

仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制方法研究

操蓉蓉, 刘大勇, 赵冠永, 郝伟阳

(国能神皖安庆发电有限责任公司, 安徽 安庆 246000)

摘要:为使机器人在搬运过程中能够根据外部环境和货物状态的变化, 实时调整其阻抗参数, 实现接触力精确控制, 提出仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制方法研究。设计基于位置的机器人阻抗控制模型, 以压力传感器获取机器人末端执行器实际接触力, 与期望接触力一同作为控制函数的输入。通过函数输出位置修正量, 用于修正机器人目标位置, 实现机器人与环境的柔顺接触和精准搬运。实验结果显示: 该方法在接触力与位置控制上的优势显著, 在环境位置变化条件下具有较强的抗干扰性能。此外, 当实际接触力与期望值相差较大时, 选取较小阻尼系数; 当接触力在期望值附近时, 增大阻尼系数, 具有更好的阻尼系数自适应调控效果, 实现精准的仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制。

关键词: 仓储物流; 搬运机器人; 接触力; 阻抗控制; 柔顺接触; 模糊控制器

中图分类号: TP242

文章编号: 1000-0682(2024)06-0063-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.012

Research on automatic control method of contact force impedance for warehouse logistics handling robots

CAO Rongrong, LIU Dayong, ZHAO Guanyong, HAO Weiyang

(Guoneng Shenwan Anqing Power Generation Co., Ltd., Anhui Anqing 246000, China)

Abstract: In order to enable robots to adjust their impedance parameters in real-time based on changes in external environment and cargo status during the transportation process, and thereby achieve precise control of contact force, a research on automatic control method of contact force impedance for warehouse logistics handling robots is proposed. Design a location-based impedance control model for robots, using pressure sensors to obtain the actual contact force of the robot's end effector, which is used as input to the control function along with the expected contact force. Output the position correction amount through the function to correct the robot's target position, achieve smooth contact and accurate transportation between the robot and the environment. The experimental results show that this method has significant advantages in contact force and position control, and has strong anti-interference performance under environmental position changes. In addition, when the actual contact force differs significantly from the expected value, a smaller damping coefficient should be selected. When the contact force is near the expected value, increasing the damping coefficient has a better adaptive control effect on the damping coefficient, achieving accurate automatic control of the contact force impedance of warehousing and logistics handling robots.

Keywords: warehousing and logistics; handling robots; contact force; impedance control; smooth contact; fuzzy controller

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 安徽公司安庆电厂智能仓储管理系统的研究和应用科技创新项目(KJXM2023-003)

第一作者: 操蓉蓉(1981—), 女, 安徽安庆人, 本科, 中级工程师, 研究方向为工业互联网、智慧化电厂、行政管理、物资管理等方面。

0 引言

仓储物流搬运机器人是专门用于在仓库和物流环境中进行货物搬运的自动化机器人^[1]。它们能够代替人工进行货物的搬运、码放、分拣等操作,提高物流效率,降低人力成本,并在一定程度上解决了劳动力短缺的问题。仓储物流搬运机器人在执行搬运任务时,经常需要与货物、货架、传送带等环境进行接触^[2-3]。在这些交互过程中,机器人需要精确控制其与环境之间的接触力,以确保货物搬运的安全性和稳定性。如果接触力过大,可能会损坏货物或机器人本身;如果接触力过小,又可能导致货物滑落或机器人无法稳定地搬运货物。因此可以通过仓储物流搬运机器人接触力阻抗控制,使机器人在搬运过程中能够根据外部环境和货物状态的变化,实时调整其阻抗参数,从而实现对接触力的精确控制^[4-5]。通过阻抗控制,机器人可以更加稳定、安全地完成搬运任务,同时减少因接触力不当而引发的损坏和事故。

