

协作机械臂碰撞环境下的安全控制

周林娜^{1,2}, 王 宵¹, 丛香怡¹, 陈正升¹, 杨春雨^{1,2†}

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 地下空间智能控制教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对人机协作过程中机械臂末端与操作者之间可能存在物理碰撞的问题, 本文提出一种基于自适应导纳和滑模控制的机械臂安全控制方法. 首先, 采用基于广义动量的干扰观测器估计机械臂各关节和末端执行器上的干扰力. 然后, 设计一个双环控制结构, 内环是基于干扰观测的双幂次趋近律滑模轨迹跟踪控制器, 用以克服外界干扰的影响, 达到期望的轨迹跟踪精度; 外环是自适应导纳控制器, 依据碰撞外力的大小和方向更新期望轨迹, 以保证机械臂碰撞发生时的柔顺性和碰撞解除后迅速恢复工作状态的能力. 最后, 对所提算法进行仿真和实验验证. 实验结果表明, 协作机械臂碰撞环境下的安全控制算法能保证人机协作的安全性和机械臂工作的连续性, 满足人机协作过程中的工作需求.

关键词: 人机协作; 干扰观测器; 滑模控制; 自适应导纳控制

引用格式: 周林娜, 王宵, 丛香怡, 等. 协作机械臂碰撞环境下的安全控制. 控制理论与应用, 2024, 41(2): 292 – 302

DOI: 10.7641/CTA.2023.20531

Safety control of cooperative manipulators in collision environment

ZHOU Lin-na^{1,2}, WANG Xiao¹, CONG Xiang-yi¹, CHEN Zheng-sheng¹, YANG Chun-yu^{1,2†}

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

2. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education,
China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: In view of the possible physical collision between the end of the manipulator and the operator in the process of human-robot cooperation, a safety control method of the manipulator is proposed based on the adaptive admittance and sliding mode control. Firstly, the interference observer based on the generalized momentum is used to estimate the interference force of each joint and end effector. Then, a double-loop control structure is designed. The inner loop is a sliding mode trajectory tracking controller based on the double-power reaching law and interference observation, which can overcome the influence of external interference and achieve desired trajectory tracking accuracy. The outer loop is an adaptive admittance controller, which updates the desired trajectory according to the magnitude and direction of the external force caused by collision, so as to ensure the flexibility of manipulators in collision environment and the ability to quickly resume its working state after the collision is resolved. Finally, the proposed algorithm is verified by simulation and experiments. The experimental results show that the safety control algorithm can ensure the safety of human-robot collaboration and the continuity of manipulators' work, which meets the work requirements in the process of human-robot collaboration.

Key words: human-robot cooperation; interference observer; sliding mode control; adaptive admittance control

Citation: ZHOU Linna, WANG Xiao, CONG Xiangyi, et al. Safety control of cooperative manipulators in collision environment. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(2): 292 – 302

1 引言

人机协作指人与机械臂在同一工作平台配合作业, 旨在充分发挥人和机器人各自的优势, 高效地完成工作任务^[1]. 目前, 协作机器人被广泛应用于工业^[2]、服务^[3]和医疗^[4]等诸多领域. 如图1所示工业领域中的人机协作场景, 机械臂拾取一个工件, 沿着特定轨迹

放置到目标点, 操作者拾取该工件进行下一步操作. 在此过程中, 不可预测的人工操作可能造成机械臂末端与人手之间的物理碰撞. 为了确保人机安全, 机械臂需要具备感知外部环境、及时更新运行轨迹回避碰撞、以及在碰撞解除后返回任务轨迹继续工作的能力^[5]. 本文针对上述人机协作过程中的意外碰撞问题,

收稿日期: 2022–06–15; 录用日期: 2023–03–21.

†通信作者. E-mail: chunyu yang@cumt.edu.cn; Tel.: +86 18852109885.

本文责任编辑: 孙长银.

国家自然科学基金项目(62073327)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62073327).

将机械臂的轨迹跟踪、碰撞响应和恢复作为研究重点, 目的是提高人机协作的工作效率和安全程度。

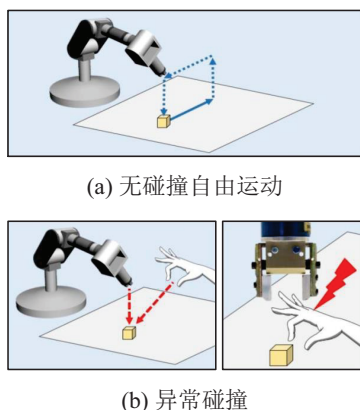


图1 人机协作装配场景

Fig. 1 The scene of human-robot collaboration for assembly

机械臂是一个多输入、多输出的非线性系统, 其动力学模型具有多变量强耦合和时变不确定性, 因此机械臂轨迹跟踪控制是公认的难题^[6]. 滑模控制不需要被控对象的高精度模型, 对系统不确定性和未建模动态具有鲁棒性, 所以被广泛应用于工业领域^[7-8]. 然而, 传统的滑模控制存在严重的抖振现象, 并且只有在滑动模态下才对系统不确定性和外部干扰具有鲁棒性. 因此, 消除滑动模态下的抖振现象和缩短滑模面到达时间成为学者们研究的重点内容。

Ferrara和Incremona^[9]提出了一种积分次优二阶滑模控制算法, 该算法的到达阶段可以在规定的瞬态时间内完成, 实际输入到机械臂的控制动作连续, 增强了系统的鲁棒性, 减轻了抖振. Baek等人^[10]提出了一种自适应滑模控制算法, 设计自适应律增益的导数与滑动变量成反比, 削弱了抖振. Jia和Shan^[11]设计了一种基于神经网络的自适应终端滑模控制器, 在模型具有不确定性和外部干扰精确上界未知的情况下, 实现了空间机械臂的有限时间轨迹跟踪控制. Mishra等人^[12]在传统趋近律的基础上增加了终端吸引子, 保证系统在滑模面附近仍有较快的到达速度, 但该方法参数调整过程复杂. 文献[13]提出一种基于双幂次趋近律的滑模控制方法, 该趋近律具有全局快速收敛特性, 但当存在外部扰动时, 只能将滑模面收敛到与扰动上界有关的稳态误差界内. 上述算法在提高控制系统鲁棒性和抑制抖振方面都有很好的效果, 但意外碰撞带来的较大干扰会在一定程度上降低上述控制算法的轨迹跟踪精度. 本文借鉴双幂次趋近律^[13]快速趋近滑模面和抑制抖振的优点, 利用干扰观测结果补偿控制输入, 解决外部干扰导致的轨迹跟踪精度降低问题。

为保证协作装配过程中的人机安全, 机械臂需感知外部环境, 及时调整自身行为. 在碰撞检测方面, 扭矩传感器^[14]常被用来检测外力, 然而这种方法增加了

接头设计的复杂性, 限制了工作性能, 增加了制造成本. Haddadin等人^[15]提出了基于逆动力学的外部力矩观测方法, 但这种方法不独立于运行轨迹和特定的控制律及其参数, 仅适用于碰撞监测. Haddadin^[16]通过设计简化观测器动态估计关节速度来计算未知的外部关节力矩, 该观测器观测速度快, 但由于观测方程中存在惯性逆矩阵, 所以滤波方程是非线性和耦合的. 基于广义动量的干扰观测器^[17-19]可用于无传感器碰撞检测, 该方法无需计算关节角加速度和对惯性矩阵求逆, 实用性较好, 故本文基于广义动量设计干扰观测器来估计碰撞外力。

目前常见的碰撞响应方式主要有: 被迫停止策略^[20]、零力控制^[21]和反射控制^[22]. 被迫停止策略是在检测到碰撞的瞬间, 冻结机械臂轨迹命令, 使机械臂保持碰撞发生时的姿态, 但不能避免巨大冲击力的产生; 零重力控制和反射控制使机械臂在碰撞发生时产生轨迹回避, 能有效减轻碰撞的剧烈程度, 但碰撞解除后机械臂不能回到原任务轨迹上, 造成工作任务中断. 导纳控制是一种柔顺控制方法, 利用质量—弹簧—阻尼模型, 在外部力/力矩和末端执行器位置之间建立联系, 被广泛用于机械臂的手动引导操作^[23-24]. 本文将导纳控制类似于弹簧的特性应用于机械臂的碰撞响应, 来解决以往算法不能保证机械臂碰撞发生时的柔顺性和易造成工作任务中断的问题。

