

基于变刚度自适应导纳机制的机械臂恒力控制

周 波[†], 刘奕荣, 刘会昌, 宋伏阳, 房 芳, 甘亚辉

(东南大学 自动化学院 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 工业机械臂在诸如打磨抛光等接触式作业任务中对环境刚度信息存在一定的依赖性, 未知环境刚度信息将严重影响机器人的力位控制精度, 使得作业效果难以得到保证. 为解决环境信息不足或未知情况下的力/位置精确控制问题, 本文首先提出了一种新的自适应环境刚度在线估计方法, 针对时变的环境刚度进行实时估计, 由此预测生成后继的机械臂参考轨迹点, 随后提出了一种根据力跟踪误差实时调整末端工具手刚度系数的变刚度导纳恒力控制方法, 并结合李雅普诺夫稳定性理论给出了整体控制律的收敛性证明. 针对刚柔两种末端工具手和多种不同的曲面工件开展了实验研究, 并与传统PID控制方法和传统导纳控制方法进行了对比, 其结果表明本文所提出的复合控制方法可在不同工况条件下实现机器人运动过程中接触力的快速柔顺调节, 并获得4.55%以内的最优力控误差效果, 证明了本文所提出方法的有效性与可行性.

关键词: 机械臂; 打磨作业; 恒力控制; 自适应环境刚度; 变刚度导纳控制

引用格式: 周波, 刘奕荣, 刘会昌, 等. 基于变刚度自适应导纳机制的机械臂恒力控制. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1880 – 1888

DOI: 10.7641/CTA.2023.11208

Constant force control of manipulator based on variable stiffness adaptive admittance mechanism

ZHOU Bo[†], LIU Yi-rong, LIU Hui-chang, SONG Fu-yang, FANG Fang, GAN Ya-hui

(Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering of Ministry of Education, School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: The industrial manipulator has a certain dependence on the environmental stiffness information in contact tasks such as grinding and polishing. The unknown environmental stiffness information will seriously affect the force and position control accuracy of the robot, making it difficult to guarantee the operation effect. In order to solve the problem of precise force/position control in the case of insufficient or unknown environmental information, a new online estimation method of adaptive environment stiffness is firstly proposed in this paper, which can estimate the time-varying environmental stiffness in real time, and then predict and generate subsequent reference trajectory points of the manipulator. Then, a variable stiffness admittance constant force control method is proposed to adjust the stiffness coefficient of the end tool hand in real time according to the force tracking error, and the convergence proof of the overall control law is given combined with the Lyapunov stability theory. The experimental research is carried out on two kinds of rigid and flexible end tool hands and a variety of different surface workpieces, and compared with the traditional PID control method and the traditional admittance control method. The results show that the composite control method proposed in this paper can be used in different work. The rapid and compliant adjustment of the contact force during the robot motion is realized under the condition of the robot, and the optimal force control error effect within 4.55% is obtained, which proves the effectiveness and feasibility of the method proposed in this paper.

Key words: robot arm; grinding operation; constant force control; adaptive environmental stiffness; variable stiffness admittance control

Citation: ZHOU Bo, LIU Yirong, LIU Huichang, et al. Constant force control of manipulator based on variable stiffness adaptive admittance mechanism. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(10): 1880 – 1888

收稿日期: 2021–12–10; 录用日期: 2023–03–14.

[†]通信作者. E-mail: zhoubo@seu.edu.cn, Tel: +86 25-83794165.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(62073075), 江苏省科技成果转化资金项目(BA2017075)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62073075) and the Special Fund of Jiangsu Province for the Transformation of Scientific and Technological Achievements (BA2017075).

1 引言

在工业机器人的复杂接触式作业中, 末端工具手与作业环境的精确、稳定、柔顺力控是一个难点问题. 以常见的打磨抛光领域为例, 机器人打磨质量的关键在于如何保持机械手与接触作业面之间的恒力控制, 而作业曲面本身的形状复杂多变和表面材质的不均匀则会极大地影响机器人的作业效果. 恒力控制作为一种有效的解决手段, 可以保证机器人末端工具手与环境接触时作用力大小的均匀, 从而不仅能够避免机器人和末端工具因过载而损坏, 还能够实现末端工具对可变作业曲面的自适应接触力跟踪, 从而确保接触作业的控制精度和作业质量的一致性.

目前国内外对于机器人与环境接触力控制问题的研究主要分为力/位置混合控制与阻抗控制两大类. 其中, 力/位置混合控制的核心思想为根据力/扭矩的作用方向将控制分为力控制和位置控制两个独立的模块^[1-2]. 但在实际作业中, 机器人的力控制和位置控制往往是紧密耦合的^[3-4], 因此力/位混合控制无法对位置或力进行准确控制. 为解决这个难题, Hogan^[5]首先提出了阻抗(导纳)控制, 并以此建立机器人末端执行器与环境间的作用关系. 该方法具有较高的鲁棒性, 且由于阻抗控制建立了机器人与环境间的作用力和机器人位置偏差之间的动态关系, 因此可以通过调整机器人末端位移实现对作用力的控制^[6-8].

作为一种间接力控制方案, 环境刚度信息对阻抗控制方法的系统稳定性和控制精度有极大的影响^[9-10], 若环境刚度未知, 控制系统将会出现时滞、超调甚至发散的情况, 从而很难保证力跟踪的稳定性和准确性. 但在实际应用中很难掌握完备的环境信息, 因此, 解决环境信息不足或未知情况下的力/位置精确控制问题是当前机器人阻抗控制的一大难点. Long 等人^[11]估计了环境的形状和局部表面法线; Zhang 和 Khamesee^[12]利用自适应环境参数估计来计算参考轨迹, 并采用基于位置的阻抗控制器来主动跟踪参考力; Roveda 等^[13]通过扩展卡尔曼滤波器估计环境刚度, 并基于环境刚度估计值来调整控制增益, 从而实现了恒力控制. 朱国昕和程浩等^[14]提出利用基于作用力误差的扩展卡尔曼滤波器实现参考轨迹的预测. 另外, 一些学者利用模糊控制、神经网络以及模糊神经网络估计环境动力学模型参数^[15-17].

