[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985, 107: 1-24.
- [14] Scherzinger S, Roennau A, Dillmann R. Forward dynamics compliance control: A new approach to Cartesian compliance for robotic manipulators[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, 2017: 4568-4575.
- [15] Perrusquía A, Yu W, Soria A. Position/force control of robot manipulators using reinforcement learning[J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 46(2): 267-280.
- [16] He J, Luo M Z, Zhang Q Q. Dual impedance control with variable object stiffness for the dual-arm cooperative manipulators[C]. Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems. Tokyo, 2016: 102-108.
- [17] Ren Y, Chen Z S, Liu Y C, et al. Adaptive hybrid position/force control of dual-arm cooperative manipulators with uncertain dynamics and closed-chain kinematics[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(17): 7767-7793.
- [18] Rani M, Kumar N. A new hybrid position/force control scheme for coordinated multiple mobile manipulators[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(3): 2399-2411.
- [19] Ge D M, Sun G H, Zou Y J, et al. Impedance control of multi-arm space robot for the capture of non-cooperative targets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(5): 1051-1061.
- [20] 黄有度, 狄成恩, 朱士信. 矩阵论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 241-245. (Huang Y D, Di C E, Zhu S X. Matrix theory with applications[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995: 241-245.)
- [21] Jorge N, Stephen J W. Numerical optimization second edition[M]. New York: Springer, 2006: 530-532.
- [22] 张龙. 空间机械臂在轨捕获碰撞动力学及控制研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 52-56. (Zhang L. Research on collision dynamics and control strategy for space manipulator performing on-orbit capture task[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 52-56.)

作者简介

陈钢(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事空间机器人建模、规划与控制等研究, E-mail: buptcg@163.com;

黄泽远(1994—), 男, 博士生, 从事空间机器人智能规划与控制的研究, E-mail: huangzeyuan1994@163.com;

江涛(1995—), 男, 硕士生, 从事多臂空间机器人控制的研究, E-mail: jiangtao_jiangtao@outlook.com;

李彤(1988—), 男, 讲师, 博士, 从事空间机器人规划与控制的研究, E-mail: tli@bupt.edu.cn;

游红(1996—), 女, 硕士生, 从事空间机器人智能规划与控制的研究, E-mail: 18813133130@163.com.