综上所述, 本文针对人机协作过程中机械臂末端与操作者之间可能存在物理碰撞的问题, 提出一种基于自适应导纳和滑模控制的机械臂安全控制方法, 创新点如下: 1) 提出协作机械臂双环安全控制框架, 可有效提高人机协作的安全性和工作效率; 2) 提出一种基于干扰观测的双幂次趋近律滑模轨迹跟踪控制器, 利用观测器的外力矩估计结果补偿滑模控制器的输出, 减小系统的稳态误差, 提高跟踪精度; 3) 提出一种自适应导纳控制器用于更新期望轨迹, 依据碰撞外力自适应调整导纳控制参数, 保证机械臂在碰撞发生时的柔顺性和碰撞解除后迅速恢复工作状态的能力。

2 协作机械臂模型与控制结构

2.1 协作机械臂模型

协作机械臂的正运动学^[25]可以表示为

$$X(t) = L(q), \quad (1)$$

其中: $X(t)$, $L(\cdot)$ 和 $q \in \mathbb{R}^n$ 分别表示末端执行器在笛卡尔空间中的位姿、正向运动学函数和关节角度, n 是机械臂的自由度. 式(1)关于时间的导数为

$$\dot{X}(t) = J(q)\dot{q}, \quad (2)$$

式中 $J(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是雅可比矩阵. 将式(2)对时间微分, 有

$$\ddot{X}(t) = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q}. \quad (3)$$

机械臂关节空间的动力学方程^[25]可以描述为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_f = \tau + \tau_{\text{ext}}, \quad (4)$$

式中: $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是哥氏力和向心力矩阵; $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 是重力矩向量; $\tau_f \in \mathbb{R}^n$ 是关节摩擦力; $\tau \in \mathbb{R}^n$ 是电机输入力矩; $\tau_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^n$ 是干扰力矩。

引理 1^[25] $2C(q, \dot{q}) - \dot{M}(q)$ 是斜对称矩阵, 它等价于 $\dot{M}(q) = C(q, \dot{q}) + C^T(q, \dot{q})$ 。

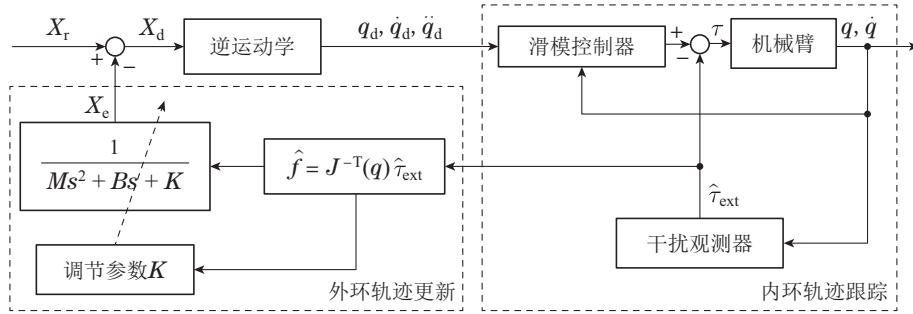


图2 整体控制框图

Fig. 2 Overall control block diagram

图2中, $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 是期望关节角度、角速度和角加速度; $q, \dot{q}$ 是经编码器测得的实际关节角度和角速度; X_d 是通过导纳控制器校正的期望轨迹; X_e 是由导纳模型计算出的位置修正量; X_r 是笛卡尔空间中离线规划的参考轨迹即任务轨迹; τ 是控制输入力矩; $\hat{\tau}_{\text{ext}}$ 是关节干扰力矩 τ_{ext} 的估计值; $\hat{f}$ 是机械臂末端碰撞力 f 的估计值。

3 基于干扰观测的滑模控制器设计

本节将设计一种基于干扰观测的滑模控制器, 实现机械臂的轨迹跟踪控制, 对应于图2中的内环轨迹跟踪部分。

3.1 基于广义动量的干扰观测器设计

本节采用基于广义动量的干扰观测器, 该观测器避免了对惯性矩阵求逆和计算加速度值, 机械臂广义动量 p ^[17] 被定义为

$$p = M(q)\dot{q}, \quad (5)$$

对式(5)两边求导, 得

$$\dot{p} = M(q)\ddot{q} + \dot{M}(q)\dot{q}, \quad (6)$$

将机械臂的动力学模型(4)代入式(6), 并用关节干扰估计值 $\hat{\tau}_{\text{ext}}$ 代替实际值 τ_{ext} , 获得 $\dot{p}$ 的估计值

$$\hat{\dot{p}} = \dot{M}(q)\dot{q} - C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau + \hat{\tau}_{\text{ext}} - \tau_f, \quad (7)$$

利用引理1化简式(7), 得

$$\hat{\dot{p}} = C^T(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau + \hat{\tau}_{\text{ext}} - \tau_f, \quad (8)$$

对动量导数的实际值与估计值做差, 得到残差向量

$$\dot{\hat{\tau}}_{\text{ext}} = K_0(\dot{p} - \hat{\dot{p}}), \quad (9)$$

2.2 控制结构

为了实现机械臂的高精度轨迹跟踪, 以及在外力矩传感器的情况下, 保证机械臂碰撞发生时的柔顺性和碰撞结束后迅速恢复工作状态的性能, 本文提出图2所示的安全控制框架。内环基于干扰观测的滑模控制器可以克服干扰, 实现轨迹跟踪; 外环自适应导纳控制器根据碰撞外力的大小和方向更新参考轨迹, 并通过调整虚拟刚度改变机械臂的柔顺性。

式中 $K_0 = \text{diag}\{k_{0,i}\} > 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 是观测器的增益矩阵。观测器输出 $\hat{\tau}_{\text{ext}}$ 来自于对式(9)的积分, 即

$$\hat{\tau}_{\text{ext}} = K_0(p(t) - \int_0^t (C^T(q, \dot{q})\dot{q} - G(q) + \tau + \hat{\tau}_{\text{ext}} - \tau_f) dt - p(0)), \quad (10)$$

将上式进行拉普拉斯变换^[17], 有

$$\hat{\tau}_{\text{ext},i} = \frac{k_{0,i}}{s + k_{0,i}} \tau_{\text{ext},i} = \frac{1}{1 + t_{0,i}s} \tau_{\text{ext},i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

由式(11)可知, 在 $\hat{\tau}_{\text{ext}}$ 的瞬态响应中, $k_{0,i}$ 越大, 响应的时间常数 $t_{0,i}$ 越小, 在极限条件下, 有

$$K_0 \rightarrow \infty \Rightarrow \hat{\tau}_{\text{ext}} \approx \tau_{\text{ext}}.$$

令 $\tilde{\tau}_{\text{ext}} = \tau_{\text{ext}} - \hat{\tau}_{\text{ext}}$, 设干扰估计值 $|\tau_{\text{ext}}|$ 和估计误差 $|\tilde{\tau}_{\text{ext}}|$ 的上界分别为 δ 和 ζ , 由上述分析易知, 在合理选择 K_0 的情况下, ζ 远小于 δ 。

3.2 控制器设计

针对滑模控制中传统趋近律存在抖振、收敛速度慢的问题, 本节将设计双幂次趋近率, 并利用观测器的观测结果补偿控制输入, 以提高机械臂的轨迹跟踪速度和精度。

机械臂关节角度跟踪误差 $e(t)$ 为

$$e(t) = q_d(t) - q(t), \quad (12)$$

设计滑模面函数 s 如下:

$$s = \dot{e} + \Lambda e, \quad (13)$$

式中 $\Lambda = \text{diag}\{\Lambda_i\} > 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

设计双幂次趋近律^[13]为

$$\dot{s} = -\lambda_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s - \lambda_2 |s|^{\alpha_2} \operatorname{sgn} s, \quad (14)$$

式中: $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \alpha_1 > 1, 0 < \alpha_2 < 1$.

滑模控制算法通过调整滑模面符号函数 $\operatorname{sgn} s$ 的增益控制扰动, 当系统状态距离滑模面较远时, 主要是 $-\lambda_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s$ 作用, $|s|$ 较大, 能够快速逼近滑模面; 当趋近滑模面时, 主要是 $-\lambda_2 |s|^{\alpha_2} \operatorname{sgn} s$ 作用, 滑模运动低速平滑; 当 $s = 0$ 时, $\dot{s} = 0$, 可以有效避免抖振.

