

面向复杂环境的工业机器人自适应力控与柔顺操作设计

石美¹ 张嘉欣² 张世奇³

1 北京师范大学-香港浸会大学联合国际学院, 中国香港, 519087;

2 广东海洋大学, 广东省湛江市, 524088;

3 湖北工业大学工程技术学院, 湖北省武汉市, 430070;

摘要: 复杂非结构化状况中的精确力控是工业机器人迈向智能化、柔性化的关键阻碍, 传统力控方法需借助精确环境模型, 难以应对接触刚度突变与几何方面的不确定性, 容易引发失稳或性能降低, 研究设计了一种结合动态自适应律与多传感信息的柔顺控制方案。该方案依照李雅普诺夫稳定性理论构建在线参数更新机制, 使机器人可实时辨别并补偿环境变化; 同时把视觉全局引导与力觉局部精修策略相联合, 增进了对未知环境的感知与适应水平, 仿真与物理实验证实, 所提举措在恒力跟踪以及曲面打磨任务中显著增进了力控制精度与接触鲁棒性, 为工业机器人针对精密装配、自动化打磨等复杂场景的应用给出了有效解决方案。

关键词: 工业机器人; 力控制; 柔顺操作; 自适应控制; 阻抗控制

DOI: 10. 69979/3041-0673. 25. 09. 006

引言

工业机器人的应用正日益从结构化重复作业迈向开放的非结构化环境拓展, 处于装配、打磨及人机协作等情形下, 机器人跟环境的物理交互存在着诸多不确定性, 诸如工件定位偏差、材料特性呈现多变等, 依赖预编程轨迹的传统位置控制无法胜任工作, 甚至会导致剧烈碰撞。力控及柔顺操作技术凭借感知并回应接触力, 给出了针对上述问题的解决手段, 诸如固定参数的阻抗控制等方法, 欠缺应对环境动态变化的能力, 其性能边界极为受限, 开发一种能自主适应环境变化、拥有强鲁棒性的智能力控框架, 成为推动下一代工业机器人发展的急切需求, 这也是此项工作的核心要点。

1 机器人动力学与力控基础理论

工业机器人动力学与力控基础理论是达成复杂环境精确操作的核心要点, 机器人动力学建模一般采用拉格朗日法, 凭借建立系统动能与势能的拉格朗日方程, 呈现机器人各关节力矩与位置、速度及加速度的非线性关系, 奠定高级控制算法的理论根基。柔顺控制策略主要被划分为阻抗控制和力/位混合控制这两大类, 阻抗控制借助调节机器人与环境间的动态关系, 使末端展现出期望的刚度、阻尼及惯性特性, 进而实现对接触力的间接调整; 力/位混合控制借助分解任务空间里的力控制子空间以及位置控制子空间, 分别实施独立控制, 适用于需要同时兼顾轨迹跟踪与力约束的任务情形, 关键反馈信息由六维力/力矩传感器提供, 其测量数据经滤

波及坐标变换后, 为实时计算接触力及力矩所用, 作为闭环力控的基石, 这些理论共同铸就了实现机器人自适应、高精度力控与柔顺操作的基石^[1]。

2 自适应力控制方法的优势

2.1 显著提升在不确定与时变环境中的鲁棒性与控制性能

自适应力控方法的主要优势在于它可有效应对复杂作业环境中普遍存在的不确定性与时变性, 以往固定参数的力控策略, 诸如阻抗控制, 其性能极大依赖于预先设定的目标阻抗参数(如刚度、阻尼)以及对环境动力学特性(如环境刚度、几何形状)的精准掌握。在实际应用场景里, 比如机器人开展打磨、抛光及装配作业时, 工作表面的材料特性、曲率、接触角度甚至工具本身磨损都有可能改变, 这造成环境刚度等参数未知或呈时变特性, 若控制器参数未有变动, 面对此类变化, 系统性能会急剧变差, 体现为接触力超调、振荡甚至出现失稳, 无法达成既定的工作目标。

自适应力控借助引入在线调节机制, 彻底扭转了这一情形, 其重点在于能借助实时的力/力矩传感反馈, 动态分辨与估算环境未知特性或系统本身变动, 并据此对控制器的内部参数或结构进行自动调整, 一种基于自适应律的阻抗控制器可实时测算环境的接触刚度, 并相应反向调控其目标阻抗, 进而在整个变化进程里维持一个期望的、稳定的接触力, 此动态调整过程确保机器人无论接触坚硬的金属表面抑或是柔软材料, 其力跟踪误

