

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.06.041

基于自适应阻抗模型的双机器人协调搬运内力控制

王耀武,张得礼,胡雪刚

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对双机器人协调搬运作业中的内力控制问题,建立内力的数学模型,提出基于自适应阻抗模型的从机器人单端调节的内力控制策略,设计仿真和实验的任务场景;双机器人搬运箱体完成抬起、移动、放下的运动轨迹,对物体 z 轴方向的内力进行控制。仿真模拟了物体所受内力的变化,给定物体 z 轴方向的正弦位置误差信号并进行验证,完成了双机器人协调搬运的物理实验。结果表明:所提出的内力控制策略可以有效地把物体所受的内力控制在期望水平上。

关键词:双机器人;协调搬运;内力控制;自适应阻抗模型;单端调节

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0162-04

Internal Force Control Based on Adaptive Impedance Model in the Dual-robot Coordinated Transportation

WANG Yaowu, ZHANG Deli, HU Xuegang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To solve the problem of internal force control in the coordinated transporting of dual robots, based on the master-slave motion framework and the introduced internal force model, an internal force control strategy of slave robot single-ended adjustment based on adaptive impedance model is proposed. The simulation and experimental task is designed, i.e., the dual robots carrying the box to complete the trajectory of lifting, moving and lowering, and controlling the internal force in z -axis of object frame. The change of the internal force of the object is simulated. The sinusoidal position error signal in the z -axis of the object frame is given and verified to complete the physical experiment of coordinated transporting of dual robots. The results show that the proposed internal force control strategy can effectively control the internal force of the object at the desired level.

Keywords: dual robots; coordinated transportation; internal force control; adaptive impedance model; single-ended adjustment

0 引言

双机器人运动学协调分为相对协调和同步协调^[1]。在相对协调任务中,双机器人末端工具的相对位姿发生变化,比如双机器人协调完成工件的喷涂任务;在同步协调任务中,双机器人末端工具的相对位姿不发生变化,比如双机器人协调搬运。在同步协调任务中,典型的如搬运,由于机器人自身的定位精度误差、双机器人之间坐标系标定的误差、工件的尺寸误差等,若双机器人是在位置控制模式下进行任务,则不可避免地会对物体施加很大的内力,严重时会对物体和机器人造成损坏^[2]。因此需要对物体上的内力进行控制。

目前双机器人协调内力控制方法主要如下:文献[2]针对双机器人搬运作业中的内力控制问题,提出基于遗传算法的阻尼比例微分控制方法,但是参数调整和择优过程繁琐。文献[3]采用变阻抗模型对两个机器人对物体施加的力进行调整,同时克服外界的扰动力实现机器人对外界的柔顺。文献[4]基于双机器人对等架构采用阻抗控

制同时调整双机器人和物体之间的接触力。文献[5]采用位置/力混合控制,同时控制两个机器人和物体之间的接触力。上述研究都是同时调整两个机器人对物体的接触力,可能会产生新的内力,而且文献[5]中位置力/混合控制不适用大部分只开放位置控制权限的机器人。文献[6]通过模型参考自适应算法来调整从机器人的运动轨迹进而控制内力,但是模型数学运算不利于实现。文献[7]提出了面向被操作对象的协调策略,并对作用于被操作对象的合力进行力分解。文献[8]在此基础上提出了面向被操作对象的内外阻抗控制策略。虽然上述研究考虑了双臂对物体的内力和外力控制,但是都采用定阻抗的控制策略,鲁棒性不强。除此之外,其他的智能控制策略如文献[9-10]也用到了协调控制中,这种模型有过于复杂、强耦合、非线性等缺点,并未在现有的控制系统中得以应用。

针对上述双机器人协调内力控制方法存在的问题,本文在双机器人主从协调架构和所介绍的内力计算模型的基础上,提出了基于自适应阻抗模型的从机器人单端位置调节内力控制策略。由于双机器人作用于物体上的内力

第一作者简介:王耀武(1995—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为智能机器人技术。

是一对相互作用力,在搬运过程中,规划的主机器人的离线轨迹不变,从机器人根据其物体的内力大小来调整自己的位置。基于上述策略有效地解决了双机器人协调搬运过程中的内力控制问题。

