

【文章编号】 2096-2835(2023)02-0216-08 DOI:10.3969/j.issn.2096-2835.2023.02.008

机械臂接触力跟踪自适应变导纳控制方法

金锋扬, 秦菲菲, 郭振武, 王斌锐
(中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

【摘要】 目的: 针对机械臂接触力跟踪时环境参数未知及动态变化而带来的力跟踪误差问题, 基于导纳控制方法, 提出一种自适应变导纳控制方法。方法: 根据导纳控制基础模型, 分析环境参数对接触力稳态误差和系统动态性能的影响; 采用基于环境参数估计的自适应参考轨迹方法以减小接触力的稳态误差; 设计基于接触力误差、力误差累计量、力误差率的自适应变导纳系数方法以提高系统的动态性能。结果: 由接触力跟踪实验结果可知, 自适应变导纳控制的接触力误差范围在 ± 2 N之内, 与导纳控制相比较, 接触力稳态误差降低约11.2%。结论: 该方法的接触力稳态误差、震荡均较小, 有助于提高机械臂在未知环境中接触力的跟踪效果。

【关键词】 变导纳控制; 自适应优化; 力跟踪; 环境参数估计; 机械臂

【中图分类号】 TP242

【文献标志码】 A

Adaptive variable admittance control method for robot manipulator contact force tracking

JIN Fengyang, QIN Feifei, GUO Zhenwu, WANG Binrui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

[Abstract] **Aims:** In order to solve the problem of force tracking errors caused by unknown environmental parameters and dynamic changes during the contact force tracking of robot manipulators, an adaptive variable admittance control method was proposed based on the admittance control method. **Methods:** According to the basic model of admittance control, the influence of environmental parameters on the steady-state error of contact force and the dynamic performance of the system was analyzed. An adaptive reference trajectory method based on environmental parameter estimation was adopted to reduce the steady state error of contact force. An adaptive variable admittance coefficient method based on the contact force error, the force error cumulation and the force error rate was designed to improve the dynamic performance of the system. **Results:** The contact force tracking experimental results showed that the contact force error range of adaptive variable admittance control was less than ± 2 N. Compared with the admittance control, the contact force steady-state error decreased about 11.2%. **Conclusions:** The steady state errors and the oscillation of the contact force of this method are small, which is helpful to improve the tracking effect of the contact force of the robot

【收稿日期】 2023-02-03 《中国计量大学学报》网址: zgjl.cbpt.cnki.net

【基金项目】 浙江省重点研发计划项目 (No. 2021C01069)

【通信作者】 王斌锐 (1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为仿生机器人智能控制等。E-mail: wangbrpaper@163.com

manipulator in unknown environments.

[Key words] variable admittance control; adaptive optimization; force tracking; environmental parameter estimation; robot manipulator

目前机械臂已经广泛应用于工业制造过程,对于如喷涂、码垛等作业,仅要求机械臂精确遵循目标轨迹^[1-2]。而对于打磨、抛光等作业,机械臂还需要控制与外界环境的接触力^[3]。传统力控制方法在此类场景下取得了广泛的应用,如阻抗控制^[4]、导纳控制^[5]和力/位混合控制^[6]。

然而因机械臂接触环境的不确定性,难以建立准确的环境模型,导致参考轨迹难以精确获得,从而影响接触力控制性能。传统接触力控制难以应对未知环境参数,无法满足实际的环境交互需求,因此大量文献针对此问题进行研究。Komati 等^[7]提出了一种通过力和位置来估计环境参数,并以此来计算参考轨迹。Zhang 等^[8]提出了一种自适应控制算法用于生成参考运动轨迹以减小因环境不确定性带来的力跟踪误差。李振等^[9]在阻抗控制基础上采用了基于环境参数估计的参考轨迹自适应生成方法。李二超等^[10]在阻抗控制中基于接触力反馈使用模糊推理调节参考比例因子的大小,以此来生成参考轨迹。此类方法均是通过估计或预测的方法来获取参考轨迹,从而实现减小接触力稳态误差的目的。受此启发,本文采用了基于环境参数估计的自适应参考轨迹方法。