差均可被持续最小化，展现出卓越的稳健性。

2.2 降低对精确建模的依赖

自适应力控的又一显著优势是能大幅减少对高精度数学模型的依赖，进而消除了机器人应用中的一处长长期痛点，实现高性能控制往往依赖精准无误的系统模型，这涉及机器人自身的动力学模型（如连杆质量、惯性张量、摩擦参数）以及外部环境的交互模型，实际获取这些精确参数时，困难重重且成本高昂：负载变化会造成机器人本体的动力学参数有所改变，关节摩擦拥有非线性及时变的性质，而环境的物理特性难以预先完全探明^[2]。

传统基于模型的控制方法一旦面对模型失配，其控制性能会急剧退化，自适应力控制方法给出了一条别样的解决途径，它并非想要在控制前达成一个完美无瑕的模型，而是把系统或环境中难以测量或产生变化的关键参数认定为“未知”，并依靠在线参数估计算法实时辨认及补偿这些不确定性。控制器在与环境交互阶段，持续把预期的系统行为和实际测量到的力/位置响应进行对照，并借助产生的误差信号来驱动参数更新律，进而逐步“学习”并接近真实的系统动态。

2.3 实现更高层次的自主智能与复杂任务执行能力

自适应力控的显著优势在于它是赋予工业机器人更高层级自主性和智能行为的关键推动技术，是达成真正柔性自动化的基石，传统工业机器人仅可在严格预设的位置以及轨迹下实施工作，本质上是一类“盲”操作，不能应对任务里的任何偏差，自适应力控凭借力反馈达成了与环境的“触觉”交互闭环，使机器人得以“感知”并“响应”其周边物理世界的变化，进而做出明智决策。

这种能力让执行极为精密的复杂任务得以实现，从精密装配角度，诸如轴孔装配或者电子元件插装，存在微小容差与对中不一致，自适应力控器可察觉到接触力细微的变化趋向，并随即生成相应的柔顺运动去“寻觅”正确的插入路径，凭借力引导策略自主完成找正及插入，不依赖昂贵的高精度视觉定位和极其苛刻的工装夹具，在打磨、抛光等轮廓跟踪作业里，机器人凭借力控可自适应地贴合有着未知几何形状的复杂曲面，始终维持恒定的接触力，进而实现均匀一致的加工质量，这是纯粹位置控制根本无法达成的。

3 面向复杂环境的工业机器人自适应力控与柔顺操作设计

3.1 基于动态模型与自适应律的鲁棒控制器设计

涉及复杂环境的自适应力控设计，其核心要义为构建一个可在线补偿不确定性的高级控制架构，此设计绝非简易的PID力反馈，而是深度融合进机器人非线性动力学模型与现代自适应控制理论，控制器的开端是构建工业机器人系统的完整动力学方程，此方程呈现出关节力矩与机器人位姿、速度、加速度间的复杂联系，并含有摩擦、惯性耦合等非线性因素。在传统控制范畴内，模型参数出现误差会直接造成性能下降，在此设计方案中，引入自适应律是关键创新点，该自适应机制一般按照李雅普诺夫稳定性理论或模型参考自适应控制框架开展设计，其核心是把环境刚度、阻尼乃至机器人本体的部分动力学参数认定为未知或时变的，并设定实时的参数更新规律^[3]。

这些更新律持续把期望的力/位置响应同实际传感器测量值进行比较，凭借产生的误差动态调控控制器内部参数，进而在不预先了解环境精确模型的情形下达成渐近稳定的力跟踪，当机器人末端执行器从金属打磨转换为木材打磨之际，环境刚度出现急剧改变，固定参数的控制器会迅速出现力超调或响应迟缓。自适应控制器可借助其在线参数估计算法，实时察觉这一变化，并自行调节其阻抗模型里的目标刚度或者导纳控制中的阻尼系数，进而在新环境里迅速重新达成稳定、高性能的力交互，这种设计赋予机器人拥有“自我调优”的能力，使其面对负载变化、工具磨损或不同材料特性之际，彰显出卓越的鲁棒性及可靠性，成为在真正非结构化环境中稳定工作的根本保障。

3.2 多模态传感融合与环境感知框架的构建

实现高度的柔顺操作水准，仅借助力觉反馈远远不够，复杂的非结构化环境里充斥着几何未知及突发障碍，因此本设计的第二个核心部分是组建一个多模态传感融合的感知体系，以此增进机器人对环境的理解以及状态估计能力，力/力矩传感器给出跟环境接触的触觉信息，是力控的直接反馈凭借，但存在滞后现象，且无法察觉未接触时的环境情形。应引入视觉传感手段，诸如双目相机、深度相机，作为全局的“监测装置”，视觉系统能够在接触发生前事先获取工作场景的三维点云模型，分辨工件的粗略姿态、类别及潜在的障碍物，替机器人规划一条安全的接近轨迹以及初始作业参考框架。