为更好控制机器人的接触力,Jin X 等人提出一组机器人基于编队的分散迭代学习协同阻抗控制方法^[6],定义机器人系统的邻域阻抗误差,并构建基于编队的协同控制架构,确保每个机器人实现所需阻抗模型。即使在部分机器人无法直接获取所需角度轮廓,也能通过迭代学习实现协同控制。迭代学习控制通常对初始条件较为敏感,然而该方法未充分考虑初始条件设置的问题,若设置不当或存在较大的误差,将会导致机器人阻抗控制效果不佳。张世玉等人利用自抗干扰技术实现机器人阻抗控制^[7],该方法通过自抗干扰控制器生成新的期望力,修正机器人位置;同时,依据环境信息观察结果对期望力进行修正。然而,自抗干扰控制器的误差微分信号易受噪声干扰,导致提取较为困难,影响最终控制效果。为更好地控制机器人与环境的接触力,曹宏利提出一种设计了灵活的分数阶阻抗控制策略^[8],以优化接触性能,并通过自适应整改分数阶阻抗系数,便于实际应用并提升性能,然而,该方法对于高动态变化的环境,控制器可能无法实时响应,导致控制效果受限。郭万金等人利用集成概率模型实现机器人阻抗控制^[9],该方法通过构建集成贝叶斯神经网络模型,以描述机器人系统与环境的交互作用,经协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES)求解模型获取最优阻抗参数,实现最佳机器人阻抗控制。但是由于该方法涉及多个参数的调整,维护和调试会

相对复杂。在物流环境中,机器人可能需要频繁地进行维护和调整,以适应不同的搬运任务和工作环境,如果维护和调试过程过于复杂,可能会增加运营成本和时间成本。

目前阻抗控制方法往往基于固定的阻抗参数,难以适应不同货物和环境的变化,且计算复杂度高,实时性差,难以满足仓储物流搬运机器人对高效性和实时性的要求。为此,该文提出一种仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制方法,旨在提高机器人的搬运效率和安全性。

1 仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制的实现

1.1 仓储物流搬运机器人的环境接触力变化分析

仓储物流搬运机器人与待搬运货物之间的接触过程,可以视为由无负载的自由运动空间转变到与环境中待搬运货物碰撞接触后逐渐平稳地约束空间的过程^[10-11],机器人动力学特征在这一过程中的演变情况具备差异性。通过图 1 描述机器人与待搬运货物之间接触力变化情况。

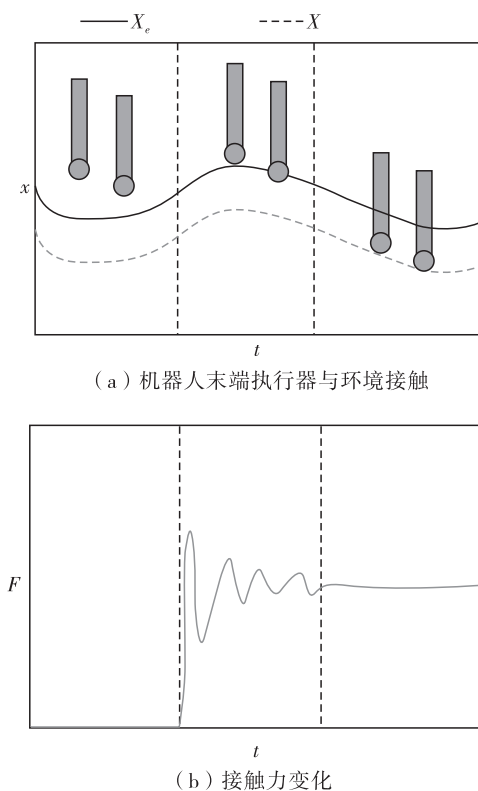


图 1 机器人与待搬运货物接触示意图

其中, X_e 、 X 分别用于描述环境位置信息、机器人末端执行器实际位置信息。

分析图 1(b)发现,机器人与待搬运货物接触存

在3个阶段,分别为:

(1)机器人还未接触到待搬运货物的自由运动线性阶段Ⅰ;

