

机器人的力控制技术研究及应用进展

赵宗圣, 程金石*, 吴泓达, 田思灿, 张 涵

大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年8月30日; 录用日期: 2023年11月3日; 发布日期: 2023年11月13日

摘 要

力控制目的是使机器人在工作过程中具有柔顺性。作为机器人运动控制的关键环节, 力控制技术研究在机器人领域占有重要的地位。本文系统的总结了机器人力控制领域提出的经典理论和研究成果, 首先, 针对四种典型力控制方法的基本原理、特点以及国内外研究进展进行了归纳和总结; 其次, 介绍了力控制技术在工业、航空航天、医疗等领域应用的典型案例; 最后, 对力控制技术在机器人控制领域中的发展方向进行了展望。

关键词

力控制技术, 机器人控制, 柔顺性, 运动控制

Research and Application Progress of Robot Force Control Technology

Zongsheng Zhao, Jinshi Cheng*, Hongda Wu, Sican Tian, Han Zhang

School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

Received: Aug. 30th, 2023; accepted: Nov. 3rd, 2023; published: Nov. 13th, 2023

Abstract

The purpose of force control is to make the robot have the compliance in the working process. As the key link of robot motion control, force control technology plays an important role in the field of robot. This paper systematically summarizes the classical theories and research achievements in the field of robot force control. Firstly, the basic principles, characteristics and research progress of the four typical force control methods are summarized; secondly, typical cases of application of force control technology in industry, aerospace, medical and other fields are introduced; finally, the development direction of force control technology in the field of robot control is prospected.

*通讯作者。

文章引用: 赵宗圣, 程金石, 吴泓达, 田思灿, 张涵. 机器人的力控制技术研究及应用进展[J]. 人工智能与机器人研究, 2023, 12(4): 292-300. DOI: 10.12677/airr.2023.124032

Keywords

Force Control Technology, Robot Control, Compliance, Motion Control

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机器人在执行运动控制过程中时常需要通过调整自身动作对外界环境做出响应, 这种使机器人顺应环境的能力称为柔顺性(Compliance)。机器人的柔顺性控制可分为两类: 被动柔顺控制(机器人采用弹簧、阻尼器等辅助柔顺机构来顺应环境的接触)和主动柔顺控制(机器人利用力传感器采集的信号作为反馈, 设计控制策略主动控制作用力[1])。被动柔顺控制一般要借助机构实现, 导致自身结构复杂且控制精度较低。主动柔顺控制除必要的传感和作业装置外不依赖特定的机构, 并可通过优化控制方法提高控制精度, 因而成为机器人柔顺性控制的主要研究方向。

根据末端执行器和作业对象的接触情况, 机器人的工作状态可分为接触式和非接触式。在非接触式作业场合(如码垛搬运、操作目标物等)仅依靠位置控制即可完成相应工作。在接触式作业场合(如抛磨、装配、擦洗等), 机器人末端轨迹微小的偏差将会导致与接触面脱离或产生过大的作用力, 从而无法完成作业任务, 甚至损毁工件造成不可估量的损失。可见, 机器人在接触式作业场合不仅需要精准的位置控制, 而且还需要进行力控制。力控制技术属于主动柔顺控制, 在机器人控制领域有着重要应用。

2. 力控制技术的分类

最早的力控制研究可以追溯到上世纪 60 年代, 美国 MIT 实验室针对具有放射性危害的试验环境, 在机械臂末端安装力反馈装置实现力操控。自上世纪 80 年代以来, 随着计算机、微电子和网络技术的进步, 机器人力控制技术得到快速发展, 形成了以下四种典型的力控制方法。