将式(13)对时间求导, 并将式(4)机械臂动力学模型代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \Lambda \dot{e} + \ddot{e} = \Lambda \dot{e} + \ddot{q}_d - \ddot{q} = \\ &\Lambda \dot{e} + \ddot{q}_d - M(q)^{-1}(\tau + \tau_{\text{ext}} - \tau_f - \\ &C(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)). \end{aligned} \quad (15)$$

结合式(14)–(15), 并将式(10)中的外力矩干扰估计值 $\hat{\tau}_{\text{ext}}$ 代入, 可得基于干扰观测的滑模控制器输出为

$$\begin{aligned} \tau &= M(q)(\lambda_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s + \lambda_2 |s|^{\alpha_2} \operatorname{sgn} s) + \\ &C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \Lambda \dot{e} + \ddot{q}_d + \tau_f - \hat{\tau}_{\text{ext}}, \end{aligned} \quad (16)$$

式(10)(16)组成了基于干扰观测的滑模控制器, 其中待调节的参数为: $K_0, \Lambda, \lambda_1, \lambda_2, \alpha_1$ 和 α_2 .

3.3 控制器收敛时间与稳态误差界分析

将式(16)代入式(15), 滑模变量 s 的一阶导数又可以表示为

$$\dot{s} = -\lambda_1 |s|^{\alpha_1} \operatorname{sgn} s - \lambda_2 |s|^{\alpha_2} \operatorname{sgn} s + \tilde{\tau}_{\text{ext}}. \quad (17)$$

定理1 系统(17)的状态变量 s 在有限时间 T 内, 收敛到稳态误差界 $|s|$ 内, 其中 T 和 $|s|$ 分别表示如下:

$$\begin{aligned} T &= \max\left\{\frac{1}{\lambda_1(\alpha_1 - 1)}\left(\left(\frac{\zeta}{\lambda_2}\right)^{\frac{1-\alpha_1}{\alpha_2}} - |s_0|^{1-\alpha_1}\right), \right. \\ &\quad \left.\frac{1}{\lambda_2(1 - \alpha_2)}\left(|s_0|^{1-\alpha_2} - \left(\frac{\zeta}{\lambda_1}\right)^{\frac{1-\alpha_2}{\alpha_1}}\right)\right\}, \\ |s| &\leq \min\left\{\left(\frac{\zeta}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{\alpha_1}}, \left(\frac{\zeta}{\lambda_2}\right)^{\frac{1}{\alpha_2}}\right\}. \end{aligned}$$

证 定义Lyapunov函数为

$$L = \frac{1}{2}s^2. \quad (18)$$

对式(18)求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s \cdot \dot{s} = \\ &-\lambda_1 |s|^{\alpha_1+1} - \lambda_2 |s|^{\alpha_2+1} + \tilde{\tau}_{\text{ext}} s \leq \\ &-\lambda_1 |s|^{\alpha_1+1} - \lambda_2 |s|^{\alpha_2+1} + \zeta |s|, \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)可以等价为以下两种形式:

$$\dot{L} \leq -\lambda_1 |s|^{\alpha_1+1} - (\lambda_2 |s|^{\alpha_2} - \zeta) |s|, \quad (20)$$

$$\dot{L} \leq -(\lambda_1 |s|^{\alpha_1} - \zeta) |s| - \lambda_2 |s|^{\alpha_2+1}. \quad (21)$$

当 $|s| \geq \left(\frac{\zeta}{\lambda_2}\right)^{\frac{1}{\alpha_2}}$, 即 $L \geq L_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{\lambda_2}\right)^{\frac{2}{\alpha_2}}$ 时, 化简式

(20), 可得

$$\dot{L} \leq -\lambda_1 |s|^{\alpha_1+1} = -2^{\frac{\alpha_1+1}{2}} \lambda_1 L^{\frac{\alpha_1+1}{2}}, \quad (22)$$

所以, L 由 L_0 收敛到 L_1 需要的时间 T_1 小于 $T_{1\max}$,

$$\begin{aligned} T_{1\max} &= \int_{L_1}^{L_0} \frac{1}{2^{\frac{\alpha_1+1}{2}} \lambda_1 L^{\frac{\alpha_1+1}{2}}} dL = \\ &\frac{1}{\lambda_1(\alpha_1 - 1)} \left(\left(\frac{\zeta}{\lambda_2} \right)^{\frac{1-\alpha_1}{\alpha_2}} - |s_0|^{1-\alpha_1} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

当 $|s| \geq \left(\frac{\zeta}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{\alpha_1}}$, 即 $L \geq L_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{\zeta}{\lambda_1}\right)^{\frac{2}{\alpha_1}}$ 时, 化简式(21), 可得

$$\dot{L} \leq -\lambda_2 |s|^{\alpha_2+1} = -2^{\frac{\alpha_2+1}{2}} \lambda_2 L^{\frac{\alpha_2+1}{2}}, \quad (24)$$

所以, L 由 L_0 收敛到 L_2 需要的时间 T_2 小于 $T_{2\max}$

$$\begin{aligned} T_{2\max} &= \int_{L_2}^{L_0} \frac{1}{2^{\frac{\alpha_2+1}{2}} \lambda_2 L^{\frac{\alpha_2+1}{2}}} dL = \\ &\frac{1}{\lambda_2(1 - \alpha_2)} \left(|s_0|^{1-\alpha_2} - \left(\frac{\zeta}{\lambda_1} \right)^{\frac{1-\alpha_2}{\alpha_1}} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

综上可得, 滑模面 s 在有限时间 T 内, 即

$$T = \max\{T_{1\max}, T_{2\max}\}, \quad (26)$$

收敛到如下区域:

$$|s| \leq \min\left\{\left(\frac{\zeta}{\lambda_1}\right)^{\frac{1}{\alpha_1}}, \left(\frac{\zeta}{\lambda_2}\right)^{\frac{1}{\alpha_2}}\right\}. \quad (27)$$

证毕.

注1 本节设计的基于干扰观测的滑模控制器与传统的滑模控制方法相比, 消除了滑动模态下的抖振现象, 缩短了到达阶段的时间. 分析式(27), 又因为 ζ 远小于 δ , 所以与基于双幂次趋近律的滑模控制方法^[13]相比, 所提算法减小了稳态误差范围, 提高了轨迹跟踪精度.

4 自适应导纳控制

本节将设计自适应导纳控制器, 依据碰撞外力的大小和方向调整机械臂的末端位置, 以保证机械臂在碰撞发生时的柔顺性和碰撞解除后迅速恢复工作状态的能力, 对应于图2中外环轨迹更新部分.

4.1 导纳模型

导纳模型描述了碰撞外力和机械臂末端位置之间的关系, 模型表示如下:

$$\begin{aligned} -F &= M_d(\ddot{X}_d - \ddot{X}_r) + B_d(\dot{X}_d - \dot{X}_r) + \\ &K_d(X_d - X_r), \end{aligned} \quad (28)$$

式中: $M_d, B_d, K_d \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别表示虚拟惯性矩阵、虚拟阻尼矩阵和虚拟刚度矩阵; $X_d, X_r \in \mathbb{R}^3$ 分别是机械臂末端在笛卡尔空间中的期望位置和参考位置; $F \in \mathbb{R}^3$ 是机械臂末端受到的碰撞力, 为式(29)中 $\tilde{F}$ 的前3列.

$$\tilde{F} = J^{-T}(q)\tau_{\text{ext}}. \quad (29)$$

通过分析式(28)可知, 如果未发生碰撞, $F = 0$,

$X_d = X_r$, 机械臂沿着参考轨迹 X_r 运动; 存在外部碰撞时, $F \neq 0$, $X_d \neq X_r$, 机械臂偏离参考轨迹 X_r , 进行碰撞回避; 碰撞解除后, $F = 0$, 在导纳控制的作用下, X_d 逐渐逼近 X_r , 直至二者相等, 机械臂回到参考轨迹 X_r 上, 此阶段为碰撞恢复阶段; 之后, 机械臂沿着参考轨迹运动继续完成工作任务. 图3是碰撞环境下基于导纳控制的机械臂运行轨迹示意图, 虚线表示机械臂的参考轨迹 X_r , 实线表示机械臂的实际运行轨迹 X_d , 在无碰撞正常运行阶段两轨迹重合.