(2)机器人接触到待搬运货物的非线性过渡阶段Ⅱ;

(3)机器人与待搬运货物稳定接触的近似线性阶段Ⅲ。

将阶段Ⅱ、Ⅲ作为机器人与待搬运货物之间接触控制的研究重点,将机器人系统视为一个刚性系统^[12],为使其与待搬运货物之间的接触呈现出柔顺性,即以不损伤待搬运货物为前提的接触力阻抗控制,分别将仓储物流搬运机器人系统、环境中待搬运货物视为质量-阻尼-弹簧二阶系统、一阶弹簧系统,设计基于位置的接触力阻抗控制函数^[13],实现机器人末端执行器与待搬运货物的柔顺对接,实现货物精准搬运控制。

1.2 基于位置的机器人阻抗控制

仓储物流搬运机器人与待搬运环境的货物接触时,在不考虑关节间摩擦力条件下机器人关节动力学方程为:

$$A(q)\ddot{x} + H(q, \dot{q})\dot{x} + B(q)x = u + F_e \quad (1)$$

其中, x 为机器人状态向量; \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为 x 的一阶、二阶导数,分别表示机器人各部件的速度和加速度; A 、 H 、 B 分别用于描述机器人系统克服各关节和连杆的加速度惯量、内部各部件离心力、重力的力矩; u 、 F_e 分别用于描述驱动机器人动作的输入力矩、机器人末端执行器与搬运物体之间的作用力; q 、 \dot{q} 分别为关节角度和角速度。

基于位置的机器人接触力阻抗控制不需要复杂的模式切换调整,其在物流货物搬运过程中的控制函数表达式为:

$$M(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_r(\dot{X} - \dot{X}_d) + K(X - X_d) = F_r - F \quad (2)$$

其中, M 、 B_r 、 K 分别为惯性、阻尼、刚度矩阵; F 、 F_r 分别为实际接触力与期望接触力,其中 F 可通过力传感器获取; X 和 X_d 、 \dot{X} 和 \dot{X}_d 、 \ddot{X} 和 \ddot{X}_d 分别用于描述机器人位置、速度、加速度的实际值和期望值。

当仓储物流搬运机器人末端执行器与搬运物品接触时,物品受到机器人末端执行器的作用力可被视为一个线性弹簧^[14]。在执行搬运任务前,机器人会预先生成待搬运物品的具体位置信息以及一系列

参考数据,以确保搬运过程的精确与高效。这些信息对于机器人来说,就像一张详尽的地图,指引它准确地找到并搬运目标物品。而机器人的末端执行器,作为直接与物品接触的部分,配备精密的压力传感器。当末端执行器与待搬运物品接触时,传感器会迅速捕捉到接触瞬间的接触力 F ,并将采集数据传输至基于位置的接触力阻抗控制函数,生成一个用于调整机器人末端执行器位置的修正量 $e = (e_x, e_y, e_z)^T$,其符合下式:

$$-F = M\ddot{e} + B\dot{e} + Ke \quad (3)$$

式中, \dot{e}_i 、 \ddot{e}_i 分别为 e_i 的一阶、二阶导数。

可通过频域阻抗函数将其描述为:

$$F(s) = \frac{-e}{M_d s^2 + B_d s + K_d} \quad (4)$$

其中, M_d 、 B_d 、 K_d 分别为频域中机器人接触力阻抗控制函数的惯性、阻尼、刚度阻抗参数, s 为复频域变量, $F(s)$ 为阻抗函数。可通过对 $F(s)$ 中每一个元素执行二通滤波获取机器人末端执行器的位置修正向量 e 。在机器人末端执行器与仓储物流中的待搬运物体接触时,假设不存在基于位置的阻抗控制不存在误差,那么存在 $X = X_d$,此时, $e = X - X_r$, e 与机器人轨迹规划参考向量 X_r 之和,便可获取位移控制指令 $X_d = (x_d, y_d, z_d)^T$ 。控制原理如图2所示,其中, θ 为机器人关节角。