1 运动学分析和内力建模

如图1所示, T_w 表示双机器人系统的世界坐标系; T_{b1} 表示主机器人的基坐标系, T_w 和 T_{b1} 重合; T_{b2} 表示从机器人的基坐标系; T_{e1} 表示主机器人和物体接触点处的坐标系, T_{e2} 表示从机器人和物体接触点处的坐标系; o 表示物体的质心; T_o 表示物体质心处的坐标系; ${}^{b1}T_{e1}$ 表示 T_{e1} 相对 T_{b1} 的表达, ${}^{b2}T_{e2}$ 表示 T_{e2} 相对 T_{b2} 的表达; ${}^{b1}T_{b2}$ 表示 T_{b2} 相对 T_{b1} 的表达; ${}^{e2}T_{e1}$ 表示 T_{e1} 相对 T_{e2} 的表达; L_1 表示主机器人和物体的接触点到物体质心的矢量, L_2 表示从机器人和物体的接触点到物体质心的矢量; F_{e1} 、 N_{e1} 表示主机器人在接触点处对物体施加的力在 T_{e1} 中的表达; F_{e2} 、 N_{e2} 表示从机器人在接触点处对物体施加的力在 T_{e2} 中的表达; F_{o1} 、 N_{o1} 表示主机器人在接触点处对物体施加的力在 T_o 中的表达; F_{o2} 、 N_{o2} 表示从机器人在接触点处对物体施加的力在 T_o 中的表达。

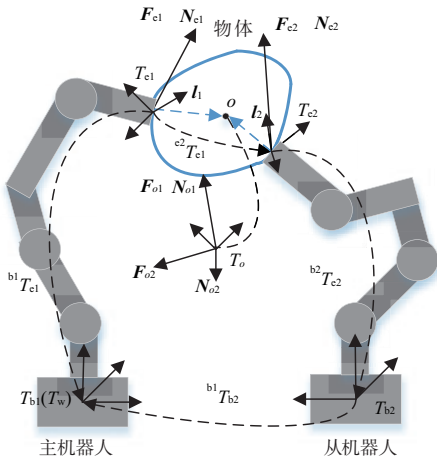


图1 双机器人协调运动学和静力学关系

由图1中双机器人主从协调搬运的运动学闭环链^[11],可得公式(1)。由公式(1)可知,只要知道 ${}^{b1}T_{b2}$ 、 ${}^{b1}T_{e1}$ 、 ${}^{e2}T_{e1}$,就可以知道 ${}^{b2}T_{e2}$,即主从协调是从机器人跟随主机器人的运动而运动。

$${}^{b2}T_{e2} = ({}^{b1}T_{b2})^{-1} {}^{b1}T_{e1} ({}^{e2}T_{e1})^{-1} \quad (1)$$

设 $f_{e1} = [F_{e1}^T \ N_{e1}^T]^T$, $f_{e2} = [F_{e2}^T \ N_{e2}^T]^T$, $f_{o1} = [F_{o1}^T \ N_{o1}^T]^T$, $f_{o2} = [F_{o2}^T \ N_{o2}^T]^T$, 由力的坐标系之间的变换关系可得:

$$f_{o1} = \begin{bmatrix} {}^oR_{e1} & 0 \\ -S(L_1) {}^oR_{e1} & {}^oR_{e1} \end{bmatrix} f_{e1} \quad (2)$$

$$f_{o2} = \begin{bmatrix} {}^oR_{e2} & 0 \\ -S(L_2) {}^oR_{e2} & {}^oR_{e2} \end{bmatrix} f_{e2} \quad (3)$$

式中: ${}^oR_{e1}$ 表示 T_{e1} 相对于 T_o 的旋转矩阵; $S(L_1)$ 表示对 L_1

的叉乘运算,其结果为 3×3 的矩阵; ${}^oR_{e2}$ 表示 T_{e2} 相对于 T_o 的旋转矩阵; $S(L_2)$ 表示对 L_2 的叉乘运算,其结果为 3×3 的矩阵。物体所受的内力^[12]如公式(4)所示。

$$f_i = [f_{i1}^T \ f_{i2}^T]^T = [1/2(f_{o1} - f_{o2})^T \ -1/2(f_{o1} - f_{o2})^T]^T \quad (4)$$