此外, 在阻抗控制中, 通常将机器人与环境的接触模型等效为弹簧-质量-阻尼系统, 系统中的等效质量、阻尼和刚度根据环境或机器人姿态的不同而不同^[4, 18], 若采用固定的等效参数将会导致部分工况下生成不合适的修正参考轨迹, 影响机器人作业过程的精度. 因此, 对阻抗控制参数的设置乃至自适应调整是力控应用的另一大难题. 为解决该问题, 可根据力

反馈信息动态调整阻抗参数. Kronander 和 Billard^[19]提出了一种与状态无关的稳定性约束, 该约束将刚度和刚度的时间导数与阻尼相关联, 进而首次证明了可变阻抗控制系统的稳定性; Jung 等^[20]提出了一种自适应阻抗控制, 其中为约束运动控制分配了零刚度, 以确保力跟踪误差值为零, 并对阻尼系数进行基于接触力误差的自适应调整, 使得系统对环境参数的不确定性具有一定的鲁棒性; Lee 和 Buss^[21]提出了一种根据跟踪力误差实时调整刚度系数以适应环境的变化, 从而实现期望力的跟踪; Xu 和 Fang^[22]根据专家经验建立阻抗控制中期望的输入、输出量间的模糊关系, 并由它来训练神经网络, 将训练好的神经网络应用于阻抗控制中实现阻抗模型参数在线调节; 王立玲^[23]设计并实现了阻抗控制增益模糊自调整方案, 根据机器人与环境的接触力大小实时调整控制器参数; 肖蒙^[24]提出了基于模糊迭代控制算法和基于概率动力学模型强化学习算法的力控方案, 解决了控制参数整定和实时调整困难的问题; Sun^[25]针对建模不确定性, 提出了一种基于近似动态逆的变阻抗控制方法.

与上述现有方法相比, 本文提出了一种新的结合了自适应环境刚度在线估计和变刚度自适应导纳控制两种策略的复合控制方法, 对环境刚度未知且时变, 以及传统阻抗方法适应性差的缺陷进行了同时处理. 其中针对环境刚度未知或难于获取的难题, 通过自适应在线估计方法用以估计时变环境刚度, 从而对规划的参考轨迹进行实时补偿; 针对导纳控制中固定刚度系数无法在全工况下获得高性能轨迹的情况, 本文提出了一种变刚度导纳控制方法, 即刚度系数在系统运行过程中随跟踪误差可实现实时调整, 以保证输出轨迹的合理性.

2 系统模型

为了建立机器人与环境的接触模型, 机器人末端执行器等效为二阶弹簧-质量-阻尼系统. 如图1所示, 当机器人与环境相互作用时, 通过调整弹簧-质量-阻尼系统的参数建立机器人末端作用力与位置之间的某种理想的动态关系. 在图2的弹簧-质量-阻尼系统中, 通过结合机器人末端的位置、速度、加速度以及所受到的作用力, 建立一个二阶微分方程, 即阻抗控制模型

$$M(\ddot{X}_d - \ddot{X}_c) + B(\dot{X}_d - \dot{X}_c) + K(X_d - X_c) = F, \quad (1)$$

其中: M , B , K 分别代表系统的惯量、阻尼以及刚度系数矩阵, X_c , $\dot{X}_c$, $\ddot{X}_c$ 分别代表机器人调整后的位置、速度以及加速度, X_d , $\dot{X}_d$, $\ddot{X}_d$ 分别代表机器人初始的参考位置、速度以及加速度, F 表示三维空间机器人与环境接触时的作用力大小. 在受约束的空间运动中, 非零接触作用力会对初始期望轨迹进行调整,

从而产生顺应性轨迹. 为了方便且不失通用性, 下文均采用一维模型进行分析求解, 即

$$m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) + b(\dot{x}_d - \dot{x}_c) + k(x_d - x_c) = f. \quad (2)$$

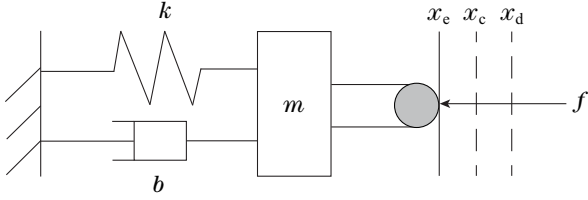


图1 弹簧-质量-阻尼系统

Fig. 1 Spring-mass-damping system

为实现机器人与环境间的接触力跟踪, 一些学者对式(2)所示的模型进行修改, 采用实际作用力与期望作用力的差值 $f - f_d$ 替换式(2)中的 f , 于是有如下阻抗控制模型:

$$m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) + b(\dot{x}_d - \dot{x}_c) + k(x_d - x_c) = f - f_d. \quad (3)$$

如图2所示, 本文提出的变刚度自适应导纳控制系统由位置控制内环与导纳控制外环组成. 由于当前实际使用的工业机器人的位置控制器均具有良好的控制精度和跟踪能力, 因此本文主要针对外环导纳控制方法展开重点研究.