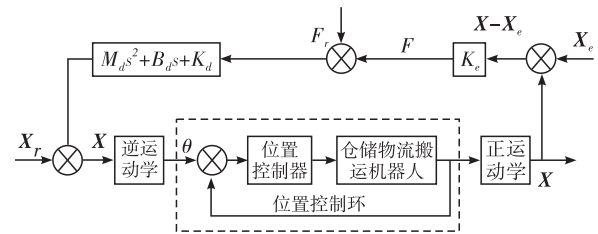


图2 基于位置的机器人阻抗控制原理

利用执行器末端搭载的压力传感器采集机器人执行末端与仓储物流环境带搬运物体之间的实际接触力 F ,将其与期望接触力 F_r 一同作为基于位置的阻抗控制函数的输入,通过函数输出位置修正量 e ,将其用于修正机器人目标位置 X_r 获取 X_d , X_d 通过运动学解算的逆向操作,获取机器人关节角变化量^[15],在其作用下使机器人末端执行器达到指定位置 X ,此时形成新的接触力,而后对新的接触力执行上述循环操作实现接触力阻抗闭环控制。

1.3 模糊阻抗控制器参数调控

依据1.2小节基于位置的阻抗控制器控制原理可知,精准的仓储物流搬运机器人搬运货物接触力

取决于控制器输出的位置修正量 e , 而 e 的大小取决于测量到的接触力与阻抗参数 M_d , B_d , K_d 有关, 因此引入模糊理念, 依据环境参数实时调整阻抗系数, 提升控制器输出修正量 e 的精度。

以上述设计的阻抗控制器为基础, 加入模糊控制器实时调整阻抗参数 M_d , B_d , K_d , 将三者的基础值分别设置为 $M_d = 1$, $B_d = 50$, $K_d = 625$, 模糊化的阻抗控制器结构见图 3。

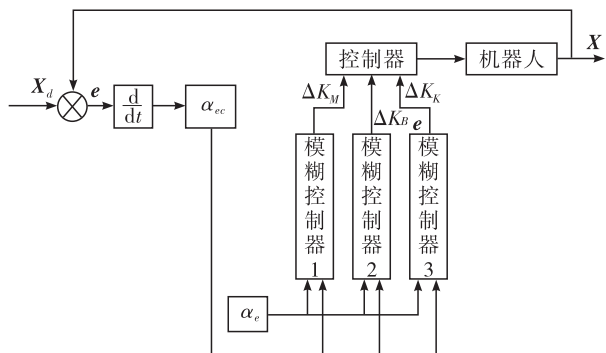


图 3 模糊化的阻抗控制器结构

模糊控制器的输入变量为位置偏差 e 、位置偏差变化率 ec , 输出变量为 U , 论域分别用 $e = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ (负大、负中、负小、零、正小、正中、正大), $ec = \{NB, NS, Z, PS, PB\}$, $U = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ 描述, 量化因子分别选取 7.5, 0.93, 5.0。依据上述设置得到阻抗参数 B_d 的模糊调节规则如表 1 所示, M_d , K_d 的模糊调节规则与其类似。

表 1 阻抗参数 B_d 的模糊调节规则

序号	e	ec	U
1	PB	PB	PB
2	PM	PB	PB
3	PS	PB	PB
4	Z	PB	PM
5	NS	PB	NS
6	NM	PB	NM
7	NB	PB	NB
8	PB	PS	PB
9	PM	PS	PB
10	PS	PS	PM
11	Z	PS	PS
12	NS	PS	NS
13	NM	PS	NM
14	NB	PS	NB
15	PB	Z	PB
16	PM	Z	PM

续表 1

序号	e	ec	U
17	PS	Z	PM
18	Z	Z	Z
19	NS	Z	NM
20	NM	Z	NM

由此, 基于上述模糊调节规则, 来设计阻抗控制器, 以此来完成阻抗参数 M_d , B_d , K_d 的实时调整, 以确保位置修正量 e 的精度, 从而实现更为精准的触力阻抗闭环控制。