2.1. 阻抗控制

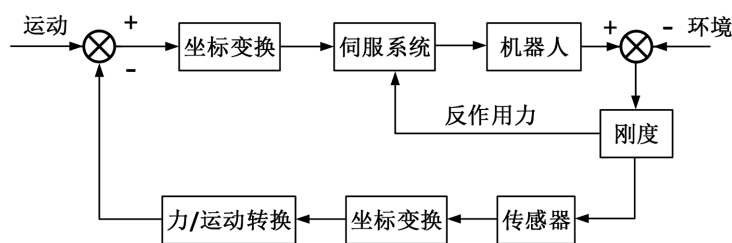


Figure 1. Impedance control schematic diagram

图 1. 阻抗控制原理图

阻抗控制(Impedance Control)通过分析末端位置与环境接触力之间的阻抗关系间接实现力控制。该方法由 Hogan 在 1985 年提出并将其应用于机械臂力控制研究。

阻抗控制原理见图 1。首先建立末端位置或速度与作用力之间的动态响应关系, 当期望位置信号传递给伺服系统使机器人执行运动, 此时与外界环境接触产生作用力, 通过传感器采集力信号结合上述阻

抗关系对机械臂运动参数进行调整，一方面将力反馈信号转换为位置调整量，另一方面将力反馈信号转换为速度修正量，两者结合使力和位置满足理想的动态关系，即实现阻抗控制。

2.2. 力/位混合控制

力/位混合控制(Hybrid force/position control)是指机器人在某些自由度上实现力控制，余下自由度进行位置控制，即同时控制力和位置的方式。1981年，Raibert结合Mason等人的思想首次出力/位混合控制[2]。

力/位混合控制原理见图2，在笛卡尔坐标系下将机器人空间运动分解为力和位置子空间，系统的输入信号为力和位置实际值与期望值的偏差，通过坐标变换将空间上任意方向的力和位置分配到各关节控制器，力和位置控制器两者控制量之和为关节控制总量，从而完成机器人期望的运动控制。

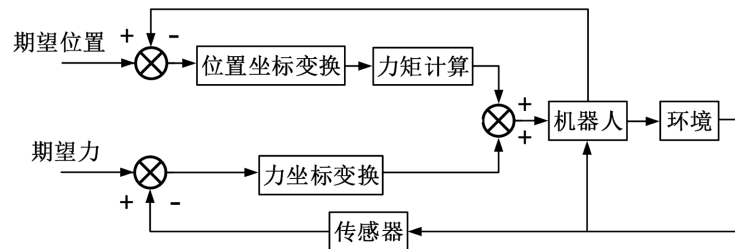


Figure 2. Hybrid force/position control schematic diagram

图2. 力/位混合控制原理图

2.3. 自适应控制

自适应控制(Adaptive Control)本质是在经典控制理论基础上引入自适应策略实现对未知参数的估计。1990年，Chung Jack等人进行的自适应目标插孔实验最具有代表性[3]。

自适应控制原理见图3，机器人实际轨迹通过滤波器与预设期望轨迹进行比对，输出修正信号传递给控制器，若采用间接控制方法，通过参数估计器对力控制系统中的未知参数进行估计，设计自适应律输出控制器参数进而完成机器人控制过程；若采用直接控制方法，则通过自适应机制调整控制增益，使跟踪误差向量收敛为零从而达到控制目的。

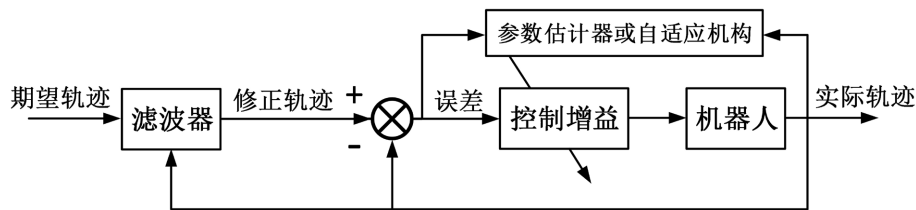


Figure 3. Adaptive control schematic diagram

图3. 自适应控制原理图

2.4. 鲁棒控制

鲁棒控制(Robust Control)是有效解决控制过程中不确定因素的控制方法之一，基于不确定性的描述参数和标称系统的数学模型设计结构固定不变的控制器，当机器人与环境之间存在模型误差时，可以维持系统稳定并达到所需动态性能。1994年，Man等[4]提出的鲁棒多输入多输出(MIMO)终端滑膜控制方法对机器人鲁棒控制的研究具有重要意义。