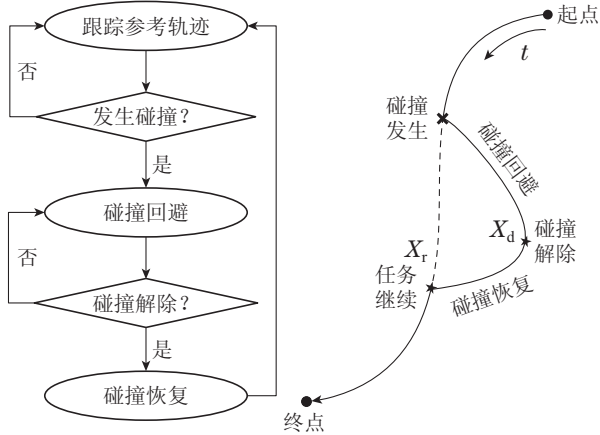


图3 碰撞环境下基于导纳控制的机械臂运动轨迹

Fig. 3 The trajectory of the manipulator based on admittance control in collision environment

4.2 导纳参数分析

因为式(28)中的 M_d , B_d 和 K_d 是对角矩阵, 所以笛卡尔空间中各主方向上的导纳模型相互独立, 单自由度的导纳模型可以表示为

$$-f = m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_r) + b(\dot{x}_d - \dot{x}_r) + k(x_d - x_r), \quad (30)$$

式中待调节的导纳参数分别是虚拟惯性 m 、虚拟阻尼 b 和虚拟刚度 k . 将式(30)转换为拉普拉斯表达式形式, 其中 f 作为系统输入, $x_e = x_d - x_r$ 为系统输出, 得到二阶传递函数

$$h(s) = \frac{x_e(s)}{f(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} = \frac{1}{k} \frac{\frac{m}{b}s + \frac{k}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}}, \quad (31)$$

式中: $\frac{1}{k}$ 是传递函数 $h(s)$ 的增益, 无阻尼自然频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 阻尼比 $\xi = \frac{b}{2\sqrt{mk}}$. 当选取合适的参数 b , m , k 时, 可以满足 $0 < \xi < 1$, 此时系统为欠阻尼状态, 保证系统的稳定性.

由二阶系统的时域响应性质知, 虚拟阻尼 b 和虚拟惯性 m 影响系统的动态性能, 虚拟刚度 k 决定响应的稳态值. 导纳参数对系统性能影响分析如下:

1) 虚拟惯性效应: 保持 b 和 k 不变, 系统响应时间随 m 的增大而减小, 但当 m 超过一定值后, 会出现超调和震荡现象, 导致系统不稳定.

2) 虚拟阻尼效应: 保持 m 和 k 不变, 系统响应时间随 b 的增大而增大. b 过小, 会出现超调和震荡现象; b 过大, 系统的响应时间过长.

3) 虚拟刚度效应: 在干扰力 f 一定的情况下, 位置偏移量 x_e 与虚拟刚度 k 呈负相关性. k 越小, 稳态时的 x_e 越大, 机械臂柔顺性越好; 反之, k 越大, 稳态时的 x_e 越小, 机械臂的柔顺性越差. 当 $k = 0$ 时, 机械臂可以在外力作用下柔顺地离开参考轨迹 x_r , 不受参考轨迹的约束, 但在外力消失后, 机械臂不具有回到参考轨迹上的能力.

4.3 自适应导纳控制器设计

导纳控制器的设计在本质上是对笛卡尔空间中各主方向上导纳模型参数 m , b 和 k 的设计. 为了保证机械臂在碰撞发生时的柔顺性和碰撞解除后迅速恢复工作状态的能力, 本节在固定导纳控制器的基础上对虚拟刚度 k 进行自适应调节, 来提高人机交互的安全程度和工作效率, 具体调节方法如下:

1) 在无碰撞任务执行阶段, 虚拟刚度 k 默认保持最大值, 此时机械臂具有较高刚度, 可以减少由传感器噪声引起的振荡, 提高定位精度;

2) 在碰撞回避阶段, 随着 f 的增加, 虚拟刚度 k 减小, 机械臂的柔顺性变好, 受参考轨迹的约束减小, 可以在碰撞外力作用下柔顺地离开参考轨迹;

3) 在碰撞恢复阶段, f 减小到零, 虚拟刚度 k 增加到最大值, 机械臂受参考轨迹的约束变大, 能够以较快的速度回到参考轨迹上继续工作任务.

自适应导纳控制器的设计流程如下.

步骤1 通过控制变量法多次实验, 调节导纳参数数值, 分析外力作用下的轨迹变化, 比较控制性能, 获得参数 m 和 b 的优选值;

步骤2 确定参数 k 变化范围 $[k_{\min}, k_{\max}]$, $k_{\min}$ 为大于零的常数, $k_{\max}$ 的选取需考虑机械臂能够稳定运行的最大 k 值, k 越大机械臂回到参考轨迹的速度越快, 但 k 过大会出现超调现象, 不利于平稳运行;

步骤3 利用式(32)归一化碰撞外力 f . 其中, f_{tresh} 通过综合考虑环境噪声、测量噪声和人机安全范围内所能承受的最大碰撞力来进行选取,

$$f' = \min\left(\frac{f}{f_{\text{tresh}}}, 1\right); \quad (32)$$

步骤4 用式(33)实时更新虚拟刚度 k , 易知虚拟刚度 k 与 f' 呈负相关性.

$$k = (k_{\min} - k_{\max}) \sin\left(\frac{\pi}{2} f'\right) + k_{\max}. \quad (33)$$

注2 本节设计了自适应导纳控制器, 并将其运用于机械臂的碰撞响应, 以保证机械臂在碰撞发生时的柔顺性和碰撞解除后迅速恢复工作状态的能力. 该算法与被迫停止策略^[20]相比, 可以将碰撞力限制在安全范围内, 保障人机安全;

与零力控制^[21]和反射控制^[22]相比, 能在不中断当前工作任务的情况下实现碰撞回避, 有效提高了机械臂的工作效率.

5 可视化仿真验证

本节将六自由度串联机械臂的Simscape模型作为被控对象, 在仿真平台MATLAB上进行算法验证, 已知Simscape模型, 由Simulink中的Robotics system toolbox模块可以实时计算 $M(q)$, $C(q, \dot{q})$, $G(q)$ 的值. 可视化仿真环境如图4所示, 人机间的碰撞由机械臂与接触平面间的碰撞来模拟. 其中: $\{W\}$ 和 $\{B\}$ 是世界坐标系和机械臂基坐标系且两者重合, $\{C\}$ 是固定在机械臂末端执行器上的坐标系, $\{P\}$ 是固定在接触平面上的坐标系, 机械臂和接触平面的位姿是指在世界坐标系 $\{W\}$ 下的相对位姿.

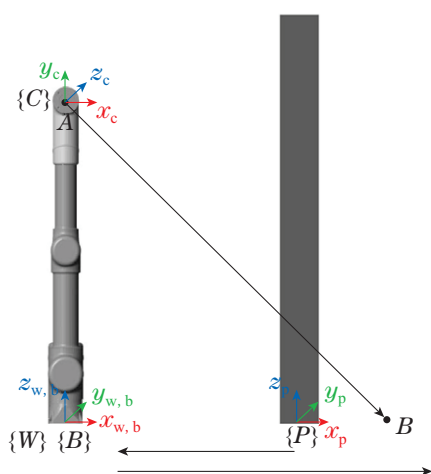


图4 可视化仿真场景

Fig. 4 The visual simulation scene

设置仿真时长为10 s, 固定步长为0.005 s, 距离的单位是mm, 角度采用弧度制表示. 机械臂在坐标系 $\{W\}$ 中的 $A(0, -192.5, 787.5)$ 和 $B(576, -192.5, 31.5)$ 两点之间做匀速直线运动, 运动时间为8 s. 接触平面在 x 轴方向上的移动轨迹用式(34)表示, 即

$$x_{\text{object}} = \begin{cases} 250, & t \leq 3, \\ 250 - 50(t - 3), & 3 < t < 7, \\ 50 + 100(t - 7), & 7 \leq t \leq 10. \end{cases} \quad (34)$$

在接下来的仿真中, 首先对控制系统中内环轨迹跟踪控制器进行验证, 比较本文提出的基于干扰观测的滑模控制算法(sliding mode controller based on disturbance observation, SMCDO)和基于双幂次趋近律的滑模控制算法^[12](sliding mode controller, SMC)的轨迹跟踪精度. 在确定内环的基础上, 考虑接触平面和机械臂末端之间的碰撞力, 验证自适应导纳控制在安全控制中的有效性, 并与传统的固定参数导纳控制作比较.