为进一步提高机械臂对接触环境动态适应能力,有大量的研究对控制方法本身进行优化。Calanca 等^[11]提出了一种自适应力控制器用于补偿环境的未知性并证明其稳定性。陈满意等^[12]提出了模糊自适应阻抗控制模型,该模型根据力误差和力误差率按照一定的模糊规则调整阻抗参数。Peng 等^[13]提出了一种神经网络增强的自适应导纳控制,以实现机械臂与环境交互的最优控制。Zhang 等^[14]提出了一种基于逆强化学习的方法来实现可变阻抗控制策略。Kronander 等^[15]对变阻抗控制稳定性进行分析,并提出与状态无关的稳定性约束。Duan 等^[16]提出了基于力跟踪误差在线调整阻抗参数,从而设计了自适应变阻抗控制方法。甘亚辉等^[17]和 Dong 等^[18]根据力误差设计了自适应变阻抗控制律,用以动态调整阻抗参数。

结合上述文献中两种对力跟踪控制的优化方向,本文在导纳控制基础上,进一步提出自适应变导纳控制方法。分析导纳控制稳态误差问题,采用基于环境参数估计的自适应参考轨迹方法;分析导纳控制动态性能问题,设计基于接触力误差、力误差累计量、力误差率的自适应变导纳系数方法。并搭建仿真模型和机械臂接触力跟踪实验平台,通过仿真和实验验证控制方法的有效性。

1 机械臂接触力导纳控制

1.1 导纳控制模型

导纳控制框图如图 1。其中, X_r 为机械臂参考轨迹, X_c 为控制器输出目标轨迹, q_c 为控制器各关节输出目标角度, q 为机械臂各关节实际角度, X 为机械臂实际位置, X_e 为环境位置, F_e 为机械臂与环境的接触力, F_r 为期望接触力, $\Delta F = F_r - F_e$ 为接触力误差。

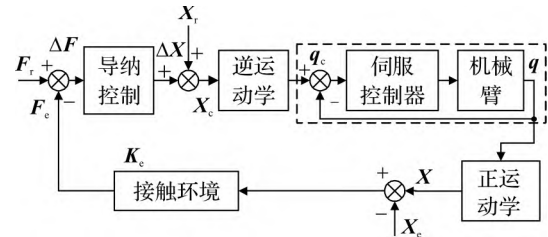


图 1 导纳控制框图

Figure 1 Block diagram of admittance control

由于机械臂位置控制由伺服控制器实现,忽略位置跟踪误差,则 $X = X_c$ 。

环境模型可等效为一阶弹簧模型, K_e 为环境刚度。 K_e 与 X_e 即为环境参数,则环境模型为

$$F_e = K_e (X - X_e) = K_e (X_c - X_e). \quad (1)$$

机械臂的实际位置与参考轨迹之间的位置误差可表示为

$$E = X - X_r = X_c - X_r. \quad (2)$$

导纳控制模型可表示为

$$M(\ddot{X}_c - \ddot{X}_r) + B(\dot{X}_c - \dot{X}_r) + K(X_c - X_r) = \Delta F. \quad (3)$$

其中, M 为质量系数矩阵, B 为阻尼系数矩阵, K 为刚度系数矩阵。

1.2 环境参数对导纳控制的影响

1) 稳态误差影响: 导纳控制模型式(3)经过拉普拉斯变换, 可得机械臂位置误差与接触力误差之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{E(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)可得控制器输出轨迹为

$$X_c = X_r + E = X_r + \Delta F \cdot G(s) \quad (5)$$

根据接触力误差和环境模型可得

$$\Delta F = F_r - K_e((X_r + G(s)\Delta F) - X_c) \quad (6)$$

进一步将式(4)代入, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$, 可得接触力稳态误差为

$$\Delta F_{ss} = \frac{K}{K + K_e}(K_e(X_c - X_r) + F_r) \quad (7)$$

当参考轨迹满足 $X_r = X_c + \frac{F_r}{K_e}$ 时, 系统稳态误差为零。然而由于环境参数未知且存在动态变化, 参考轨迹无法精确获得, 从而导致存在稳态误差。

2) 动态性能影响: 由参考文献[19]可知, 由于环境未知无法获取准确的参考轨迹, 可设 $X_r = X_c$, 并将式(1)代入式(3)中, 可得位置误差与期望接触力之间的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{E(s)}{F_r(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K + K_e} \quad (8)$$

导纳控制系统的特征方程可表示为

$$ms^2 + bs + k + k_e = 0 \quad (9)$$

其中, m 、 b 、 k 和 k_e 分别为 M 、 B 、 K 和 K_e 中的元素。根据典型二阶系统的传递函数可得导纳控制系统的阻尼比 ζ 和无阻尼自然频率 ω_n 为

$$\begin{cases} \zeta = \frac{b}{2\sqrt{(k+k_e)m}}, \\ \omega_n = \sqrt{\frac{(k+k_e)}{m}} \end{cases} \quad (10)$$