鲁棒控制原理见图 4，实际轨迹与期望轨迹偏差以矢量的形式传递给鲁棒控制器，控制器由鲁棒控制率和反馈控制律组成，鲁棒控制律通常采用李雅普诺夫理论(Lyapunov Theory)获得，反馈控制律通常为 PI、PD、PID 控制等[5]，根据控制策略在线调整控制器参数和系统输入信号，最终将输出信号传递给执行机构实现机器人控制目标。

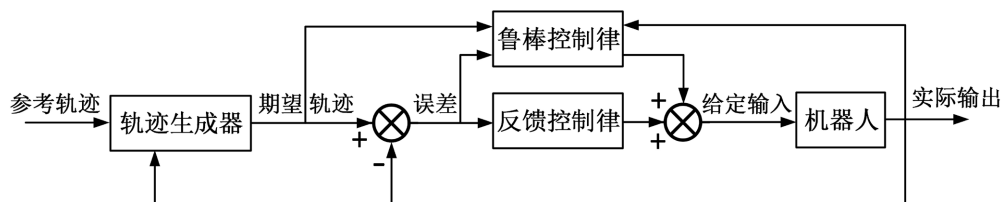


Figure 4. Robust control schematic diagram

图 4. 鲁棒控制原理图

上述内容为力控制发展历程中常见的控制方法，机器人单纯的位置控制发展到力控制阶段，再到现如今各种智能力控制方法的出现，为机器人技术研究起到积极的推动作用，各种控制方法的特点及优劣总结如表 1 所示。

Table 1. Characteristics and advantages and disadvantages of typical force control methods

表 1. 典型力控制方法特点及优劣

控制方法	控制变量	应用理论	优点	缺点	
阻抗控制	基本阻抗控制	位置和速度误差、接触力	阻抗原理	抗干扰能力较强，简化复杂的运算过程	需要建立精确的阻抗参数
	混合阻抗控制	速度和力误差	阻抗原理	系统稳定性强，具有较好的位置和力跟踪性能	控制精度依赖于阻抗参数
力/混合控制	力误差、速度误差	PI、PD 控制	理论上可直接对末端期望力和位置进行控制	依赖环境，控制器频繁切换，运算复杂	
自适应控制	直接自适应控制	参数误差	参数估计	控制器参数可直接调控	需要接触环境模型和精确的机械臂参数，实现困难
	间接自适应控制	跟踪误差	自适应原理	不需要精确的数学模型，有较强的容错能力	仅适用关节少，模型参数变化缓慢的场合
鲁棒控制	跟踪误差	H_∞ 控制 滑膜控制	无需自适应算法，运算速度快，实时性好	系统非最优状态，稳态精度差，具有较强的保守性	

3. 力控制技术研究进展

3.1. 阻抗控制研究进展

在阻抗控制方法的研究中，Miyamura 和 Kimura [6]在 Hogan 阻抗理论的基础上提出建立精确的动力学模型方法，该方法规避了力信号反馈检测的过程且提高了控制的稳定性，但动力学模型建立的过程较为复杂。同样在解决力反馈信号获取的问题上，Huang 等[7]通过分析机器人关节电机电流和执行器扭矩之间的矩阵映射函数关系，利用电流反馈驱动控制器实现力控制，因此在设计过程中无需安装力传感器从而降低了控制成本。为使机器人对任何环境刚度的不确定性具有更强的适应能力，诸多学者开始致力于变阻抗力控制研究，其中，Duan 等[8]提出一种新型变阻抗力跟踪控制方法，首次实现了基于跟踪误差在线调整阻抗参数的变阻抗控制，进一步证明变阻抗控制的稳定性和收敛性，通过实验证明该方法