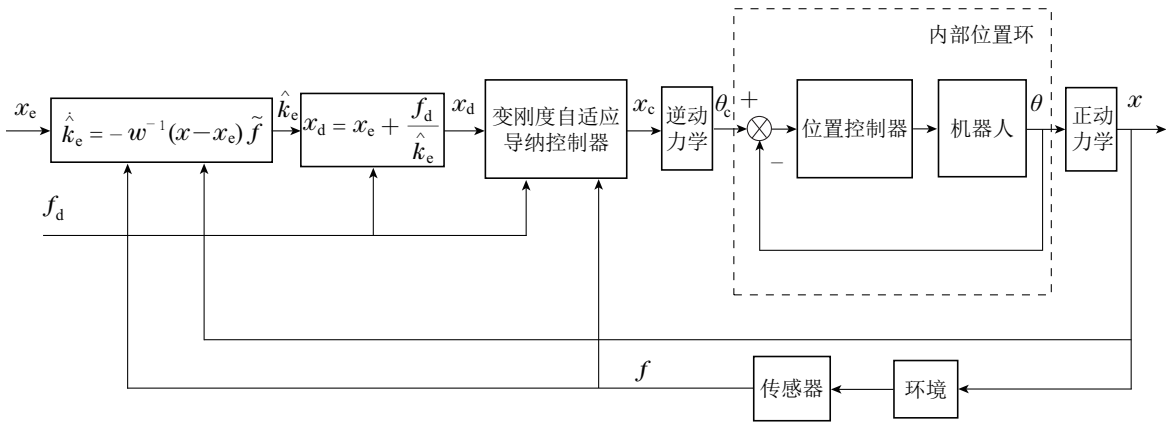


图2 系统控制框图

Fig. 2 System control block diagram

3 变刚度自适应导纳控制方法

大多数情况下, 将环境等效为理想的线性弹簧模型, 假设环境刚度为 $k_e > 0$, 环境接触无形变位置为 x_e , 则机器人与环境间的接触力可以表示成^[26]

$$f = k_e(x - x_e), \quad (4)$$

则机器人末端位置可以表示成

$$x = \frac{f}{k_e} + x_e. \quad (5)$$

将式(5)代入到式(2)得到

$$m(\ddot{x}_d - \frac{\ddot{f}}{k_e} - \ddot{x}_e) + b(\dot{x}_d - \frac{\dot{f}}{k_e} - \dot{x}_e) + k(x_d - \frac{f}{k_e} - x_e) = f - f_d, \quad (6)$$

进一步可得

$$m(\ddot{x}_d - \frac{\ddot{f}}{k_e} - \ddot{x}_e) + b(\dot{x}_d - \frac{\dot{f}}{k_e} - \dot{x}_e) + k(x_d - \frac{f - f_d}{k_e} - \frac{f_d}{k_e} - x_e) = f - f_d. \quad (7)$$

由式(7)得到稳定状态时接触力误差 $e_f = f_d - f$ 表达式为

$$e_f = \frac{-kk_e}{k + k_e}(x_d - x_e - \frac{f_d}{k_e}). \quad (8)$$

为了能够使接触力在导纳控制下达到期望值, 需要合适的初始参考轨迹 x_d , 同时初始参考轨迹可能存在误差, 此时会存在接触力误差. 当参考轨迹 x_d 设置的过大, 此时导纳控制器通过调大刚度系数使机器人到达 x_c 时的接触力快速达到期望值, 但当参考轨迹 x_d 设置不足, 即使机器人末端到达 x_d 也不能使接触力达到期望值, 需要根据力反馈信号进行进一步补偿和调节. 本文从计算初始参考轨迹 x_d 以及调节导纳控制的刚度系数方面考虑, 提出了一种新的变刚度自适应导纳控制方法.

3.1 参考轨迹生成

对于导纳控制器的输入-期望轨迹 x_d , 有如下计算式:

$$x_d = x_e + \frac{f_d}{k_e}, \quad (9)$$

由上式可以看出, 期望轨迹 x_d 由环境位置、环境刚度系数以及期望作用力大小共同决定, 其中环境位置信息 x_e 可由传感器(视觉、激光、线结构光等等)感知并重构环境几何信息, 然后通过机器人任务/路径规划方

法规划作业轨迹得到; 环境刚度信息一般情况下无法直接获得, 特别是考虑到环境刚度不固定, 可能出现时变的情况, 故本文采用在线估计的方法获取. 设 $\hat{k}_e$ 为环境刚度 k_e 的估计值, 则期望轨迹可表示为

$$x_d = x_e + \frac{f_d}{\hat{k}_e}, \quad (10)$$

因此, 接触力的估计值 $\hat{f}$ 的表达式为

$$\hat{f} = \hat{k}_e(x - x_e), \quad (11)$$

结合式(4)和式(11)得到

$$\tilde{f} = \tilde{k}_e(x - x_e), \quad (12)$$

其中: $\tilde{f} = \hat{f} - f$, $\tilde{k}_e = \hat{k}_e - k_e$ 为环境刚度估计误差.

定义Lyapunov函数

$$V = w\tilde{k}_e^2, \quad (13)$$

其中 w 是一个正常数.

现选取环境刚度自适应调整律如下:

$$\dot{\hat{k}}_e = -w^{-1}(x - x_e)\tilde{f}, \quad (14)$$

又Lyapunov函数对时间的一阶微分为

$$\dot{V} = 2w\tilde{k}_e\dot{\tilde{k}}_e, \quad (15)$$

将式(13)–(14)代入到式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -2\tilde{k}_e(x - x_e)(\hat{f} - f) = \\ &= -2(\hat{k}_e - k_e)^2(x - x_e)^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

故 $\dot{V}$ 负定. 从而根据式(13)和式(16)可以得出, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 环境刚度估计误差 $\tilde{k}_e \rightarrow 0$, 即环境刚度估计值 $\hat{k}_e$ 收敛于真实值 k_e .

3.2 变刚度自适应导纳控制

考虑人类采用手臂与外界环境接触的场景, 人类根据所需的接触力来调整手臂的刚度. 通过模仿人的力量控制能力, 本文提出变刚度自适应导纳控制, 其相应的阻抗方程可写为

$$\begin{aligned} m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) + b(\dot{x}_d - \dot{x}_c) + \\ k(x_d - x_c) = f - f_d, \end{aligned} \quad (17)$$

其中刚度系数 $k(t)$ 根据期望接触力进行实时调整. 由于力控的主要思想是根据力跟踪误差进行调整, 故目标刚度系数 $k(t)$ 的调整取决于先前的力跟踪误差.