5.1 基于干扰观测的滑模控制算法仿真验证

仿真中, 设关节摩擦力 $\tau_f = 0$ N; 在关节1上添加

扰动 $\tau_1 = 200 \sin t$ N; 综合考虑检测速度和精度, 选取 $K_0 = 250I_{6 \times 6}$. 为保证滑模面的可达性, 要求滑模面中参数对角阵 Λ 的对角元素大于0, 选取 $\Lambda = 50I_{6 \times 6}$. 为保证系统距离滑模面较远时, 能快速逼近滑模面, 要求 $\alpha_1 > 1$, 选取 $\alpha_1 = 2$. 为保证系统趋近滑模面时能低速平滑运动, 要求 $0 < \alpha_2 < 1$, 选取 $\alpha_2 = 0.5$. 根据式(23)(25)–(27), 为保证收敛时间和稳态误差足够小, 选取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 100$.

如图5–6所示, 当关节1所受外部干扰力为 τ_1 时, 广义动量干扰观测器的观测误差在 $[-0.83 \text{ N}, 1.16 \text{ N}]$ 之内; 关节1能实时跟踪期望轨迹, 跟踪速度快, SMCDO对外部干扰具有鲁棒性. 各关节的输出力矩曲线如图7所示.

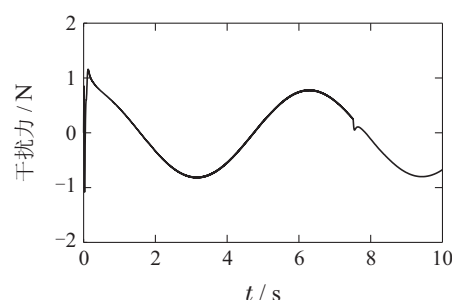


图5 关节1的干扰力观测误差

Fig. 5 The interference force observation error of joint 1

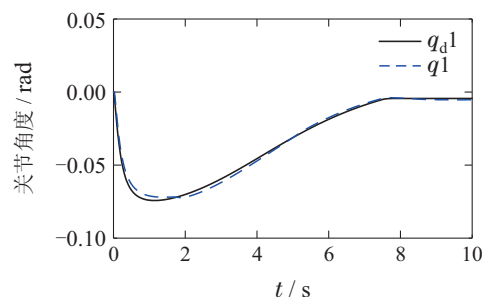


图6 基于SMCDO的关节1轨迹跟踪图

Fig. 6 The trajectory tracking of joint 1 based on SMCDO

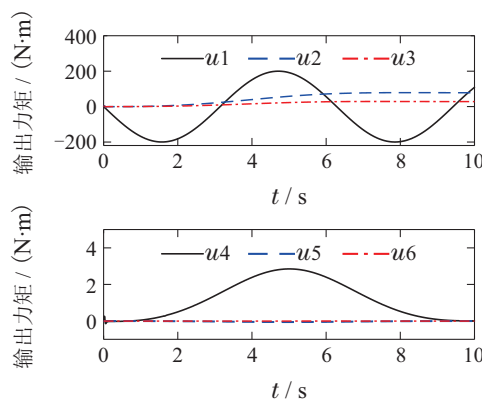


图7 基于SMCDO的关节1到6的力矩输出曲线

Fig. 7 Output torque curves of joint 1 to 6 based on SMCDO

为了合理比较SMCDO和SMC在外部干扰作用下

的轨迹跟踪精度, 将二者的共同参数和仿真条件保持一致, 得到如下结果。

由图8-9可知, SMCDO的滑模面函数 s 稳态误差界限为 $[-0.23, 0.3]$, 各关节轨迹跟踪误差范围为 $[-0.008, 0.007]$ rad. 由图10-11可知, SMC的滑模面函数 s 稳态误差界限为 $[-2.8, 2.5]$, 各关节轨迹跟踪误差范围为 $[-0.05, 0.06]$ rad. 对比两组图可知, 本文提出的方法可以在存在外部干扰的情况下, 将滑模面函数 s 收敛到零的较小邻域内, 减小了稳态误差, 提高了轨迹跟踪的精度。

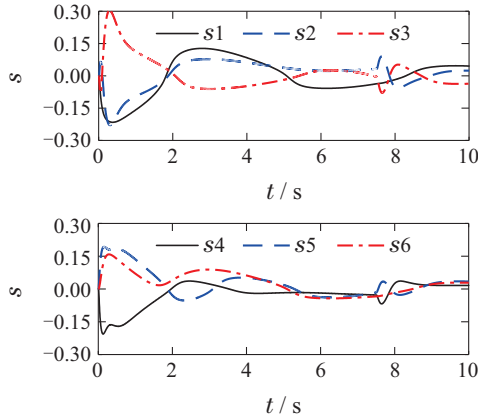


图8 基于SMCDO的滑模面函数 s 收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves of s based on SMCDO

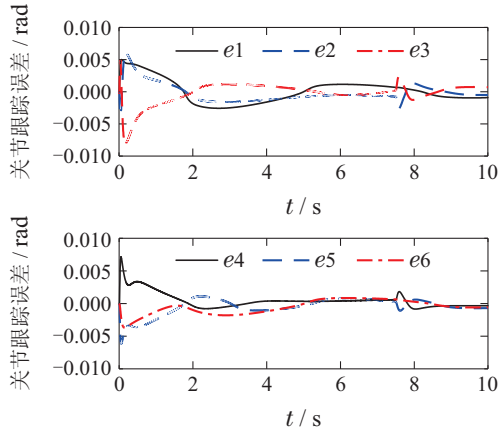


图9 基于SMCDO的各关节轨迹跟踪误差

Fig. 9 Tracking error of each joint based on SMCDO

5.2 自适应导纳控制仿真验证

由于笛卡尔空间中各方向上的导纳模型都是独立的, 本节以世界坐标系中 x 轴方向上的导纳模型为例进行仿真验证。

1) 固定参数导纳控制仿真验证。

通过多次试验, 调节导纳参数比较控制性能, 得到虚拟质量和虚拟阻尼的优选值分别为 $m = 20$ kg, $b = 10$ Ns/m. 综合考虑机械臂碰撞发生时的柔顺性和碰撞结束后回到参考轨迹的速度, 设置虚拟刚度 $k = 5$ N/m.

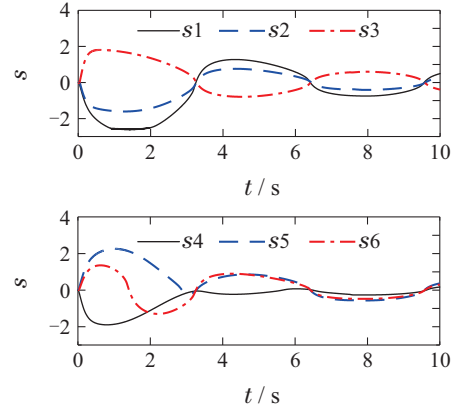


图10 基于SMC的滑模面函数 s 收敛曲线图

Fig. 10 Convergence curves of s based on SMC

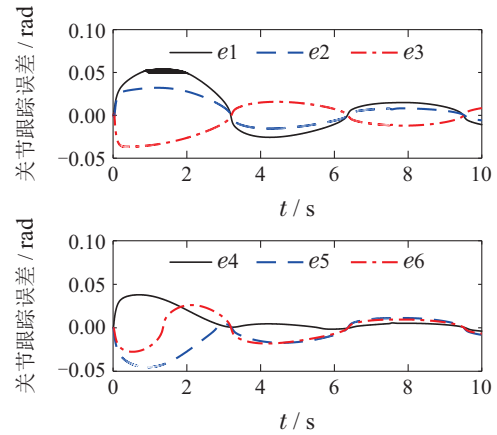


图11 基于SMC的各关节轨迹跟踪误差

Fig. 11 Tracking error of each joint based on SMC

在进行点到点的任务过程中, 机械臂末端与平面物体发生碰撞, 利用式(29)得到 x 轴方向上的碰撞力如图12所示, 采用固定导纳控制方法, 获得机械臂的实际运动轨迹如图13所示. 由于只考虑 x 轴方向上的碰撞力, 所以 y 和 z 轴方向上的运动不受影响。