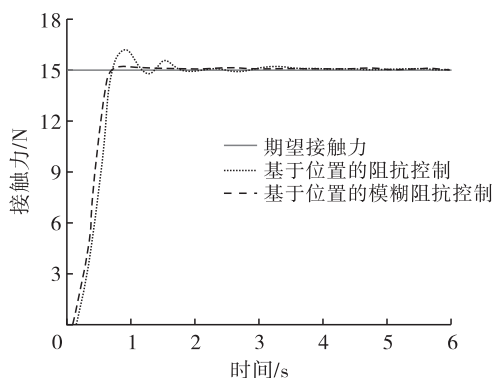
2 实验分析

以某一仓储物流搬运机器人为研究对象, 通过 simulink 软件模拟分析该文方法的机器人接触力阻抗控制方法的控制效果。该机器人的相关参数如表 2 所示。

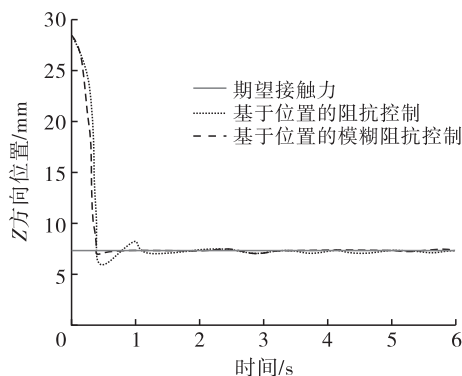
表 2 仓储物流搬运机器人详细参数

参数类别	参数名称	描述/范围
基本参数	型号	DCVR - B503
	重量	260 kg
	尺寸	1450 mm × 1870 mm × 2100 mm
	功率	3.8 kW
	关节范围	±165°
导航与定位	导航方式	SLAM
	定位精度	±5 mm
	传感器	超声波
控制与驱动	控制器类型	工业级控制器
	驱动方式	AGV
	最大速度	1 m/s
	加速度	0.5 m/s ²
	搬运方式	夹持式
搬运性能	搬运高度范围	50 ~ 200 cm
	搬运精度	±1 cm
	货物识别	RFID
通讯与接口	通讯协议	TCP/IP
	接口类型	RS232、USB、以太网等
安全特性	急停按钮	有
	碰撞检测	通过传感器实现
	安全防护等级	IP54

设置仓储物流搬运机器人末端执行器 Z 轴方向的初始位置 z 为 28 mm, 同时设定机器人末端执行器期望位置 z 为 7.5 mm, 末端执行器与待搬运货物的期望接触力为 15 N, 机器人按照点对点的运动方式向待搬运货物靠近。统计运动过程中机器人末端执行器接触力以位置的跟踪结果, 见图 4。



(a) 接触力跟踪曲线



(b) 位置跟踪曲线

图4 机器人末端执行器接触力以位置的跟踪结果

分析图4所示曲线可知,基于位置的阻抗控制方法约在0.18 s响应控制结果,约在0.8 s到达指定的位置及设定接触力范围,但是接触力超调量约在1.1 N,位置偏差约为1.3 mm;在约为1.5 s后,接触力及位置偏差逐步趋近于0。基于位置的模糊阻抗控制方法在0.10 s左右响应控制结果,约在0.75 s到达指定的位置及设定接触力范围,与上述相比具有一定优势;而从超调量角度分析,模糊阻抗控制方法接触力超调量很小,约为0.05 N,位置偏差约为0.05 mm,并在1.0 s左右达到稳定状态,且始终保持稳态直至实现结束。因此该文应用的基于位置的模糊阻抗控制方法在接触力与位置控制效果上具备显著优势。