现定义 $k(t)$ 的调整律为

$$k(t) = \frac{k_f e_f + k_v \dot{e}_f}{x_d - x_c}, \quad (18)$$

其中: k_f 和 k_v 分别表示力跟踪误差控制的比例系数与微分系数. 根据式(17), 得到力跟踪误差的动态方程

$$e_f =$$

$$-m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) - b(\dot{x}_d - \dot{x}_c) - k(t)(x_d - x_c), \quad (19)$$

将式(18)代入到式(19), 得到

$$(1 + k_f)e_f + k_v \dot{e}_f = -m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) - b(\dot{x}_d - \dot{x}_c). \quad (20)$$

由式(20)可以得出, 跟踪力误差 e_f 的稳态值为0.

3.3 稳定性分析

为了分析所提方案的稳定性, 现定义Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}k_n e_f^2, \quad (21)$$

其中: 系数 k_n 是正常数, 此系数将在下文进行定义; m 是惯性系数, 为正常值. 当 $V \rightarrow 0$ 时, $\dot{x} \rightarrow 0$ 并且 $e_f \rightarrow 0$, 即当 $V \rightarrow 0$ 时, 机器人末端执行器的法向运动速度与力跟踪误差均趋近于0. 将 $k(t)$ 的表达式代入到式(17), 并假设期望轨迹恒定

$$\begin{aligned} m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_c) = \\ -b(\dot{x}_d - \dot{x}_c) - (1 + k_f)e_f - k_v \dot{e}_f, \end{aligned} \quad (22)$$

将式(10)代入式(22)可得

$$\begin{aligned} m(\ddot{x}_e + \frac{\ddot{f}_d}{\tilde{k}_e} - \ddot{x}_c) = \\ -b(\dot{x}_e + \frac{\dot{f}_d}{\tilde{k}_e} - \dot{x}_c) - (1 + k_f)e_f - k_v \dot{e}_f. \end{aligned} \quad (23)$$

此处, 假设环境位置与期望接触力大小为恒定值, 则有

$$-m\ddot{x}_c = b\dot{x}_c - (1 + k_f)e_f - k_v \dot{e}_f. \quad (24)$$

另外一方面, 力跟踪误差 e_f 和其一阶微分可以由线性环境模型进行表示

$$e_f = f_d - f = f_d - k_e(x - x_e), \quad (25)$$

$$\dot{e}_f = -k_e \dot{x}. \quad (26)$$

Lyapunov函数对时间的导数为

$$\dot{V} = m\dot{x}\ddot{x} + k_n e_f \dot{e}_f, \quad (27)$$

将式(22)(26)代入到式(27), 且有 $x_c = x$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= [-b\dot{x} + (k_f + 1)e_f + k_v \dot{e}_f]\dot{x} + k_n e_f \dot{e}_f = \\ &= (-b - k_v k_e)\dot{x}^2 + (k_f + 1 - k_n k_e)e_f \dot{x}. \end{aligned} \quad (28)$$

如果将正常数 k_n 定义为下式:

$$k_n = \frac{k_f + 1}{k_e}, \quad (29)$$

则式(28)右侧第2项将被消除, 即有

$$\dot{V} = -(b + k_v k_e)\dot{x}^2, \quad (30)$$

$$b + k_v k_e > 0, \quad (31)$$

易得 $\dot{V} \leq 0$, 因此上述控制策略的稳定性得证.

4 实验验证

实验采用ABB IRB120型机器人进行导纳控制算法的验证, 实验平台的整体硬件结构如图3所示, 平台包括5个部分: ABB IRB120型机器人(最高载荷3 kg, 水平工作范围580 mm, 重复定位精度0.02 mm)、ABB IRC5 compact控制器、OptoForce-HEX-70-XE六维力/力矩传感器(参数如表1所示)以及刚性和柔性工具手两种自主设计的末端执行器(如图4所示). 其中, 末端执行器通过使用螺母限制弹簧的运动完成刚性工具手和柔性工具手两种模式的切换.

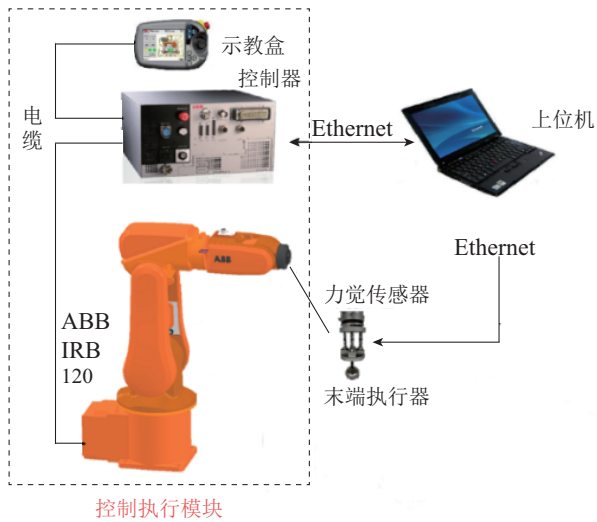


图3 实验平台硬件结构图

Fig. 3 Hardware structure diagram of experimental platform

表1 OptoForce-HEX-70-XE六维力/力矩传感器参数

Table 1 Optoforce-hex-70-xe 6 dimensional force/moment sensor parameters

力/力矩	测量范围	分辨率
F_{xy}	± 200 N	± 22.22 mN
F_z (拉)	450 N	125 mN
F_z (压)	1000 N	125 mN
T_{xy}	± 10 Nm	± 1 mNm
T_z	± 6.5 Nm	± 0.65 mNm

为了验证变刚度自适应导纳控制的有效性, 本文分别采用比例-积分-微分 (proportion-integration-differentiation, PID) 恒力控制、导纳控制以及变刚度自适应导纳控制3种控制策略, 针对两种不同的工具手(柔性工具手和刚性工具手)和3种不同的工件作业曲面(平面工件、弧面工件以及拉伸曲面工件, 如图5所示)进行了对比实验. 实验通过力误差的最大

值、最小值以及残差均方根值 (root mean square error, RMSE) 等参数对结果进行量化分析. 实验中设定机器人与环境间的期望作用力为 $f_d = 10$ N.