式中: f_i 表示物体所受的内力,其是一个 12 维的矢量; f_{i1} 表示主机器人对物体的内力, f_{i2} 表示从机器人对物体的内力,都是 6 维的矢量。 f_{i1} 和 f_{i2} 是一对相互作用力,它们都是相对于 T_o 的。

2 内力控制策略

2.1 自适应阻抗模型

以某一维度力控制为例,自适应阻抗模型^[13]的公式表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} m\Delta x'' + m\Delta x' = F_e - F_d - b\Omega \\ \Omega(t) = \Omega(t-\lambda) + \eta \frac{F_d - F_e}{b} \end{cases} \quad (5)$$

式中: m 表示质量系数; b 表示阻尼系数; F_d 表示机器人和环境之间的期望作用力; F_e 表示机器人和环境之间的作用力; Ω 为自适应控制律; t 表示当前周期; λ 表示采样周期; η 为更新率; $\Delta x = x_d - x_c$, x_d 表示机器人规划的离线期望位置, x_c 表示机器人的实际柔顺位置,即 x_d 经过自适应阻抗模型修正之后的位置; $\Delta x'$ 、 $\Delta x''$ 分别表示 Δx 的一阶和二阶导数。为了保证系统稳定,应保证 $0 < \eta < \frac{\lambda b}{\lambda b + m}$, 稳定性证明可参考文献[13]。

自适应阻抗模型的控制框图如图2所示,除相关字符含义上已说明外, K_e 表示环境刚度, x 表示机器人实际跟踪到的位置,一般认为 $x_c = x$ 。

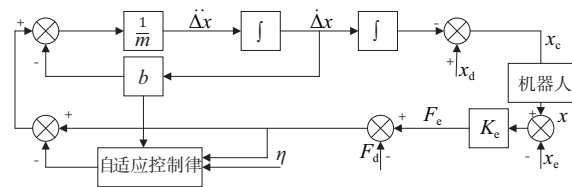


图2 自适应阻抗模型控制框图

2.2 从机器人单端调节内力控制策略

内力控制策略如图3所示。 x_{d1} 表示主机器人规划的期望轨迹, x_{d2} 表示从机器人规划的期望轨迹; x_1 表示主机器人的实际轨迹, x_2 表示从机器人的实际轨迹; x_{c2} 表示修改后的从机器人的实际轨迹; F_{e1} 表示主机器人和物体的接触力, F_{e2} 表示从机器人和物体的接触力; ${}^oF_{e2}$ 表示从机器人对物体的内力在物体质心坐标系 T_o 中的表达; Δx_2 表示从机器人的位置修正量在 T_o 中的表达, Δx_2 表示 ${}^o\Delta x_2$ 经坐标系变换到从机器人末端的位置修正量; oF_d 表示从机器人对物体的期望内力在物体质心坐标系 T_o 中的表达。

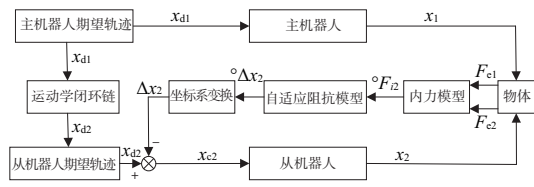


图3 内力控制策略框图

由上文内力模型可知,双机器人作用于物体的内力是一对相互作用力,因此,控制一个机器人对物体的作用力即可。在双机器人搬运过程中,根据双机器人对物体的接触力可实时计算出从机器人对物体的内力,根据期望内力 $^o F_d$ 和上文的自适应阻抗模型可实时计算出从机器人的位置修正量 Δx_2 来实时修改从机器人的期望轨迹,从而使控制内力控制在期望水平上。

3 仿真和实验

3.1 仿真和实验模型的建立

如图4所示,双机器人末端安装有法兰,从机器人法兰安装力传感器,所搬运物体为铝质薄壁箱体,长、宽、高分别为280 mm、220 mm、120 mm。在箱体长度方向人为加入环境阻抗,即厚度都为10 mm的橡胶垫,橡胶垫和箱体总质量约为2.1 kg,双机器人通过和橡胶垫接触产生一定压力来完成搬运任务。箱体质地均匀, T_o 取在箱体几何中心, T_{b1} 、 T_{b2} 之间的位姿关系由四点握手标定法^[14]得到,传感器坐标系(图中未标出)的 z 轴和 T_{e2} 的 z 轴共线。