设置机器人末端执行器与环境中待搬运货物之间的期望接触力为20 N,分析环境位置变换条件下,基于位置阻抗控制与基于位置的模糊阻抗控制方法作用下,其他参数一致时,两种方法的抗干扰性能好坏。设置环境参数为:

$$X_e = \begin{cases} 0, & 0 < t < 4 \\ 0.01 \sin(0.5\pi(t-3)), & 4 \leq t < 8 \\ 0, & 5 \leq t < 12 \end{cases} \quad (5)$$

其中利用正弦函数在 $4 \leq t < 8$ 时间段模拟环境位置变化。公式(5)条件下,两种方法控制后的接

触力变化情况见图5。

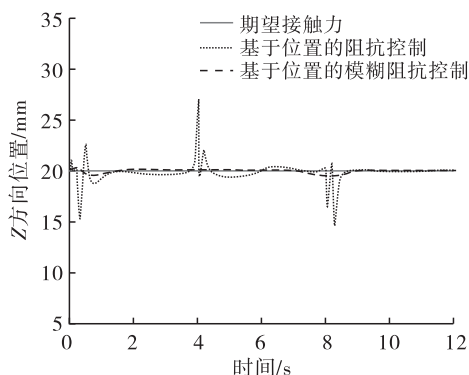
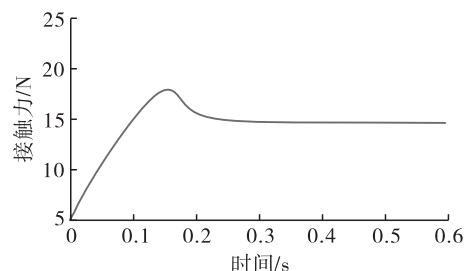


图5 两种方法控制后的接触力变化情况

分析图5数据可知,基于位置的阻抗控制方法作用下,在 $0 < t < 4$ s时间段,机器人末端执行器由自由运动线性阶段过渡到与环境接触阶段,该阶段产生了震荡现象,接触力最大振幅为5 N;4~8 s时间段,发生接触,在4 s、8 s均产生了振动现象,由此可知该方法的应用可在环境确定性高条件下保障较好的接触力跟踪性能,在环境变化条件下,抗干扰能力相对较弱。基于位置的模糊阻抗控制方法作用下,无论是自由运动线性阶段过渡到与环境接触阶段,还是机器人接触的变化环境时,均未产生显著震荡与超调现象。由此可以看出,基于位置的模糊阻抗控制方法在机器人接触力控制中的应用效果更好,能够更好地适应环境的变化情况。

通过分析该文方法作用下接触力控制效果与阻尼系数 B_d 的变化曲线,衡量阻尼系数变化对接触力阻抗控制效果的影响,以验证所提方法控制的有效性。设置期望接触力大小为15 N,结果见图6。



(a) 接触力变化曲线

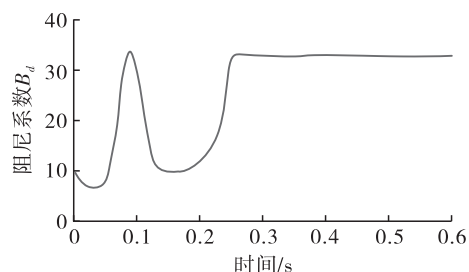
(b) 阻尼系数 B_d 变化曲线

图6 变化曲线

分阶段分析图6曲线可知:

(1) 0~0.1 s 阶段, 机器人末端执行器接触力呈现上升状态, 在0.1 s 达到期望接触力, 当接触力逐渐增加过程中, 阻尼系数 B_d 也逐渐增加, 达到期望接触力时, 阻尼系数 B_d 的值达到最大;

(2) 0.1~0.15 s 阶段, 接触力继续上升, 最大达到18 N, 此时处于接触力超调阶段, 该阶段阻尼系数 B_d 呈现降低趋势, 接触力达到最大15 N 时, 阻尼系数 B_d 最小, 有利于提升系统接触力控制的响应速度;