由于 ω_n 和 ζ 直接影响系统的动态性能。考虑到质量系数 m 对系统动态性能较为敏感, 刚度系数 k 和环境刚度 k_e 共同对系统动态性能产生影响, 而阻尼系数 b 的大小直接影响了系统阻尼比 ζ 的大小。因此本文设计的自适应变导纳系数方法中, 质量和刚度系数为常数, 阻尼系数自适应动态调整。

2 自适应变导纳控制

综合考虑环境参数对导纳控制稳态误差和动态性能这两方面的影响, 本文设计的自适应变导纳控制方法包含了自适应参考轨迹和自适应变导纳系数方法。考虑到机械臂末端在六维方向上的信息在笛卡尔空间是解耦的, 因此下文以一维方向为例来分析自适应变导纳控制方法。

2.1 自适应参考轨迹

由于环境参数无法准确获得, 且可能是动态变化的。根据式(7)可知, 不确定的环境参数会导致控制系统出现接触力稳态误差。针对这一问题, 本文采用了一种基于环境参数估计的自适应参考轨迹方法。首先根据接触力误差和机械臂位置来实时估计当前环境参数, 然后根据环境参数估计值自适应生成机械臂的参考轨迹。

定义接触力误差和接触力误差的二次函数为

$$\begin{cases} \Delta f = f_r - f_e, \\ \delta = \frac{1}{2} \Delta f^2 \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

定义环境参数估计值为

$$\begin{cases} \hat{k}_e = k_{e0} + \Delta k_e, \\ \hat{x}_e = x_{e0} + \Delta x_e. \end{cases} \quad (12)$$

其中, k_{e0} 和 x_{e0} 为设置的环境参数初始值, Δk_e 和 Δx_e 为环境参数不确定度。

根据环境参数估计值和环境模型计算接触力为

$$f_e = \hat{k}_e(x - \hat{x}_e) \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)中, 可以得到 δ 关于 \hat{k}_e 、 \hat{x}_e 的表达式为

$$\delta = \frac{1}{2} (f_r - \hat{k}_e(x - \hat{x}_e))^2 \quad (14)$$

对 δ 分别关于 Δk_e 和 Δx_e 求偏导

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta}{\partial \Delta k_e} = \frac{\partial \delta}{\partial \hat{k}_e} \frac{\partial \hat{k}_e}{\partial \Delta k_e} = (f_r - \hat{k}_e x_c + \hat{k}_e \hat{x}_e)(-x_c + \hat{x}_e), \\ \frac{\partial \delta}{\partial \Delta x_e} = \frac{\partial \delta}{\partial \hat{x}_e} \frac{\partial \hat{x}_e}{\partial \Delta x_e} = (f_r - \hat{k}_e x_c + \hat{k}_e \hat{x}_e) \hat{k}_e. \end{cases} \quad (15)$$

利用梯度下降法更新 Δk_e 和 Δx_e :

$$\begin{cases} \Delta k_e = \Delta k_e - \lambda_1 \frac{\partial \delta}{\partial \Delta k_e}, \\ \Delta x_e = \Delta x_e - \lambda_2 \frac{\partial \delta}{\partial \Delta x_e}. \end{cases} \quad (16)$$

其中, λ_1 和 λ_2 分别是 Δk_e 和 Δx_e 的迭代步长。

利用更新后的环境参数不确定度重新计算得到当前的环境参数估计值,再由此更新机械臂参考轨迹,用 \tilde{x}_r 表示机械臂参考轨迹估计值。

$$\tilde{x}_r = \hat{x}_e + \frac{f_r}{k_e} \quad (17)$$

由梯度下降法可知,当 Δk_e 和 Δx_e 基于式(15)所示方式更新时,二次误差函数 δ 将迭代收敛至最小,即接触力收敛到期望力 $f_e \rightarrow f_r$, $\Delta f \rightarrow 0$ 。与此同时,环境参数估计值也将收敛到较为真实的环境参数 $\hat{k}_e \rightarrow k_e$, $\hat{x}_e \rightarrow x_e$ 。