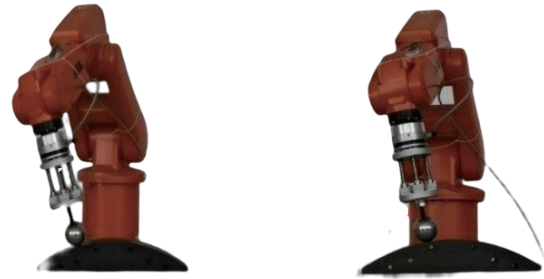


图4 自主设计的刚柔两种末端执行器

Fig. 4 Independently designed rigid and flexible end-effector



图5 3种不同的实验工件实物图

Fig. 5 Three different physical drawings of experimental artifacts

4.1 平面工件恒力控制实验

PID恒力控制中, PID参数在经过多次的调整之后, 确定 K_p 的范围在 $[0.001, 0.05]$ 之间, K_i 的范围在 $[0, 0.005]$ 之间, K_d 的范围在 $[0, 1]$ 之间. 在柔性工具手情况下最优参数为 $K_p = 0.015$, $K_i = 0.0013$, $K_d = 0.2$ 在刚性工具手情况下最优参数为 $K_p = 0.03$, $K_i = 0.001$, $K_d = 0.35$.

导纳控制中的参数设置如下: 柔性工具手情况下惯性系数 $m = 0.25$, 阻尼系数 $b = 3.5$, 刚度系数 $k = 0$, 刚性工具手情况下惯性系数 $m = 0.2$, $b = 2.8$, 刚度系数 $k = 0$.

变刚度自适应导纳控制中设置目标刚度自适应调整率中的 $k_f = 100$, $k_v = 1$ 环境刚度在线估计系数, $\omega = 1$, 柔性工具手情况下惯性系数 $m = 0.135$, 阻尼系数 $b = 5.5$, 刚性工具手情况下惯性系数 $m = 0.15$, $b = 5$.

从图6-9可以看出, 3种恒力控制策略下机器人在与平面工件接触的运动过程中均能够实现接触力的快速调节, 且从力控曲线和表2性能指标可以进一步分析看出, 相较于其余两种控制方法, 本文所提出的变刚度自适应导纳控制方法生成的柔顺轨迹更加平稳, 光滑性更好, 且力误差曲线的幅度变化相对更小. 后面两种曲面工件的力跟踪误差结果分析也可得出类似的结论, 不再赘述.

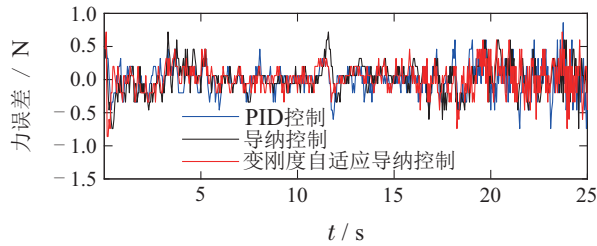


图 6 柔性工具手下平面工件恒力控制力误差曲线

Fig. 6 Constant force control error curves of planar workpiece under rigid tool hand

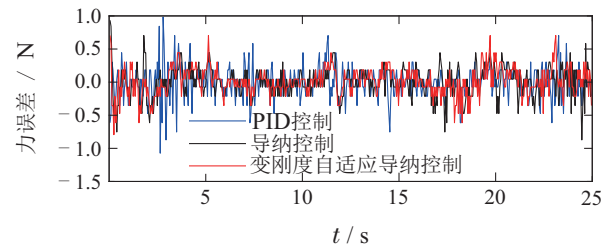


图 7 刚性工具手下平面工件恒力控制力误差曲线

Fig. 7 Constant force control error curves of planar workpiece under flexible tool hand

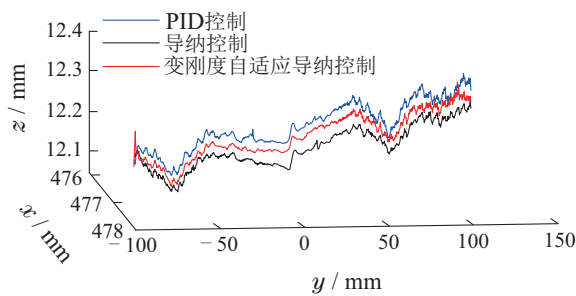


图 8 柔性工具手末端笛卡尔空间轨迹

Fig. 8 Flexible tool hand end Cartesian space trajectory

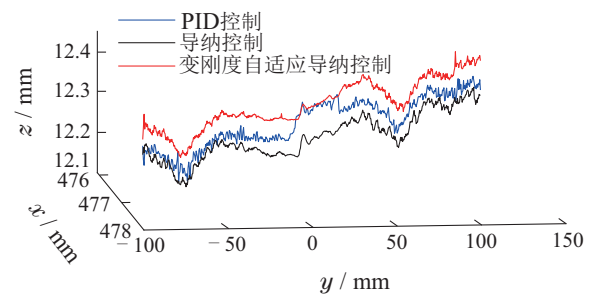


图 9 刚性工具手末端笛卡尔空间轨迹

Fig. 9 Rigid tool hand end Cartesian space trajectory

表 2 平面工件恒力控制实验结果

Table 2 Experimental results of constant force control of planar workpiece

	柔性工具手			刚性工具手		
	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制
力误差最大值/N	0.86	0.72	0.72	1.00	0.95	0.70
力误差最小值/N	-0.74	-0.76	-0.86	-1.06	-0.84	-0.78
力误差残差均方根RMSE/N	0.2291	0.2357	0.2282	0.2379	0.2261	0.2119

对于平面工件实验结果, 柔性工具手下变刚度自适应导纳控制力误差残差均方根相对于PID控制减小0.39%, 相对于导纳控制减小3.18%, 刚性工具手下变刚度自适应导纳控制力误差残差均方根相对于PID控制减小10.93%, 相对于导纳控制减小6.28%。综上, PID控制、导纳控制以及变刚度自适应导纳控制均能够实现恒力控制效果, 但是变刚度自适应导纳控制要略优于PID控制和导纳控制。