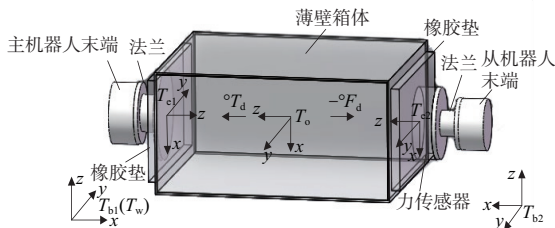


图4 双机器人协调搬运示意图

图4是搬运前的初始状态,双机器人到达指定位置和橡胶垫接触产生期望内力 $^o F_d$ 和 $-^o F_d$, T_o 、 T_{e1} 、 T_{e2} 各坐标轴平行。启动搬运后, T_{e1} 的 x 、 y 、 z 轴和 T_{b1} 的 z 、 y 、 x 轴保持平行,只有相对位置发生变化。主机器人先在 T_{b1} 的 z 轴正向移动40 mm,然后在 T_{b1} 的 y 轴移动400 mm,最后在 T_{b1} 的 z 轴负向移动40 mm,速度为20 mm/s。整个搬运过程从机器人进行跟随运动,即双机器人搬运箱体完成抬起、移动、放下的搬运任务。

分析图4,由上文介绍的内力计算模型可以知道,从机器人对物体的内力就是传感器 z 轴检测到的力的反力, $^o F_d$ 和 $-^o F_d$ 就是物体 z 轴受到的内力(压力),控制过程就是根据 $^o F_d$ 和搬运过程产生的内力经过自适应阻抗模型产生从机器人末端的位置修正量,从机器人不断修正位置从而把内力控制在 $^o F_d$ 。

3.2 仿真验证

经多次橡胶垫挤压实验,测定橡胶垫和机器人之间的接触刚度约为50 N/mm。根据箱体和橡胶垫质量以及机器人和橡胶垫之间的摩擦系数初步估计搬运箱体所需最小期望内力 $^o F_d = 50$ N,这个内力是使物体在搬运过程中不掉落的最小内力。为了模拟实际搬运过程中从机器人末端在 z 轴方向相对于主机器人末端的位置变化,给从机器人末端一周期为搬运总时间,即24 s,幅值为0.5 mm的位置误差信号。在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,通过仿真得到结果。

如图5所示,未进行力控制之前,双机器人对物体的压力,即内力,在25 N~75 N之间变化,开启内力控制之后,通过调整公式(5)中的阻抗参数和更新率,内力被稳定控制在 (50 ± 0.5) N。

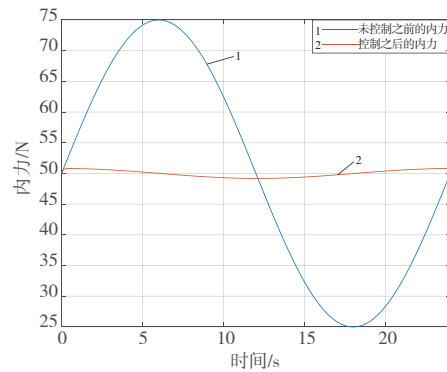


图5 内力控制仿真结果

3.3 实验验证

根据3.1节介绍的仿真模型搭建实验平台,如图6所示。实验使用的机器人是埃斯顿六关节通用机器人ER30和ER20,分别作为主机器人和从机器人,传感器使用某公司的M3714A搭配M8128B1采集盒。传感器安装在从机器人末端,采集到的数据经采集盒处理后上传到上位机,供编程处理使用。这里需说明,所有的轨迹规划程序都是作者在上位机上编程实现,用到的只是机器人控制器的伺服功能,上位机和机器人控制器的通信周期为10 ms。



图6 双机器人协调搬运实验

经过多次运动实验,确定 $^o F_d = 60$ N,此内力刚好可以完成搬运任务且不会产生多余的内力。为了编写力控制程序,公式(5)经过后向差分离散化^[15-16]之后在上位机上编程实现,通过多次调整公式(5)中的阻抗参数和更新