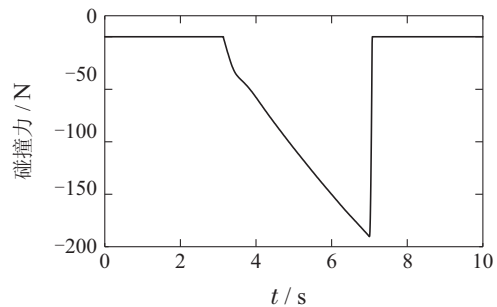


图12 基于固定导纳控制的 x 轴方向上的碰撞力

Fig. 12 Collision force in the x -axis direction based on fixed admittance control

分析图12-13可知, 机械臂末端与平面物体在3.13 s发生碰撞, 在固定参数导纳控制器的作用下, 机械臂根据碰撞力更新运行轨迹, 减轻了碰撞的剧烈程度. $t_1 \in [3.13 \text{ s}, 7 \text{ s}]$ 为碰撞回避阶段, 随着接触平面逼近, 机械臂偏离参考轨迹, 但偏离幅度较小, 碰撞力

持续增加至190 N, 不能被限制在一个固定的安全范围内; $t_2 \in [7 \text{ s}, 8.4 \text{ s}]$ 为机械臂的碰撞恢复阶段, 在碰撞解除后1.4 s内, 机械臂回到参考轨迹 X_r 上; 在之后的 $t_3 \in [8.4 \text{ s}, 10 \text{ s}]$ 时间段内, 机械臂为正常工作状态。

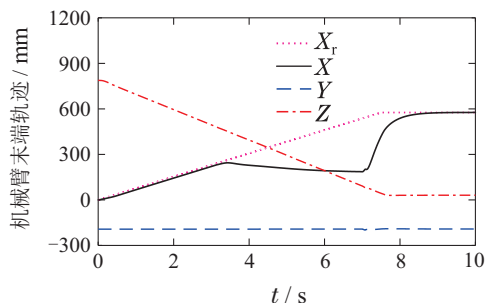


图 13 基于固定导纳控制的机械臂笛卡尔空间运行轨迹

Fig. 13 The trajectory of manipulator based on fixed admittance control in cartesian space

2) 自适应导纳控制仿真验证.

通过多次仿真实验, 调节导纳参数值比较控制性能, 最终设置自适应导纳控制器的仿真参数分别为: $k_{\max} = 10 \text{ N/m}$, $k_{\min} = 1 \text{ N/m}$, $b = 10 \text{ Ns/m}$, $m = 20 \text{ kg}$, $f_{\text{tresh}} = 200 \text{ N}$.

自适应导纳控制的仿真结果如图14~16所示, 在 $t_{a0} \in [0 \text{ s}, 3.13 \text{ s}]$ 无碰撞自由运行阶段, 虚拟刚度 $k \approx 10 \text{ N/m}$, 机械臂实际运行轨迹 x 和参考轨迹 x_r 重合; 在 $t_{a1} \in [3.13 \text{ s}, 7 \text{ s}]$ 碰撞响应阶段, 虚拟刚度 $k \approx 1 \text{ N/m}$, 机械臂几乎不受参考轨迹的约束, 只在碰撞外力的作用下运动, 末端碰撞力被限制在35 N内; 在 $t_{a2} \in [7 \text{ s}, 7.8 \text{ s}]$ 碰撞恢复阶段, 虚拟刚度 $k \approx 10 \text{ N/m}$, 机械臂受参考轨迹的约束较大, 碰撞恢复时间为0.8 s.

对比图12和图15以及图13和图16可知, 在碰撞响应阶段, 自适应导纳控制器使机械臂具有更好的柔顺性, 产生更大轨迹形变, 将碰撞力限制在较小的范围内, 保障了人机安全. 并且, 当采用自适应导纳控制时, 机械臂在碰撞解除后回到参考轨迹的速度更快, 碰撞恢复时间短. 图17是采用自适应导纳控制方法时机械臂的可视化运动过程.

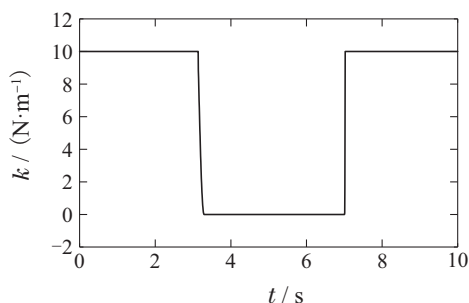


图 14 k 变化曲线

Fig. 14 The variation curve of k

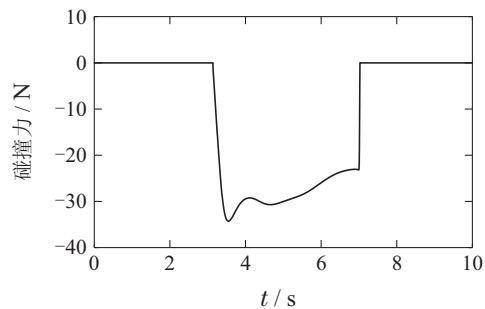


图 15 基于自适应导纳控制的 x 方向上的碰撞力

Fig. 15 Collision force in x direction based on adaptive admittance control

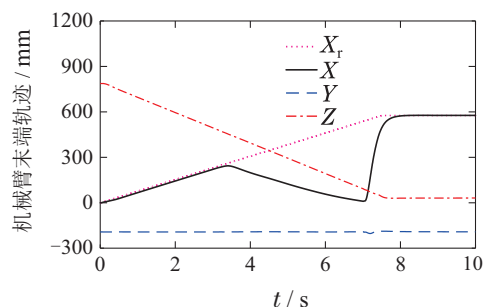


图 16 基于自适应导纳控制的机械臂笛卡尔空间运动轨迹

Fig. 16 The trajectory of manipulator based on adaptive admittance control in cartesian space

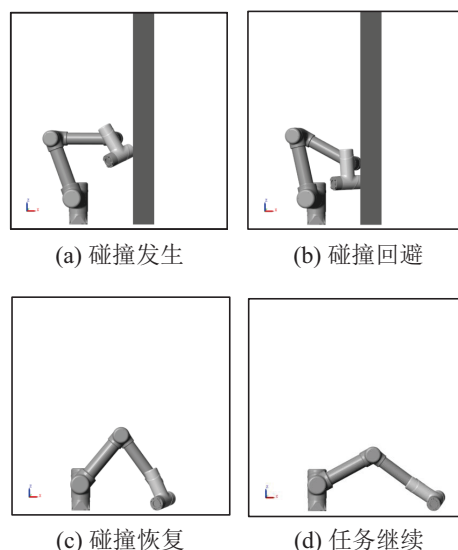


图 17 协作机械臂碰撞环境下的运动过程

Fig. 17 Motion process of the manipulator in collision environment

6 实验验证

本节在图18所示的实验平台上验证安全控制算法的有效性, 实验平台由二轴机械臂本体、控制器、线性直流稳压电源、用户界面软件和控制软件(MATLAB/Simulink)组成. 机械臂本体由底座、大臂和小臂3部分组成, 共有2个伺服电机可以驱动2个关节运动, 机械臂2个关节都采用17位绝对值编码器用于检测关节角度, 角度分辨率小于 0.001° . 机械臂的惯性矩阵

$M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、哥氏力和向心力矩阵 $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、重力矩向量 $G(q) \in \mathbb{R}^n$ 分别为

$$M(q) = \begin{bmatrix} 2p_3 \cos q_2 + p_2 + p_1 & p_3 \cos q_2 + p_2 \\ p_3 \cos q_2 + p_2 & p_2 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -p_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -p_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ p_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} p_4 g \cos q_1 + p_5 g \cos (q_1 + q_2) \\ p_5 g \cos (q_1 + q_2) \end{bmatrix}, \quad (37)$$

式中: $p_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$, $p_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$, $p_3 = m_2 l_{c1} l_1$, $p_4 = m_1 l_{c2} + m_2 l_1$, $p_5 = m_2 l_{c2}$, $l_{c1} = \frac{l_1}{2}$, $l_{c2} = \frac{l_2}{2}$, 式中各参数如下表1所示。