4.2 弧面工件恒力控制实验

PID恒力控制中, PID参数在经过多次的调整之后, 确定 K_p 的范围在[0.001, 0.08]之间, K_i 的范围在[0, 0.005]之间, K_d 的范围在[0, 0.7]之间。在柔性工具手情况下最优参数为 $K_p = 0.045$, $K_i = 0.0015$, $K_d = 0.15$, 在刚性工具手情况下最优参数为 $K_p = 0.06$, $K_i = 0.001$, $K_d = 0.2$ 。

导纳控制中的参数设置如下: 柔性工具手下惯性系数 $m=0.07$, 阻尼系数 $b=1.8$, 刚度系数 $k=0$, 刚性工具手下惯性系数 $m=0.13$, $b=2.5$, 刚度系数 $k=0$ 。

变刚度自适应导纳控制中设置目标刚度自适应调整率中的 $k_f = 120$, $k_v = 1$, 环境刚度在线估计系数 $\omega = 1$, 柔性工具手情况下惯性系数 $m = 0.08$, 阻尼系数 $b=2.5$, 刚性工具手情况下惯性系数 $m=0.12$, $b=2$ 。

由图10-13以及表3可以看出, 恒力控制策略下机器人在与弧面工件接触的运动过程中能够实现接触力的快速调节。弧面工件实验结果中, 柔性工具手下变刚度自适应导纳控制残差均方根相对于PID控制减小18.40%, 相对于导纳控制减小14.22%, 导纳控制残差均方根相对于PID控制减小4.87%; 刚性工具手下变刚度自适应导纳控制残差均方根相对于PID控制减小14.70%, 相对于导纳控制减小7.01%, 导纳控制的

残差均方根相对于PID控制减小8.28%。综上,对弧面工件而言,变刚度自适应导纳控制优于PID控制和导纳控制,导纳控制优于PID控制。

4.3 拉伸曲面工件恒力控制实验

PID恒力控制中,PID参数在经过多次的调整之后,

确定 K_p 的范围在 $[0.001, 0.1]$ 之间, K_i 的范围在 $[0, 0.01]$ 之间, K_d 的范围在 $[0, 0.4]$ 之间。在柔性工具手情况下最优参数为 $K_p=0.035$, $K_i=0.008$, $K_d=0.005$,在刚性工具手情况下最优参数为 $K_p=0.04$, $K_i=0.006$, $K_d=0.1$ 。

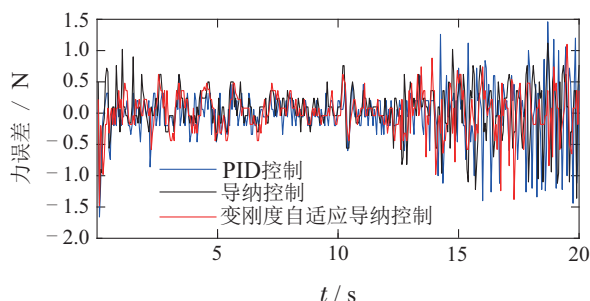


图 10 柔性工具手下弧面工件恒力控制力误差曲线
Fig. 10 Constant force control error curves of cambered workpiece under rigid tool hand

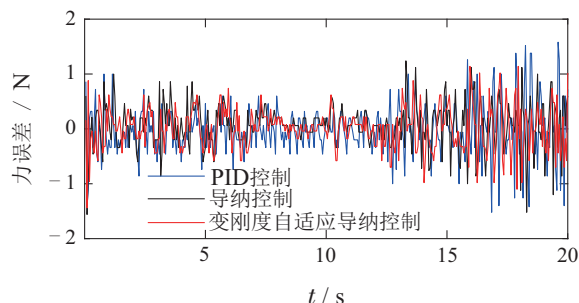


图 11 刚性工具手下弧面工件恒力控制力误差曲线
Fig. 11 Constant force control error curves of cambered workpiece under flexible tool hand

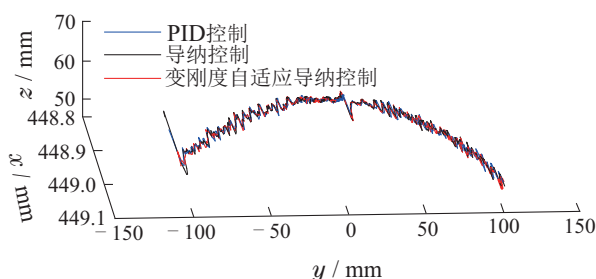


图 12 柔性工具手末端笛卡尔空间轨迹
Fig. 12 Flexible tool hand end Cartesian space trajectory

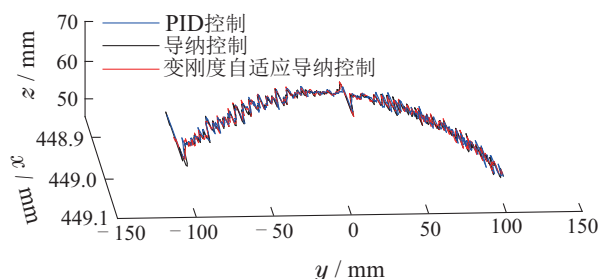


图 13 刚性工具手末端笛卡尔空间轨迹
Fig. 13 Rigid tool hand end Cartesian space trajectory

表 3 弧面工件恒力控制实验结果

Table 3 Experimental results of constant force control of cambered workpiece

	柔性工具手			刚性工具手		
	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制
力误差最大值/N	1.46	1.12	1.10	1.58	1.24	1.14
力误差最小值/N	-1.66	-1.44	-1.48	-1.54	-1.52	-1.44
力误差残差均方根RMSE/N	0.4185	0.3981	0.3415	0.4434	0.4067	0.3782