2.2 自适应变导纳系数

由上文分析可知,初始环境位置 x_e 可代替 x_r , 则 $e = x_e - x_e$, 因此导纳控制可表示为

$$\Delta f(t) = m \ddot{e}(t) + b \dot{e}(t) + ke(t) \quad (18)$$

式(18)中, $\Delta f(t)$ 、 $\ddot{e}(t)$ 、 $\dot{e}(t)$ 和 $e(t)$ 都是时变的,为了进一步使得 $\Delta f_{ss} = 0$, 在自适应参考轨迹方法上,引入自适应变导纳系数方法来补偿时变的接触力误差。

根据上文对导纳控制动态性能的分析,本文采用变阻尼的方式来实现自适应变导纳系数。根据接触力误差、力误差累计量、力误差率来建立自适应阻尼变化率,以实现阻尼系数自适应动态调整。自适应阻尼变化律为

$$\begin{cases} b(t) = b_0 - \frac{\Delta b(t)}{\epsilon + \dot{e}(t)}, \\ \Delta b(t) = b_p \Delta f(t) + b_i \int_0^t \Delta f(\tau) d\tau + b_d \Delta \dot{f}(t). \end{cases} \quad (19)$$

其中, b_0 为阻尼系数初始值, $\Delta b(t)$ 为自适应阻尼系数变化率, b_p 为力误差比例增益系数, b_i 为力误差积分增益系数, b_d 为力误差微分增益系数。 $\epsilon = 10^{-8}$ 为常量,用于防止式中出现分母为 0 的情况,其中 $\dot{e}(t) = \dot{x}_e(t) - \dot{x}_e(t)$ 。

将式(19)代入到导纳控制模型中可得自适应变导纳系数的导纳控制模型为

$$\Delta f(t) = m \ddot{e}(t) + b_0 \dot{e}(t) + ke(t) - b_p \Delta f(t) - b_i \int_0^t \Delta f(\tau) d\tau - b_d \Delta \dot{f}(t) \quad (20)$$

上述自适应变导纳系数方法通过增益系数动态调整阻尼系数,增益系数的取值范围决定了该

系统是否能稳定运行。因此下文将分析该系统的稳定性,并给出增益系数的约束条件。对上式(20)进行拉普拉斯变换得

$$(ms^2 + b_0 s + k)e(s) = \left(b_p + 1 + \frac{b_i}{s} + b_d s\right) \Delta f(s) \quad (21)$$

其中, $e(s) = x_e(s) - x_e(s)$, 并且环境模型为 $f_e(s) = k_e(x_e(s) - x_e(s))$ 。将其代入式(20)中可得

$$\frac{(ms^2 + b_0 s + k)f_e(s)}{k_e} = \left(b_p + 1 + \frac{b_i}{s} + b_d s\right) \Delta f(s) \quad (22)$$

将 $\Delta f(s) = f_r(s) - f_e(s)$ 代入重新整理式(22)可得接触力误差与期望力之间的传递函数为

$$\frac{\Delta f(s)}{f_r(s)} = \frac{ms^3 + b_0 s^2 + ks}{ms^3 + (k_e b_d + b_0)s^2 + (k + k_e + k_e b_p)s + k_e b_i} \quad (23)$$

利用劳斯稳定判据对其特征方程进行稳定性分析。为了保证系统的稳定,使劳斯表第一列的元素系数全部为正值,则增益系数的取值应满足

$$\begin{cases} b_p > \frac{mb_i}{k_e b_d + b_0} - \frac{k}{k_e} - 1, \\ b_i > 0, \\ b_d > -\frac{b_0}{k_e}. \end{cases} \quad (24)$$

由上述分析可知,自适应变导纳系数的导纳控制在式(24)的范围内是稳定的。本文设计的自适应变导纳控制方法框图如图 2,其中虚线框中的分别是自适应参考轨迹与自适应变导纳系数方法。

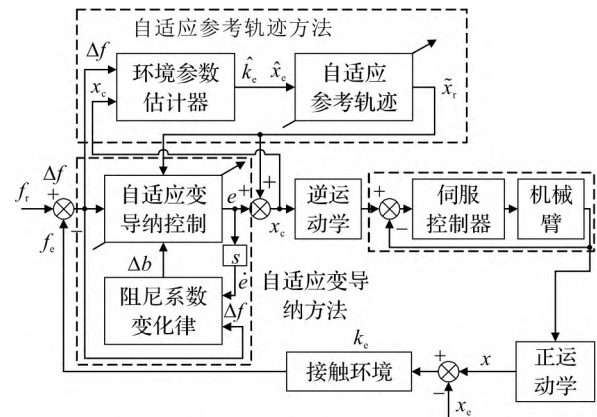


图 2 自适应变导纳控制框图

Figure 2 Block diagram of adaptive variable admittance control

3 仿真与实验

为了充分验证所设计控制方法的有效性,通过设置以下几组方法进行对比分析:

1) 固定参考轨迹(fixed reference track, FRT)+导纳控制(admittance control, AC);

2) 固定参考轨迹(fixed reference track, FRT)+自适应变导纳系数的导纳控制(adaptive variable admittance control, AVAC);

3) 自适应参考轨迹(adaptive reference track, ART)+导纳控制(AC);

4) 自适应参考轨迹(ART)+自适应变导纳系数的导纳控制(AVAC)。

其中,自适应参考轨迹由式(15)生成;导纳控制模型根据式(3)建立;自适应变导纳系数的导纳控制根据式(18)和式(19)建立。

3.1 仿真分析

为了确保仿真结果的可靠性,本文将仿真参数设置与具体实际工况保持一致,参数设置具体情况如下所示。

导纳控制模型设置 $m=20, b=280, k=1\ 000$ 。自适应变导纳控制模型中设置 $b_0=280, b_p=0.5, b_i=0.5, b_d=0.8$ 。环境参数不确定度中的代步长, $\lambda_1=2\ 000, \lambda_2=0.000\ 45$ 。机械臂末端初始位置设置为 $x_z=0.01\text{ m}$, 环境位置为 $x_z=0\text{ m}$ 。固定参考轨迹中设置机械臂参考轨迹为 x 轴位移以 0.002 m/s 的速度运行, y, z 轴位移保持不变。自适应参考轨迹中机械臂参考轨迹为 x 轴位移以 0.002 m/s 的速度运行, y 轴位移保持不变, z 轴位移由式(16)自适应生成。

考虑到接触力稳态误差受环境参数影响较为敏感,因此设置两种仿真环境(变环境刚度和变环境位置),具体参数说明如下。

1) 在变环境刚度仿真中,环境位置保持不变,环境刚度呈阶段性变化,具体情况如下:

$$k_e = \begin{cases} 8\ 000\text{ Ncm}, & 0 < t \leq 4\text{ s}; \\ 10\ 000\text{ Ncm}, & 4 < t \leq 8\text{ s}; \\ 8\ 000\text{ Ncm}, & 8 < t \leq 12\text{ s}. \end{cases}$$

变环境刚度仿真结果如图3,其中FRT+AC方法中接触力一直存在稳态误差,且超调量也较大;FRT+AVAC方法中接触力存在稳态误差,但没有超调量;ART+AC方法中接触力无稳态

误差,存在较大超调量;ART+AVAC方法中接触力几乎没有稳态误差和超调量。

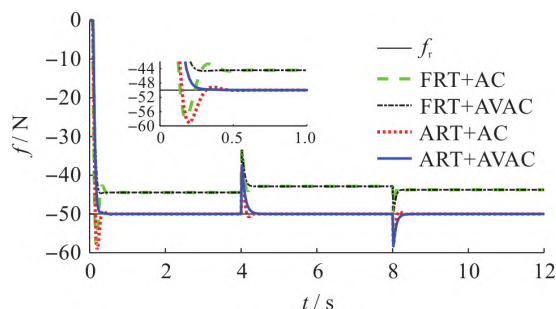


图3 变环境刚度仿真结果

Figure 3 Simulation results of variable environmental stiffness

2) 在变环境位置仿真中,环境刚度保持不变,由于环境无法准确建模,因此采用正弦函数来模拟环境中的凹坑和凸点,具体变化情况如下:

$$x_e = \begin{cases} 0\text{ m}, & 0 < t \leq 4\text{ s}; \\ 0.003\sin(0.5\pi(t-4))\text{ m}, & 4 < t \leq 8\text{ s}; \\ 0\text{ m}, & 8 < t \leq 12\text{ s}. \end{cases}$$

变环境位置仿真结果如图4,机械臂接触环境的凹坑、凸点时,FRT+AC和FRT+AVAC方法因缺乏环境信息, z 轴位移随着环境变化而变化,导致了接触力无法稳定跟踪。而ART+AC和ART+AVAC方法能够适应环境变化,接触力能较好地跟踪期望值,且ART+AVAC方法中系统超调和震荡更小。