率,得到最终的实验结果。

图7所示是传感器采集到的控制前后的内力变化曲线。在进行内力控制之前,只进行运动控制完成搬运轨迹,搬运总时长24s,其中抬起2s,放下2s,移动20s。在抬起和移动、移动和放下的转折点处由于相对位置误差突然变大导致内力发生突变,搬运过程中内力最大为120N。由于接触刚度为50N/mm,双机器人间最大约有1.2mm的相对位置误差。在开启内力控制之后,不仅在转折点处把内力及时控制在60N左右,在移动过程中内力也被稳定控制在(60±2)N。

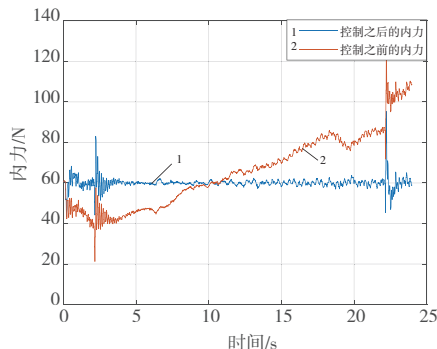


图7 内力控制实验结果

4 结语

本文所提出的基于自适应阻抗模型的从机器人单端位置调节内力控制策略有良好的效果,在双机器人搬运箱体完成抬起、搬运、放下且速度为20mm/s的运动轨迹过程中,给定物体z轴期望内力60N的任务要求,最终内力不仅在移动过程中被控制在(60±2)N,在抬起和移动以及移动和放下的转折点处,物体内力有突变的情况下,仍然被及时地控制在期望水平。

参考文献:

- [1] 姚桐兴. 双工业机器人协调运动控制技术[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [2] 欧阳帆,张铁,陈杨. 基于遗传算法的双机器人协调搬运阻尼比例微分控制方法[J]. 上海交通大学学报,2016,50(6):879-883.

- [3] 段晋军,甘亚辉,戴先中. 双臂协调搬运过程中基于变阻抗模型的位置/力混合控制[J]. 机器人,2019,41(6):795-802,812.
- [4] 陈明. 基于阻抗模型的双机器人对等协作控制研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [5] 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.
- [6] 潘建龙. 多机器人协作系统运动规划及位置力协调控制研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [7] 周扬. 双臂机器人的控制系统建立及阻抗控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [8] 贺军. 变负载双臂机器人阻抗自适应控制系统研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016.
- [9] GUEAIEB W, KARRAY F, AL-SHARHAN S. A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007,12(2):109-125.
- [10] GUEAIEB W, KARRAY F, AL-SHARHAN S. A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007,12(2):109-125.
- [11] 邓休. 双机器人协调运动规划与研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [12] UCHIYAMA M, DAUCHEZ P. A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots[C]// Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Philadelphia, PA, USA: IEEE,1988:350-356.
- [13] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004,12(3):474-483.
- [14] GAN Y H, DAI X Z. Base frame calibration for coordinated industrial robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(7/8):563-570.
- [15] 赵霞,王祝萍,贾海航. 连续系统离散化方法的比较与解析初探[J]. 工业和信息化教育,2015(10):71-76,82.
- [16] 高培阳. 基于力传感器的工业机器人恒力磨抛系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.

收稿日期:2020-10-22

(上接第161页)

与试验。采用STM32F407单片机做主控制器,创新性地以线驱动式二自由度吊臂作为物料抓取机构,辅以带有物料定位功能的底盘、环形物料存储区得以高效率地搬运物料。所设计机器人在比赛规定时间内快速完成复杂的搬运不同颜色物料的任务,并以“1'20”的成绩打破了“中国机器人大赛——光电车型搬运赛”的原有记录。

参考文献:

- [1] 李坤全,文睿. 机器人技术的发展与其在制造业中的应用[J]. 中国金属通报,2017(2):60-61.
- [2] 林兆花,徐天亮. 机器人技术在物流业中的应用[J]. 物流技

术,2012,31(13):42-45.

- [3] 刘扬武. 基于单片机的循迹智能车系统设计[J]. 电子技术与软件工程,2016(18):261.
- [4] 吕书信,张北伟,王泽澄. 基于STM32分拣搬运机器人控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(9):101-104.
- [5] ROBIN R M. Introduction to AI robotics[M]. 2nd, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [6] 金奇,邓志杰. PID控制原理及参数整定方法[J]. 重庆工学院学报(自然科学版),2008,22(5):91-94.

收稿日期:2020-10-09