比恒力阻抗控制具有更好的力跟踪性能。此外,阻抗控制方法在机械臂抓取物体的实验中,潘东等[9]设计了一种基于位置的阻抗控制方法用于机械臂抓取目标实验,通过改进关节位置闭环控制将抓捕过程等效转化为弹簧阻尼二阶系统,这种基于位置的阻抗控制方法在避免碰撞的前提下实现机械臂柔顺控制。在控制器阻抗改进方面,Wang等[10]设计了一种基于扭曲终端滑模控制的阻抗控制器,阻抗误差在有限时间内收敛以保证系统快速达到期望的阻抗动态,实验结果表明该控制器有效解决了系统抖振问题。

3.2. 力/位混合控制研究进展

在力/位混合控制方法的研究中,Mills [11]进行的工作与Raibert、Craig相类似,在笛卡尔坐标系下将机器人空间运动进行分解,设计单独的控制器分别对机器人自由方向和约束方向上的运动进行直接控制,但控制器频繁切换过程中产生系统震荡从而影响控制精度。为解决上述问题,Anderson和Spong提出力/位混合控制和阻抗控制相结合的方法[12],因控制模式切换引起的系统震荡现象得到有效的抑制。后续学者开始将模糊逻辑控制算法引入机器人力/位混合控制器的设计用于系统不确定性问题,Zhang等[13]提出基于模糊PID控制的力/位混合控制策略,通过设计速度环和模糊PID控制器提高了磨削机器人系统的抗干扰能力。Wang等[14]将模糊控制算法引入力/位混合控制,用于补偿系统不确定性引起的偏差,仿真验证该方法有效提高了控制精度。Kumar和Rani [15]提出一种基于神经网络的力/位置混合控制方案,结合神经网络自适应强的特点使机械手关节在各个方向的跟踪误差渐近收敛于零,证明该方案的有效性。在结合多种控制方法上,殷文喆等[16]结合自适应阻抗与导纳控制方法优点提出并建立了一种基于分段自适应的力/位混合控制方法,通过仿真控制使接触力实现较小的超调量和动态偏差。尤子成等[17]提出一种新型鲁棒轨迹跟踪力/位混合控制策略用于打磨机器人控制,力位控制系统分别采用PID控制和基于神经网络的鲁棒控制方法,有效抑制打磨过程中非线性振动问题且具备较好的轨迹跟踪效果。

3.3. 自适应控制研究进展

自适应控制方法的研究目的是为了有效解决系统存在的不确定性问题,Suba等[18]针对模型参数不确定的四旋翼飞行器改进自适应控制器,将飞行器位置和姿态动力学分别作为系统的外环和内环,基于Lyapunov理论推导出系统自适应率并对内外环动态误差进行稳定性分析,通过对不同跟踪场景的仿真验证了该控制器的可行性。Tutsoy等[19]基于混沌动力学不可预测的实时应用特性对欠驱动型机械臂进行自适应控制,并且开发出一种混沌控制器在模型未知的动态环境条件下进行实验,验证了该自适应控制方案可行性。在此之后,郑先杰等[20]提出一种基于无模型条件下的自适应控制算法,通过连续型机械臂仿真验证,该方法在系统模型和控制器参数不确定的情况下,达到了良好的自适应控制效果。后续学者展开将算法和神经网络控制与自适应方法相结合的研究,并在机器人的力控制领域取得了显著的成果。李振等[21]在基于环境估计的自适应控制方法的研究中,通过遗传算法对磨抛加工机器人位置误差和力误差进行补偿,实验结果显示该方法使接触稳态力的跟踪误差降低了85.7%,有效的提高了加工精度且具有良好的稳定性。王邢波等[22]设计了一种基于径向基函数神经网络(RBFNN)的自适应控制系统,提高了灵巧手指的轨迹跟踪性能和对接触力的自适应能力。