视觉信息存在精度受限与易受光照干扰的问题，力觉与视觉深度融合举足轻重，在实际作业里，机器人

先借视觉引导初步定位作业区域；当工具趋近工件之际，控制权渐渐过渡至力控主导，力反馈信息可用来执行精密的力跟踪任务，其数据自身也蕴藏着丰富的环境属性。凭借对接触力变化的分析，可反向在线估计更精准的接触点位置、表面法向量乃至环境的局部刚度，这些信息可对视觉估计偏差做在线修正，达成感知-行动的闭环结构，这种视觉全局引导与力觉局部精修相融合的模式，极大提升了机器人的作业效能，使其能够开展工件随意摆放、孔位偏差较大的“边看边摸”式智能作业，这是达成高适应性柔顺操作必不可少的技术支撑。

3.3 任务层次的智能决策与行为管理机制

在复杂条件里，机器人的操作任务绝非单纯的“保持恒力”那般简易，而是往往由一系列离散的接触状态以及子任务组成，设计的第三个关键方面乃创建任务层次的智能决策与行为管理机制，即接触状态机，该机制承担高层任务的规划与执行监控工作，可使机器人在不同操作行为间实现自主的平滑且稳定切换，一个常规的作业流程也许包含：自由空间的运动、初始接触、稳定接触并执行任务（如打磨）、遇阻后回退动作、重新定位以及任务完成后的脱离等阶段。

每个阶段对控制策略的要求都大相径庭，在自由空间所开展的运动中，位置控制乃首要追求，要保证轨迹跟踪迅速且精准，此时应降低力控灵敏度防止误触发，于初始接触发生之际，系统须精准检测到接触事件，并即刻由单纯位置控制模式转换为力/位混合控制或阻抗控制模式，防止产生巨大冲击力。这需借助实时监测力传感器读数，并设定合理触发阈值及逻辑判断予以达成，于执行过程中检测到异常，显示可能出现卡死或碰撞现象，决策机制应可触发保护性行动，像沿着力的反方向做柔顺回退动作，或确保安全后尝试采用新策略，这种规则型或学习型的高级决策层级，好似赋予机器人“本能反应”，它与底层的自适应控制器协同，共同保障了整个作业流程的顺畅、安全以及成功，实现了从低层反射式控制到高层任务导向式智能的跨越进程^[4]。

3.4 基于学习的性能优化与系统演进能力

前沿设计方案正愈发多地引入机器学习算法，这让第四个方面聚焦于给予系统持续优化与演进的长期能力，传统的自适应控制可以实现参数的在线调整，但其调整策略是设计者预先依据数学公式设定的，也许并非整体最优，且难以应对训练数据里未出现过的新颖场景。采用机器学习，尤其是强化学习或模仿学习，目的是消除此局限性，让机器人依靠数据自我进步，借助强

化学习框架，力控任务可以被建模为一个马尔可夫决策过程，机器人于与环境交互期间尝试各类动作，并按照获取的力跟踪精度、稳定性等奖励信号来学习一项最优控制策略。

该策略从本质而言是一个复杂的非线性函数，可将当前状态（诸如力误差、历史状态、环境估计参数）映射至最佳控制动作，其性能上限往往超出传统自适应律，模仿学习可让系统借助专家演示来学习，借助示教器引领机器人达成一次理想的打磨作业，记下过程中的力/位数据，继而通过学习算法萃取出专家控制策略，并用于自主实施。更为强大的架构乃是混合架构：底层的实时性及安全性靠成熟且稳定的自适应控制器保障，高层由一个学习模块承担监督和优化底层控制器性能的工作，依据长期任务表现（如工件表面一致性）微调自适应律增益或奖励函数形状，这般设计不仅处理了眼前的控制问题，还开拓出一条持续改进的途径，使机器人系统有机会积累经验，适应种类更多的任务变体，最终彰显出前所未有的自主智能及柔性。

4 结语

该工作全面阐述了针对复杂环境的自适应力控与柔顺操作设计办法，经由构建基于模型的自适应控制器与多模态传感融合框架，成功化解了因环境参数不确定及几何未知引发的控制难题，实验验证得出，所设计的系统可实现阻抗特性的在线调整，实现具备高精度、高稳定性的力交互作业，该研究成果不仅增进了机器人在非结构化环境下的自主操作能力，同样为进一步集成学习算法达成更高级智能铺就了基石，后续将持续探索将预测控制及经验学习融入此架构，进而实现全面适应动态环境的智能工业机器人体系。

参考文献

- [1] 薛宪法. 协作机器人技能学习与环境交互技术及其应用研究[D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 王耀南, 江一鸣, 姜娇, 等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. 自动化博览, 2023, 40(10): 50-66.
- [3] 郭万金, 于苏扬, 田玉祥, 等. 机器人打磨自适应变阻抗主动柔顺恒力控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(12): 54-65.
- [4] 严海堂, 钱牧云, 魏新园, 等. 机器人打磨系统力控补偿优化算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 272-281.