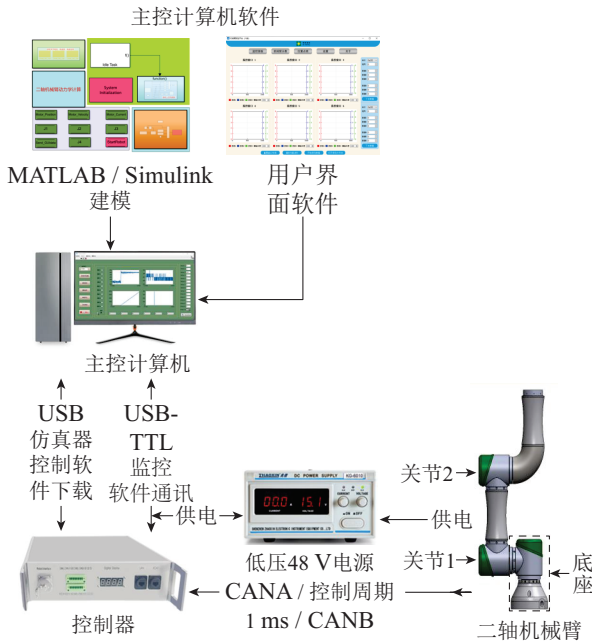


图 18 算法验证实验平台

Fig. 18 The algorithm validation experiment platform

表 1 机械臂参数

Table 1 The parameters of the manipulator

名称	参数	数值
连杆1质量	m_1	4.72 kg
连杆2质量	m_2	0.80 kg
连杆1惯性	I_1	diag{0.0666, 0.2216, 0.1593} kg · m ²
连杆2惯性	I_2	diag{0.0011, 0.0203, 0.0198} kg · m ²
连杆1长度	l_1	0.30 m
连杆2长度	l_2	0.28 m

实验中, 将关节1固定在零位状态, 以关节2为验证机械臂安全控制算法, 设置关节2的参考轨迹 $q_{r2}(t) = 0$, 考虑到人为施加给机械臂的力是不稳定的, 不能用于定量分析导纳参数变化对机械臂行为的

影响, 故本节利用上位机在第2 s和第4 s之间给关节2发送大小为10 N的干扰力, 各关节的力矩 $\tau_i = \tau_{i0} + \tau_{iext}$, 其中: τ_{i0} 为原有力矩, τ_{iext} 为施加的干扰力矩。本节主要包括3部分实验内容: 导纳模型参数选取、自适应导纳控制实验验证和基于干扰观测的滑模控制器的实验验证。

注 3 实验中通过采集机械臂的关节电流获得等效的关节驱动力矩 $\tau = n_{tran} T_{conv} i_m$ 。其中: n_{tran} 是减速传动比, T_{conv} 是电流力矩转换系数, i_m 是电机驱动电流。

1) 导纳模型参数选取。

保持虚拟刚度 $k = 20$ N/m和阻尼系数 $b = 8$ Ns/m, 虚拟惯性 m 从1 kg变化到10 kg, 得到关节2的轨迹如图19所示。分析图19可知, 选择不同的 m 值, 机械臂在碰撞发生时偏离参考轨迹的位移相差不大, 即碰撞发生时的柔顺性相似; 随着 m 的增大, 机械臂在碰撞结束后返回参考轨迹的速度变快; 当 m 超过3 kg时出现超调现象, 返回参考轨迹的时间又会变长, 故最终选取机械臂虚拟惯性 m 为2 kg。

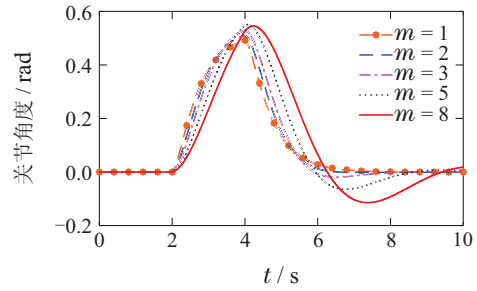


图 19 不同虚拟惯性 m 下的关节2轨迹曲线

Fig. 19 The trajectory of joint 2 under different m

保持虚拟惯性 $m = 2$ kg和阻尼系数 $b = 8$ Ns/m, 虚拟刚度 k 从1 N/m变化到20 N/m, 得到关节2的轨迹如图20所示。分析图20可知, 随着 k 的增加, 机械臂在碰撞发生时偏离参考轨迹的位移变小, 即柔顺性变差, 但在碰撞结束后返回参考轨迹的速度变快。综合考虑机械臂期望具有的柔顺性和返回期望轨迹的速度, 最终选取机械臂虚拟刚度 k 为10 N/m。

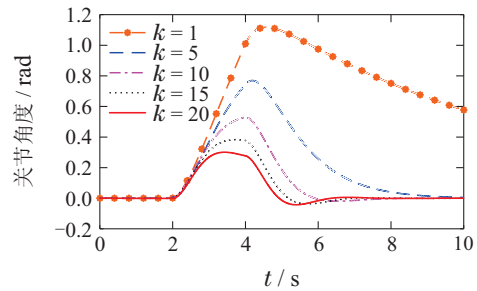


图 20 不同虚拟刚度 k 下的关节2轨迹曲线

Fig. 20 The trajectory of joint 2 under different k

保持虚拟刚度 $k = 10$ N/m和虚拟惯性 $m = 2$ kg, 阻尼系数 b 从3 Ns/m 变化到15 Ns/m, 得到关节2的轨

迹如图21所示. 分析图21可知, b 越小, 机械臂在碰撞发生时偏离参考轨迹的位移越大, 即柔顺性越好; 但当 b 小于 8 Ns/m 时, 又会出现超调和震荡, 故最终选取机械臂阻尼系数 b 为 8 Ns/m .

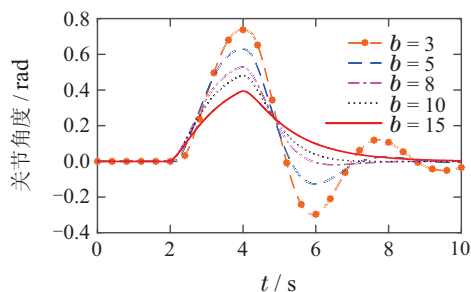


图 21 不同阻尼系数 b 下的关节2轨迹曲线

Fig. 21 The trajectory of joint 2 under different b

综上所述, 设置固定参数导纳控制器的参数为: $m = 2 \text{ kg}$, $k = 10 \text{ N/m}$, $b = 8 \text{ Ns/m}$.

2) 自适应导纳控制实验验证.

设置自适应导纳控制器的参数为: $f_{\text{resh}} = 10 \text{ N}$, $m = 2 \text{ kg}$, $b = 8 \text{ Ns/m}$, $k_{\min} = 1 \text{ N/m}$, $k_{\max} = 10 \text{ N/m}$, 通过上位机在 1 s 到 3 s 内给机械臂关节2施加大小为 10 N 的干扰力, 获得的实验结果如图22所示. 与固定参数导纳控制相比, 在第 2 s 至 4 s 碰撞发生期间, 机械臂关节2偏离参考轨迹的位移更大, 为 1 rad , 说明本文提出的自适应导纳控制器可使机械臂在碰撞发生时更加柔顺的离开参考轨迹, 将人机之间的碰撞力限制在安全范围内; 第 4 s 碰撞结束后, 在自适应导纳控制器的作用下, 机械臂在 1 s 内返回参考轨迹, 碰撞恢复时间更少, 有效提高了机械臂的工作效率.

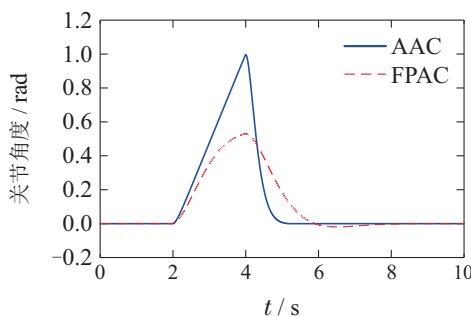


图 22 自适应导纳控制下的关节2轨迹曲线

Fig. 22 The trajectory of joint 2 under adaptive admittance control

3) 基于干扰观测的滑模控制器的实验验证.

在整个实验过程中, 内环轨迹跟踪控制器都采用基于干扰观测的滑模控制器(SMCDO), 通过在多次实验中调节式(16)中的控制参数, 对比轨迹跟踪性能, 最终设置控制器的参数分别为: $\lambda_1 = 100$, $\lambda_2 = 100$, $\Lambda = 50$, $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 0.5$.