导纳控制中参数设置如下: 柔性工具手下惯性系数 $m=0.23$, 阻尼系数 $b=1.5$, 刚度系数 $k=0$, 刚性工具手下惯性系数 $m=0.18$, $b=2.2$, 刚度系数 $k=0$ 。

变刚度自适应导纳控制中设置目标刚度自适应调整率中的 $k_f=120$, $k_v=1$, 环境刚度在线估计系数 $\omega=1$, 柔性工具手情况下惯性系数 $m=0.18$, 阻尼系数 $b=2.3$, 刚性工具手情况下惯性系数 $m=0.15$, $b=1.7$ 。

由图14–17和表4可以看出,3种恒力控制策略下机器人在与拉伸曲面工件接触的运动过程中能够实现接触力的快速调节。拉伸曲面工件实验结果中,柔性

工具手下变刚度自适应导纳控制力误差残差均方根相对于PID控制减小13.3%,相对于导纳控制减小7.38%,导纳控制的力误差残差均方根相对于PID控制减小6.39%;刚性工具手下变刚度自适应导纳控制力误差残差均方根相对于PID控制减小12.56%,相对于导纳控制减小4.23%,导纳控制的力误差残差均方根相对于PID控制减小8.69%。综上,对于拉伸曲面工件而言,变刚度自适应导纳控制的效果要优于PID控制和导纳控制,导纳控制的效果略优于PID控制。

总体来说,本文所提的3种在线恒力控制策略在不

同的工件情况下均能够实现恒力控制效果,但是相对于PID控制和导纳控制,本文所提出的变刚度自适应导纳控制更能够有效的减小机器人接触力的抖动,实现接触力的快速调节,完成高精度的恒力控制目标。

5 结论

为了应对恒力控制中精确环境信息未知和导纳控制固定系数无法在全工况下获得高性能轨迹的难题,本文提出了一种结合了环境刚度自适应估计方法和变刚度导纳控制方法的复合控制策略,并通过实验对本文所提出的控制方法进行了验证。相较于PID控制和传统导纳控制方法,本文所提出的变刚度自适应导

纳控制能够更有效的减小机器人接触力的抖动,实现接触力的快速调节,完成高精度的恒力控制目标。

目前提出的恒力控制方法仍存在一定的改进空间,未来研究方向主要包括: 1) 本文提出的控制方法仅实现了刚度系数的自适应调整,后续可考虑实现恒力控制过程中惯量系数和阻尼系数实时自适应调整的控制方法,进一步提高恒力控制精度; 2) 本文所提方法的实验验证对象为轻载机器人,后续可以考虑在更复杂的高速高负载重载机器人上进行本文所提方法的应用与验证; 3) 从恒力方法如何扩展到变力跟踪控制方法,等等。

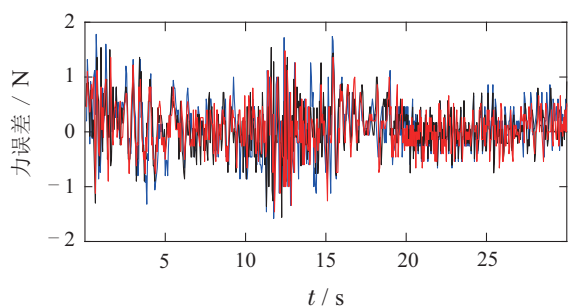


图 14 柔性工具手下拉伸曲面工件恒力控制力误差曲线

Fig. 14 Constant force control error curves of curved workpiece under rigid tool hand

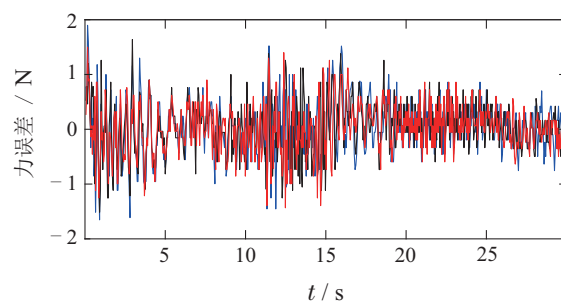


图 15 刚性工具手下拉伸曲面工件恒力控制力误差曲线

Fig. 15 Constant force control error curves of curved workpiece under flexible tool hand

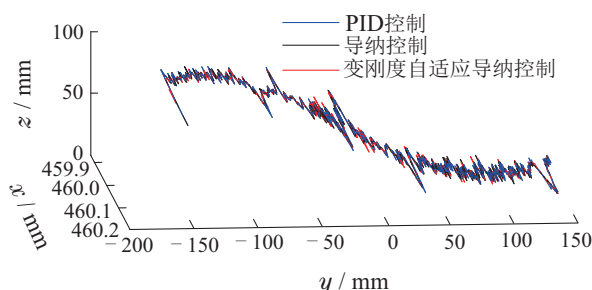


图 16 柔性工具手末端笛卡尔空间轨迹

Fig. 16 Flexible tool hand end Cartesian space trajectory

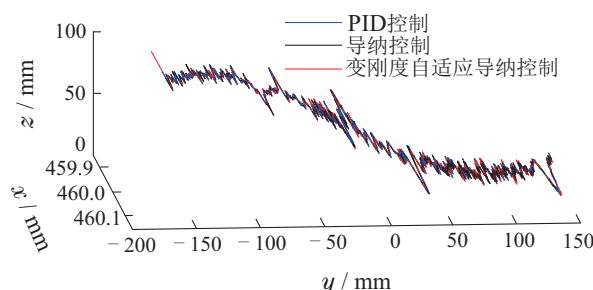


图 17 刚性工具手末端笛卡尔空间轨迹

Fig. 17 Rigid tool hand end Cartesian space trajectory

表 4 拉伸曲面工件恒力控制实验结果

Table 4 Experimental results of constant force control of workpiece with drawn surface

	柔性工具手			刚性工具手		
	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制	PID控制	导纳控制	变刚度自适应导纳控制
力误差最大值/N	1.78	1.54	1.48	1.92	1.64	1.50
力误差最小值/N	-1.58	-1.56	-1.46	-1.66	-1.52	-1.42
力误差残差均方根RMSE/N	0.5023	0.4702	0.4355	0.5199	0.4747	0.4546