3.4. 鲁棒控制研究进展

在鲁棒控制方法的研究中,1981年,加拿大学者Zames提出以控制系统中某些信号间传递函数的 H_{∞} 范数作为优化系统的性能指标,而后Doyle提出一种用于检验系统鲁棒性的方法为结构奇异值理论, H_{∞} 鲁棒控制理论因此得到快速发展,先后经历了从频域到时域、线性系统到非线性系统、单目标到多目标

控制等过程[23]。在控制器改进方面, Aghabalaie 等[24]改进非线性鲁棒控制器应用于双足行走机器人, 将机器人支撑阶段的控制问题等效转化为卡车运动的跟踪控制问题, 仿真验证该方法可以实现机器人执行特定步态模式的灵活性和多功能性, 该研究对双足机器人行走具有重要意义。在控制方法优化方面, 中国航空工业集团研究所张琪等[25]在发明专利中提出一种基于奇异摄动的柔性机械臂时标分离鲁棒控制方法, 对柔性机械臂动力学模型进行刚柔模态分离处理, 该方法实现机械臂关节角对期望指令的跟踪和弹性模态的抑制。张泽坤等[26]提出一种高精度闭环鲁棒控制方法, 采用 COMAU 工业机器人进行实验, 结果表明该方法有效提高了机器人位置控制精度和对外界扰动的抵抗能力。在同其他控制理论结合方面, Peng 等[27]提出鲁棒混合控制器和力矩控制相结合的改进控制方案, 混合控制器由 H_∞ 最优控制和变结构控制(VSC)方法组成, H_∞ 控制提高了移动机器人的跟踪性能, 通过仿真验证了鲁棒混合跟踪控制方法的有效性。楚雪平等[28]基于神经网络改进设计鲁棒控制律, 通过神经网络估计干扰并对不确定性因素进行补偿, 有效提高了双臂机器人的控制精度。

4. 力控制技术应用情况

随着力控制技术不断成熟, 诸多控制方法在工业、航空航天和医疗等领域中的专用机器人上发挥了重要作用。

在工业领域中, 2018 年, Jung [29]在多自由度工业机器人运动控制系统的研究中提出了一种基于 RBF 神经网络的滑膜控制方法, 通过神经网络补偿器处理机械臂系统中的不确定性问题, 提高了系统的稳定性和跟踪控制能力。2019 年, Xu 等[30]针对磨削机器人表面加工质量问题提出将力/位混合控制与 PI/PD 控制方法相结合应用于机器人砂带磨削中, 通过工件和发动机叶片磨削试验, 验证了该方法的实用性和有效性。在相同领域, 丁毓峰等[31]改进抛光机器人的力/位控制方法, 同时提出对评估抛光系统刚度和用于 PI 参数调整的自适应控制算法, 在复杂曲面零件上实现稳定的力控制和精确的位置控制。2020 年, 董建伟等[32]在工业机器人变阻抗控制问题的研究中, 提出一种基于速度的变阻抗自适应交互控制方法, 根据交互力的跟踪误差对控制器的阻尼参数进行自适应调整, 有效降低了系统的跟踪误差。

在航空领域中, 2018 年, 吴锡洲[33]针对遥操作机器人机电时延影响运动控制稳定性的问题, 采用模糊滑膜控制方法对空间机械臂进行多轴协调控制, 设计双边自适应控制器对机械臂主从两端进行控制, 该方案有效的解决了上述问题且提高了机械臂的动态性能。机器人在航空捕获目标飞行物研究方面, 2020 年, Ai 等[34]提出一种无源性力/位置自抗扰控制方法用于双臂机器人抓捕目标控制, 利用扩张状态观测器对扰动进行估计, 实现机器人与抓捕目标之间内力和位置的协调控制。2022 年, 姚勇等[35]在绳驱动空中机器人的研究中提出一种不基于模型的鲁棒控制策略, 结合超螺旋算子和非奇异终端滑膜控制方法保证系统的快速收敛和高精度跟踪性能, 利用线型扩张观测器对干扰进行估计和补偿, 使系统获得较强的鲁棒性。