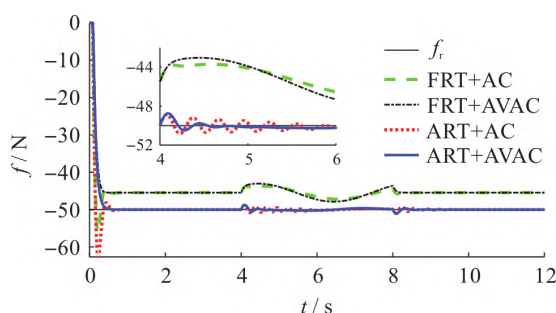


图4 变环境位置仿真结果

Figure 4 Simulation results of variable environmental position

结合图3、图4的仿真结果可知,在环境参数未知及动态变化的情况下,自适应参考轨迹方法能减小接触力的稳态误差,适应变化的环境参数,对环境参数有一定的鲁棒性,但其存在较大的超

调量、震荡等现象。引入自适应变阻尼系数后,能有效地抑制系统的超调和震荡,提高机械臂接触力跟踪时的柔顺性。

3.2 实验分析

为了进一步验证自适应变导纳控制方法的控制效果,本文基于 Aubo-i5 机械臂打磨实验平台进行了真实打磨工况下的接触力跟踪实验,实验平台系统示意图如图 5。



图5 实验平台系统示意图

Figure 5 Schematic diagram of experimental platform system

图5中机械臂型号为Aubo-i5,其末端安装有ATI Mini-45六维力传感器和执行机构。上位机通过TCP发送机械臂控制指令,通过UDP获取ATI六维力传感器的力/力矩信息。分别在两种不同的环境(铝板平面与复合材料曲面)下进行实验,实验过程设置的参数与仿真基本保持一致。

铝板平面接触力跟踪实验实物图和结果图分别如图6和图7。在铝板平面环境下,FRT+AC方法接触力整体震荡较大,大致在 $-48.5 \sim$

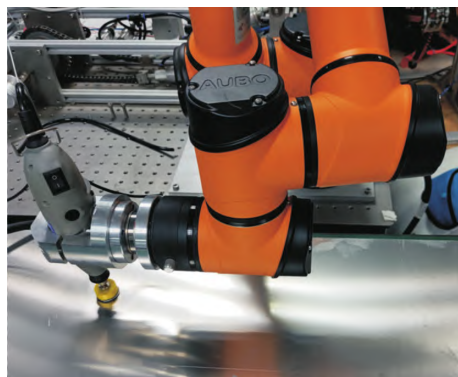


图6 平面接触力跟踪实验实物图

Figure 6 Physical picture of plane contact force tracking experiment

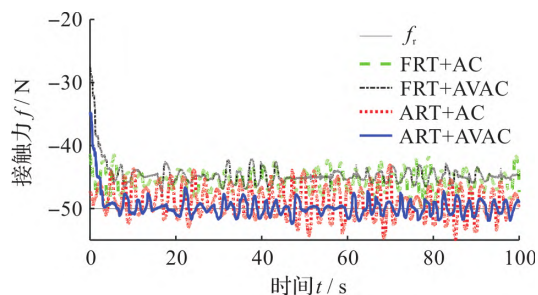


图7 平面接触力跟踪实验结果

Figure 7 Plane contact force tracking experiment results

-42 N 之间浮动,且始终偏离期望接触力 -50 N 。FRT+AVAC方法接触力在 $-47.5 \sim -42.5 \text{ N}$ 之间浮动,接触力震荡有所改善,但稳态误差仍然较大。ART+AC方法接触力的浮动范围大致在 $-54 \sim -45 \text{ N}$ 之间,接触力虽没有偏离 -50 N ,但仍存在大幅度接触力震荡。ART+AVAC方法接触力的浮动范围在 $-51.5 \sim -48 \text{ N}$,接触力震荡较小。

复合材料曲面的接触力跟踪实验结果如图8,其结果与铝板平面基本一致。图9中FRT+AC方法接触力的浮动范围在 $-50 \sim -42 \text{ N}$;ART+AC方法接触力的浮动范围在 $-48 \sim -42 \text{ N}$;FRT+AC方法接触力的浮动范围在 $-55 \sim -45 \text{ N}$;ART+AVAC方法接触力的浮动范围在 $-52 \sim -48 \text{ N}$ 。