参考文献:

- [1] LUO Z W, ITO M. Control design of robot for compliant manipulation on dynamic environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(3): 286 – 296.
- [2] ZHANG Tie, WU Shenghe, CAI Chao. Constant force control method for robotic disk grinding based on floating platform. *Jour-*

- nal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(5): 515 – 523.
(张铁, 吴圣和, 蔡超. 基于浮动平台的机器人恒力控制研磨方法. 上海交通大学学报, 2020, 54(5): 515 – 523.)
- [3] PARK J, KHATIB O. A Haptic teleoperation approach based on contact force control. *The International Journal of Robotics Research*, 2006, 25(5/6): 575 – 591.
- [4] LI Z, HUANG H, SONG X, et al. A fuzzy adaptive admittance controller for force tracking in an uncertain contact environment. *IET Control Theory & Applications*, 2021, 15(17): 2158 – 2170.
- [5] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation. *Proceedings of 1984 American Control Conference*. San Diego, CA, USA: IEEE, 1984: 304 – 313.
- [6] KAZEROONI H, SHERIDAN T B, HOUP T P K. Robust compliant motion for manipulators, part I: The fundamental concepts of compliant motion. *IEEE Journal on Robotics & Automation*, 1986, 2(2): 83 – 92.
- [7] HEINRICHS B, SEPEHRI N, THORNTONTUMP AB. Position-based impedance control of an industrial hydraulic manipulator. *IEEE Control Systems*, 1997, 17(1): 46 – 52.
- [8] PENG G, CHEN C L P, YANG C. Robust admittance control of optimized robot-environment interaction using reference adaptation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 34(9): 5804 – 5815.
- [9] YU W, PERRUSQUIA A. Simplified stable admittance control using end-effector orientations. *International Journal of Social Robotics*, 2020, 12(5): 1061 – 1073.
- [10] GAN Yahui, DUAN Jinjun, DAI Xianzhong. Adaptive variable impedance control for robot force tracking in unstructured environment. *Control and Decision*, 2019, 34(10): 2134 – 2142.
(甘亚辉, 段晋军, 戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法. 控制与决策, 2019, 34(10): 2134 – 2142.)
- [11] WANG L, CHEN Z H C, CHALASANI P, et al. Updating virtual fixtures from exploration data in force-controlled model-based telemanipulation. *ASME International Design Engineering Technical Conference/Computer and Information in Engineering Conference*. Charlotte, NC: 2016: 1 – 10.
- [12] ZHANG X, KHAMESE M B. Adaptive force tracking control of a magnetically navigated microrobot in uncertain environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1644 – 1651.
- [13] ROVEDA L, IANNACCI N, VICENTCIVI F, et al. Optimal impedance force-tracking control design with impact formulation for interaction tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(1): 130 – 136.
- [14] ZHU Guoxin, CHENG Hao. Force tracking of minimally invasive vascular surgery catheter robot system based on predictive control. *Servo Control*, 2015, (1): 50 – 52, 39.
(朱国昕, 程浩. 基于预测控制的微创血管手术导管机器人系统力跟踪. 伺服控制, 2015, (1): 50 – 52, 39.)
- [15] COJBASIC Z M, NIKOLIC V D. Hybrid industrial robot compliant motion control. *Automatic Control and Robotics*, 2008, 1(7): 99 – 110.
- [16] LIU Hongyi, WANG Lei, WANG Fei. Fuzzy force control of constrained robot manipulators based on impedance model in unknown environment. *Journal of Northeastern University*, 2005, 26(8): 766 – 769.
(柳洪义, 王磊, 王菲. 在未知环境下基于阻抗模型的受限机械手模糊力控制方法. 东北大学学报, 2005, 26(8): 766 – 769.)
- [17] LI Erchao. *Study of the robotic force control based on uncertain environment*. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
(李二超. 未知环境下机器人力控制技术研究. 兰州: 兰州理工大学, 2013.)
- [18] LI Zhengyi. *Research and application of robot force position control methods for robot-environment interaction*. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
(李正义. 机器人与环境间力/位置控制技术研究与应用. 武汉: 华中科技大学, 2011.)
- [19] KRONANDER K, BILLARD A. Stability considerations for variable impedance control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(5): 1298 – 1305.
- [20] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(3): 474 – 483.
- [21] LEE K, BUSS M. Force tracking impedance control with variable target stiffness. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2): 6751 – 6756.
- [22] XU Z L, FANG G. Fuzzy-neural impedance control for robots. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 2004, 299: 263 – 275.
- [23] WANG Liling. *Force/position control of industry robot based on fuzzy strategy*. Baoding: Heibei University, 2005.
(王立玲. 工业机器人的力/位置模糊控制策略研究. 保定: 河北大学, 2005.)
- [24] XIAO Meng. *Research on constant force control methods in robot grinding process*. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
(肖蒙. 机器人打磨加工过程中恒力控制方法研究. 广州: 华南理工大学, 2020.)
- [25] SUN T. Stability-guaranteed variable impedance control of robots based on approximate dynamic inversion. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(7): 4193 – 4200.
- [26] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 102: 54 – 65.

作者简介:

周波 副教授, 主要研究方向为工业机器人与智能制造、自主与半自主系统, E-mail:zhoubo@seu.edu.cn;

刘奕荣 博士研究生, 目前研究方向为工业机器人与智能制造、非线性控制理论, E-mail:liu_yirong@seu.edu.cn;

刘会昌 硕士研究生, 目前研究方向为工业机器人轨迹规划、控制理论;

宋伏阳 硕士研究生, 目前研究方向为工业机器人交互力控制、控制理论;

房芳 副教授, 主要研究方向为机器人系统控制与决策、机器人智能感知、机器人在工业场景中的应用;

甘亚辉 副教授, 主要研究方向为工业机器人控制器设计、多机械臂协作控制、双臂协作机器人。