在医疗领域中, 2016 年, Beretta 等[36]改进了基于力矩的阻抗控制方法, 提出基于力的反馈增强控制和变阻尼控制方法应用于神经外科开颅手术机器人, 增强了机器人的控制精度且有效解决了手部震颤问题, 辅助医生实施手术从而使工作量减少约 60%。2021 年, Zheng 等[37]在骨折复位机器人的研究中, 针对机器人阻抗控制系统中各种不确定性和非线性问题, 提出了一种模糊自适应滑膜阻抗控制方法以提高手术精度和安全性, 使稳态位置精度和力精度分别达到了 -0.733 mm 和 -2.12 N , 该方法对骨折复位机器人的研究具有重要意义。2022 年, Guo 等[38]提出了一种基于力/位置评估的辅助控制策略用于人体上肢外骨骼康复机器人, 设计模糊自适应阻抗控制器确定康复训练中所需辅助力的大小, 同时利用神经网络估计环路保证外骨骼跟踪误差在变量约束范围内保持有界, 通过 Matlab/Simulink 仿真验证所提出控制器的有效性。

5. 总结与展望

前面所述表明了力控制技术在机器人控制领域的重要地位。虽然目前的研究成果可以满足一定条件下对机器人柔顺性控制的需求，但实现任意作业环境下的自适应和具有自我优化能力的智能控制将会成为未来的发展趋势。智能控制是一门融合交叉多种学科的新兴技术，随着计算机科学、模糊数学、耗散结构学、智能模拟、控制论等学科的发展，智能控制在机器人力控制研究领域将会有越来越大的发展空间。相关发展方向将体现在以下几个方面：

(1) 智能控制方法创新

有效控制方法的设计是实现机器人理想控制的关键，由于单一控制方法存在一定的局限性，目前多种控制理论相互结合实现对机器人运动控制的方法较为常见，例如结合两种控制方法优势所形成的混合阻抗控制、自适应鲁棒控制等；再者利用神经网络自适应性、自学习的优势与其他控制方法结合有效求解模型中的未知参数。根据被控对象不同的特点，结合多种控制理论选择最优的控制方案实现机器人智能控制从而保证机器人在不同环境下具有良好的工作性能，当前在该领域已进行诸多有益的探索，因此智能控制理论深入结合是未来研究的趋势。

(2) 智能算法应用创新

智能算法与传统控制方法相结合可以弥补控制缺陷，强化控制系统的学习能力且增强传统控制方法的普适性，例如将模糊逻辑控制算法引入传统的力控制算法对系统状态进行有针对性的推理和判断形成模糊阻抗控制、模糊自适应控制；将遗传算法引入自适应控制用于调整参数从而使系统获得较强的鲁棒性；另外，粒子群和蚁群优化算法均具有高效的搜索能力，其通用性特点便于与其他算法结合用于求解目标优化问题。引入上述优化算法可以最大程度发挥系统控制性能从而满足机器人工作所需的精度及稳定性要求，之后在智能控制算法方面的研究还应继续深入。

(3) 控制器优化改进

控制器作为机器人操控的核心部件对机器人的性能起着决定性作用，通过系统控制算法的处理方式将控制器分为串行和并行两种结构类型[39]。采用串行处理结构的控制器，计算负担重且实时性较差，因此当机器人在运行中受到干扰时很难达到要求的精度指标；相比之下，并行处理结构能有效提高计算速度从而满足机器人控制的实时性要求。此外，优化改进控制器采用开放式系统结构以及合理的模块化设计便于后期安装与维护，同时使其适用于不用类型的机器人控制从而缩短控制器开发周期与成本。