图23是机械臂在自适应导纳控制实验中, 基于SMCDO获得的关节2轨迹跟踪误差图, 误差主要来源

于测量噪声、建模误差、机械臂的质量分布、观测器参数等, 由于碰撞引起的干扰力矩是高频信号, 而模型误差产生的干扰力矩是和速度相关的低频信号这一特点, 在观测器后添加高通滤波器, 使得误差控制控制在一定范围内. 分析图23可知, 即使在外部干扰的作用下, SMCDO仍能快速跟踪期望轨迹, 且轨迹跟踪误差在 $[-0.019, 0.006] \text{ rad}$ 之内, 满足了大多数工作场景下对轨迹跟踪精度的要求.

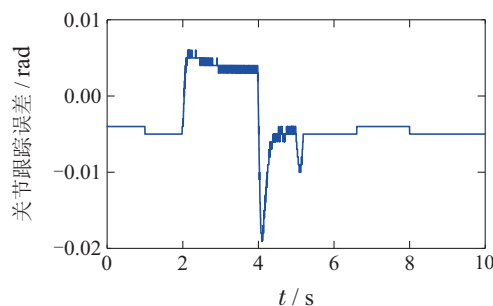


图 23 基于SMCDO的关节2轨迹跟踪误差

Fig. 23 The trajectory tracking difference of joint 2 based on SMCDO

7 结论

本文针对人机协作进行装配任务中的碰撞问题, 提出了一种基于自适应导纳和滑模的内-外环安全控制算法, 该算法对于末端未安装力矩传感器的机械臂同样具有适应性. 内环是基于干扰观测的双趋近律滑模轨迹跟踪控制器, 该控制器可有效避免抖振现象, 对外部干扰具有鲁棒性, 且轨迹跟踪精度高; 外环采用自适应导纳控制进行轨迹更新, 依据末端干扰力更新虚拟刚度, 保证了机械臂碰撞发生时的柔顺性和碰撞结束后迅速恢复工作状态的性能. 与现有的安全控制算法, 如零力控制和反射控制相比, 显著提高了人机协作的安全性和工作效率. 仿真和实验研究验证了本文提出方法的有效性. 后续研究中将设计新型滑模面与扰动观测器, 以实现更快的误差收敛速度与扰动观测速度, 进一步提高轨迹跟踪精度与扰动观测精度.

参考文献:

- [1] VILLANI V, PINI F, LEALI F, et al. Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 2018, 55: 248 – 266.
 - [2] HENTOUT A, AOUACHE M, MAOUDJ A, et al. Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 2019, 33(15): 764 – 799.
 - [3] SEVERINSON-EKLUNDH K, GREEN A, HUTTENRAUCH H. Social and collaborative aspects of interaction with a service robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 42(3/4): 223 – 234.
 - [4] DU Zhiqiang, WANG Wei, YAN Zhiyuan, et al. A physical human-robot interaction algorithm based on fuzzy reinforcement learning for minimally invasive surgery manipulator. *Robot*, 2017, 39(3): 363 – 370.
- (杜志江, 王伟, 闫志远, 等. 基于模糊强化学习的微创外科手术机械臂人机交互方法. 机器人, 2017, 39(3): 363 – 370.)

- [5] NOONI E, ZEFRAN M, PATTON P J, et al. A model for human-human collaborative object manipulation and its application to human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(4): 800 – 896.
- [6] XU Q, JING Z, HU S. Stability analysis of nonlinear dynamic system with linear observer for a multilink flexible manipulator. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2018, 103(7): 27 – 36.
- [7] FARRAGE A, UCHIYAMA N. Improvement of motion accuracy and energy consumption for industrial feed drive systems using adaptive sliding mode control. *ISA Transactions*, 2020, 106: 382 – 391.
- [8] ZHANG Xiaojun, YUAN Xiaming, WANG Xiangyang, et al. A model reference terminal sliding mode control method with fixed-time convergence. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3): 712 – 723.
(张骁骏, 袁夏明, 王向阳, 等. 一种固定时间收敛模型参考终端滑模控制方法. *自动化学报*, 2022, 48(3): 712 – 723.)
- [9] FERRARA A, INCREMONA G P. Design of an integral suboptimal second-order sliding mode controller for the robust motion control of robot manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6): 2316 – 2325.
- [10] BAEK J, JIN M, HAN S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3628 – 3637.
- [11] JIA S, SHAN J. Finite-time trajectory tracking control of space manipulator under actuator saturation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(3): 2086 – 2096.
- [12] MISHRA J P, YU X, JALILI M, et al. On fast terminal sliding-mode control design for higher order systems. *The 42nd Annual Conference of the IEEE-Industrial-Electronics-Society (IECON)*. Florence, Italy: IEEE, 2016: 252 – 257.
- [13] LI Huijie, CAI Yuanli. Sliding mode control method based on double power reaching law. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 498 – 502.
(李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法. *控制与决策*, 2016, 31(3): 498 – 502.)
- [14] MIN J K, AHN K H, PARK H C, et al. A novel reactive-type joint torque sensor with high torsional stiffness for robot applications. *Mechatronics*, 2019, 63: 102265.
- [15] HADDADIN S, ALBU-SCHAFFER A, DE LUCA A, et al. Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice, France: IEEE, 2008: 3356 – 3363.
- [16] HADDADIN S. *Towards Safe Robots*. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [17] HADDADIN S, DE LUCA A, ALBU-SCHFFER A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(6): 1292 – 1312.
- [18] YAN Han, WANG Xiaozhuan, LIU Zhiguang, et al. Real-time estimation of single contact information of the whole robotic arm based on the momentum observation and optimization algorithm in human-robot cooperation. *Robot*, 2018, 40(4): 393 – 400.
(颜晗, 王晓撰, 刘智光, 等. 在人机协作中基于动量观测和优化算法的全机械臂单点接触信息实时估计. *机器人*, 2018, 40(4): 393 – 400.)
- [19] LI Zhijing, YE Jinhua, WU Haibin. Collision detection algorithm for robots with unknown payload. *Robot*, 2020, 42(1): 29 – 38.
(李智靖, 叶锦华, 吴海彬. 机器人带未知负载条件下的碰撞检测算法. *机器人*, 2020, 42(1): 29 – 38.)
- [20] DE LUCA A, ALBU-SCHAFFER A, HADDADIN S, et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2006: 1623 – 1630.
- [21] YOU Youpeng, ZHANG Yu, LI Chenggang. Force-free control for the direct teaching of robots. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(3): 10 – 17.
(游有鹏, 张宇, 李成刚. 面向直接示教的机器人零力控制. *机械工程学报*, 2014, 50(3): 10 – 17.)
- [22] TOMIC T, OTT C, HADDADIN S. External wrench estimation, collision detection, and reflex reaction for flying robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(6): 1467 – 1482.
- [23] PENG G, YANG C, HE W, et al. Force sensorless admittance control with neural learning for robots with actuator saturation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(4): 3138 – 3148.
- [24] HAN Yali, XU Youxiong, GAO Haitao, et al. Knee joint exoskeleton swing control with admittance control. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(12): 1943 – 1950.
(韩亚丽, 许有熊, 高海涛, 等. 基于导纳控制的膝关节外骨骼摆动控制研究. *自动化学报*, 2016, 42(12): 1943 – 1950.)
- [25] LIU Jinkun. *Robot Control System Design and MATLAB Simulation: Basic Design Method*. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 3.
(刘金琨. 机器人控制系统的设计与MATLAB仿真: 先进设计方法. 北京: 清华大学出版社, 2017: 3.)

作者简介:

周林娜 博士, 副教授, 目前研究方向为机器人控制、奇异摄动系统, E-mail: linnazhou@cumt.edu.cn;

王 宵 硕士研究生, 目前研究方向为协作机械臂的碰撞检测与响应, E-mail: wangxiao777@139.com;

丛香怡 硕士研究生, 目前研究方向为协作机械臂运动规划与抓取, E-mail: congxiangyi@cumt.edu.cn;

陈正升 博士, 讲师, 目前研究方向为机器人动力学建模与控制, E-mail: chenzhengsheng@cumt.edu.cn;

杨春雨 博士, 教授, 目前研究方向为机器人系统、奇异摄动系统、工业过程操作控制和信息物理系统, E-mail: chunyu yang@cumt.edu.cn.