(3) 0.15~0.26 s 阶段, 接触力逐渐降低, 阻尼系数 B_d 逐渐增加, 当接触力趋于稳定的15 N 时, 阻尼系数 B_d 达到最大, 最大的 B_d 可使接触力控制保持较好的稳定性;

(4) 0.26~0.6 s, 该阶段接触力始终保持在15 N 附近, 此时阻尼系数 B_d 始终保持最大值, 保持接触力稳定控制在期望值附近。

综上可知, 当实际接触力与期望值相差较大时, 阻尼系数 B_d 选取较小值, 以便使实际接触力快速趋于接触力期望值; 当实际接触力在接触力期望值附近浮动时, 阻尼系数 B_d 选取较大值, 用于使系统快速趋于稳定。由此说明, 采用所提方法可有效实现阻尼系数的自适应调控, 从而完成精准的仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制。

3 结论

通过对仓储物流搬运机器人接触力阻抗控制方法的模拟分析, 验证该文方法的显著优势。在模拟环境位置变化条件下, 该文方法展现出更强的抗干扰性能, 有效抑制了震荡与超调现象。此外, 分析阻尼系数变化对接触力阻抗控制效果的影响发现, 阻尼系数的合理调整对于提升接触力控制的响应速度与稳定性具有关键作用。当实际接触力与期望值相差较大时, 应选取较小阻尼系数以快速逼近期望值; 当接触力在期望值附近时, 应增大阻尼系数以维持系统稳定。综上所述, 该文提出的基于位置的模糊阻抗控制方法可显著提升仓储物流搬运机器人在复杂环境下的接触力控制性能。

参考文献:

- [1] 漆圆方, 郭明德. 物流搬运智能机器人信息融合导航方法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 426-430.
- [2] 张婷婷, 张伟, 王亚刚. 欠驱动搬运机器人轨迹跟踪控制[J]. 包装工程, 2022, 43(03): 210-216.
- [3] 贾宏丽, 辛洪兵, 周顺豪. 轮足式包装搬运机器人减振装置设计[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 315-321.
- [4] 刘辽雪, 洪梦情, 顾秀涛, 等. 基于固定时间的柔性关节空间机器人阻抗控制[J]. 南京理工大学学报, 2022, 46(04): 379-386.
- [5] 宫赤坤, 吴浔炜, 袁立鹏. 基于阻抗和虚拟模型的四足机器人控制方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(10): 2152-2161.
- [6] JIN X. Formation-based decentralized iterative learning cooperative impedance control for a team of robot manipulators[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Systems, 2023, 53(2): 872-881.
- [7] 张世玉, 陈东生, 宋颖慧. 基于自抗干扰的装配机器人阻抗控制技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(09): 1876-1881.
- [8] 曹宏利. 基于分数阶阻抗的机器人动态接触控制仿真[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(06): 1160-1167.
- [9] 郭万金, 赵伍端, 利乾辉, 等. 基于集成概率模型的变阻抗机器人打磨力控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(12): 2356-2366+2374.
- [10] 邓建新, 袁邦颐, 黄秋林, 等. 基于快速终端滑模的机器人柔顺磨抛阻抗控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 79-83.
- [11] 聂佳伟, 辛鹏飞, 荣吉利, 等. 空间机械臂辅助深层采样阻抗控制策略[J]. 宇航学报, 2022, 43(05): 580-592.
- [12] 尹恒健, 倪受东. 擦玻璃机器人的自适应阻抗控制研究[J]. 机械设计与制造, 2022(07): 270-274.
- [13] 胡河宇, 曹建福, 曹晔, 等. 建筑幕墙安装机器人的位置/力混合控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(01): 51-60.
- [14] 朱安, 陈力. 空间机器人在轨双臂辅助航天器对接力/位置嵌套双层滑模阻抗控制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(22): 3266-3278.
- [15] 曾令城, 李明富, 杨真真, 等. 基于先验速度修正的工业机器人曲面跟踪柔顺控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(01): 41-51.