(4) 应用领域不断拓宽

力控制技术的发展促进了机器人在工业、航天、医疗等领域的应用进程，未来搭载智能控制技术的机器人在各领域中将会有更为广阔的发展前景。

参考文献

- [1] Kim, H.S., Kim, I.M., Cho, C.N., *et al.* (2012) Safe Joint Module for Safe Robot Arm Based on Passive and Active Compliance Method. *Mechatronics*, **22**, 1023-1030. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.08.007>
- [2] 汪坤. 多关节串联工业机器人的力位柔顺控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [3] Chung, J.C.H. and Leininger, G.G. (1990) Task-Level Adaptive Hybrid Manipulator Control. *International Journal of Robotics Research*, **9**, 63-73. <https://doi.org/10.1177/027836499000900304>
- [4] 穆朝絮, 张勇, 余瑶, 等. 基于自适应动态规划的航空航天飞行器鲁棒控制研究综述[J]. *空间控制技术与应用*, 2019, 45(4): 71-79.
- [5] 李超. 机械臂末端力/位置混合控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [6] Miyamura, A. and Kimura, H. (2002) Stability of Feedback Error Learning Scheme. *Systems & Control Letters*, **45**, 303-316. [https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(01\)00191-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(01)00191-8)

- [7] Huang, S.J., Liu, Y.C. and Hsiang, S.H. (2013) Robotic End-Effector Impedance Control without Expensive Torque/Force Sensor. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, **7**, 1446-1453.
- [8] Duan, J., Gan, Y., Chen, M., et al. (2018) Adaptive Variable Impedance Control for Dynamic Contact Force Tracking in Uncertain Environment. *Robotics and Autonomous Systems*, **102**, 54-65.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.01.009>
- [9] 潘冬, 李大明, 胡成威, 等. 一种基于位置阻抗的机臂抓飞行器控制方法[J]. 载人航天, 2018, 24(3): 308-312.
- [10] Wang, Y., Sun, T. and Yang, J. (2022) Super-Twisting Nonsingular Terminal Sliding Mode-Based Robust Impedance Control of Robots. *Complexity*, **2022**, Article ID: 9263699. <https://doi.org/10.1155/2022/9263699>
- [11] Mills, J.K. and Goldenberg, A.A. (1989) Force and Position Control of Manipulators during Constrained Motion Tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **5**, 30-46. <https://doi.org/10.1109/70.88015>
- [12] 李二超. 未确定环境下机器人力控制技术[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [13] Zhang, H., Li, L., Zhao, J., et al. (2021) The Hybrid Force/Position Anti-Disturbance Control Strategy for Robot Abrasive Belt Grinding of Aviation Blade Base on Fuzzy PID Control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **114**, 3645-3656. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07122-2>
- [14] Wang, Z., Zou, L., Su, X., et al. (2021) Hybrid Force/Position Control in Workspace of Robotic Manipulator in Uncertain Environments Based on Adaptive Fuzzy Control. *Robotics and Autonomous Systems*, **145**, Article ID: 103870. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103870>
- [15] Kumar, N. and Rani, M. (2021) Neural Network-Based Hybrid Force/Position Control of Constrained Reconfigurable Manipulators. *Neurocomputing*, **420**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.09.009>
- [16] 殷文喆, 练达芃, 李凯悦, 等. 基于分段自适应的机械臂力/位混合控制[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-9. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0955>, 2023-09-13.
- [17] 尤子成, 王志刚, 郭宇飞. 振动基柔顺驱动打磨机器人的力/位混合控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(15): 8-14.
- [18] Suba, E., Turker, T. and Akgün, O. (2018) A Lyapunov Based Model Reference Adaptive Control of a Quadrotor. 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, 30 November-2 December 2017, 732-736.
- [19] Tutsoy, O. and Barkana, D.E. (2021) Model Free Adaptive Control of the Under-Actuated Robot Manipulator with the Chaotic Dynamics. *ISA Transactions*, **118**, 106-115.
- [20] 郑先杰, 丁萌, 武海雷, 等. 线驱连续型机械臂无模型自适应控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 116-121.
- [21] 李振, 赵欢, 王辉, 等. 机器人磨抛加工接触稳态自适应力跟踪研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 10.
- [22] 王邢波, 陆闯, 张岩. 基于 RBF 神经网络的灵巧手指自适应跟踪控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, 579(5): 75-78.
- [23] 顾振宇, 李斌. 柔性机械臂系统双时标模型的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 机械设计与制造, 2023(3): 58-62.
- [24] Aghabalaie, P., Hosseinzadeh, M., Talebi, H.A., et al. (2010) Nonlinear Robust Control of a Biped Robot. 2010 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, 4-7 July 2010, 1907-1912. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637535>
- [25] 张琪, 王堆, 王延延. 基于奇异摄动的柔性机械臂时标分离鲁棒控制方法[P]. 中国专利, CN201811581068.8 2023-09-13.
- [26] 张泽坤, 国凯, 孙杰. 基于扰动观测器的工业机器人高精度闭环鲁棒控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 62-70.
- [27] Peng, J., Ma, X., Meng, F., et al. (2017) Robust Quadratic Stabilization Tracking Control for Mobile Robot with Nonholonomic Constraint. 2017 *International Conference on Robotics and Automation Sciences*, Hong Kong, 26-29 August 2017, 11-15. <https://doi.org/10.1109/ICRAS.2017.8071907>
- [28] 楚雪平, 王晓玲. 采用神经网络的工业机器人双臂鲁棒控制方法[J]. 现代制造工程, 2022, No. 506(11): 41-47.
- [29] Jung, S. (2018) Improvement of Tracking Control of a Sliding Mode Controller for Robot Manipulators by a Neural Network. *International Journal of Control, Automation and Systems*, **16**, 937-943. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0186-z>
- [30] Xu, X., Zhu, D., Zhang, H., et al. (2019) Application of Novel Force Control Strategies to Enhance Robotic Abrasive Belt Grinding Quality of Aero-Engine Blades. *Chinese Journal of Aeronautics*, **32**, 2368-2382. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.01.023>
- [31] 丁毓峰, 闵新普. 曲面零件抛光机器人的力/位混合控制方法[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 817-825.
- [32] Dong, J. and Xu, J. (2020) Physical Human-Robot Interaction Force Control Method Based on Adaptive Variable Im-

- pedance. *Journal of the Franklin Institute*, **357**, 7864-7878. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.06.007>
- [33] 吴锡洲. 基于力协调的空间机械臂主从控制系统设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [34] Haiping, A., Li, C. and Yu, X.Y. (2020) Passivity-Based Force/Position Active Disturbance Rejection Control of Dual-Arm Space Robot Clamping Capture Spacecraft. *IFTOMM Conference on Mechanisms, Transmissions and Applications*, Dalian, 9-11 October 2019, 397-408.
- [35] 姚勇, 丁力, 王尧尧. 考虑关节柔性的绳驱动空中机械臂关节空间鲁棒控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 971-979.
- [36] Beretta, E., Nessi, F., Ferrigno, G., *et al.* (2016) Enhanced Torque-Based Impedance Control to Assist Brain Targeting during Open-Skull Neurosurgery: A Feasibility Study. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **12**, 326-341. <https://doi.org/10.1002/rcs.1690>
- [37] Zheng, G., Lei, J., Hu, L., *et al.* (2021) Fuzzy Adaptive Sliding Mode Impedance Control of Fracture Reduction Robot. *IEEE Access*, **9**, 113653-113665. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3099692>
- [38] Guo, Y., Wang, H., Tian, Y., *et al.* (2022) Position/Force Evaluation-Based Assist-as-Needed Control Strategy Design for Upper Limb Rehabilitation Exoskeleton. *Neural Computing & Applications*, **34**, 13075-13090. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07180-x>
- [39] 程俊, 刘滨. 基于数控系统的桁架机械手并行控制器开发[J]. *机床与液压*, 2021, 49(10): 108-112.