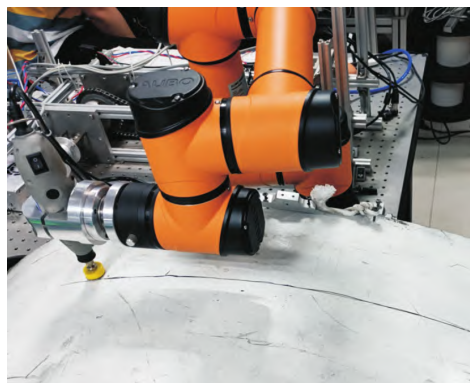


图8 曲面接触力跟踪实验实物图

Figure 8 Physical picture of Surface contact force tracking experiment

综合分析上述两种不同环境下的接触力跟踪实验,自适应参考轨迹与固定参考轨迹相比,虽解决了因环境参数未知带来的接触力偏离期望力的

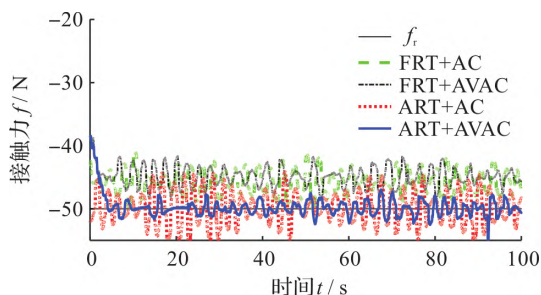


图9 曲面接触力跟踪实验结果

Figure 9 Surface contact force tracking experiment results

问题,但系统仍存在较大震荡,接触力误差范围最大为 ± 6 N。在自适应参考轨迹方法基础上,引入自适应变导纳系数方法后,有效地改善了接触力的震荡现象,其接触力跟踪误差更低、震荡更小,接触力误差范围基本在 ± 2 N之内,且接触力稳态跟踪误差降低约11.2%。上述实验结果表明,本文设计的自适应变导纳控制相较于导纳控制可进一步提高机械臂接触力的跟踪效果。

4 结 语

本文针对未知环境下的机械臂接触力跟踪问题展开研究,分析了环境参数对导纳控制稳态误差和动态性能所带来的影响,设计了一种机械臂接触力跟踪自适应变导纳控制方法。在传统导纳控制的基础上,结合基于环境参数估计的自适应参考轨迹方法与基于接触力误差、力误差累计量、力误差率的自适应变导纳系数方法,有效地减少了接触力稳态误差与震荡的现象。由仿真和实验的结果表明,本文所设计的自适应变导纳控制相较于传统导纳控制具有较好的接触力跟踪效果。

【参 考 文 献】

- [1] 张斌,马锦程,李建,等. 倾角约束条件下的机器人喷涂轨迹优化[J]. 中国计量大学学报,2020,31(2):233-239.
ZHANG B, MA J C, LI J, et al. Optimization of robot spraying trajectory under the constraint of tilt angle[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2020, 31(2): 233-239.
- [2] 沈晓斌,王斌锐,余芮,等. 机器人关节摩擦建模与自适应RBF神经网络补偿计算力矩控制[J]. 中国计量大学学报,2020,31(1):71-78.
SHEN X B, WANG B R, YU R, et al. Friction modeling and computed torque control of robot joints with adaptive RBF neural network compensation[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2020, 31(1): 71-78.
- [3] 葛吉民,邓朝晖,李尉,等. 机器人磨抛力柔顺控制研究进展[J]. 中国机械工程,2021,32(18):2217-2230,2238.
GE J M, DENG Z H, LI W, et al. Research progresses of robot grinding and polishing force compliance controls[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(18): 2217-2230, 2238.
- [4] WANG H, PENG J, ZHANG F, et al. High-order control barrier functions-based impedance control of a robotic manipulator with time-varying output constraints[J]. *ISA Transactions*, 2022, 129(10): 361-369.
- [5] KEEMINK A Q L, VAN D K, STIENEN A H. Admittance control for physical human-robot interaction[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2018, 37(11): 1421-1444.
- [6] KUMAR N, RANI M. A new hybrid force/ position control approach for time-varying constrained reconfigurable manipulators[J]. *ISA Transactions*, 2021, 110(1): 138-147.
- [7] KOMATI B, CLEVY C, LUTZ P, et al. Force tracking impedance control with unknown environment at the microscale[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong: IEEE, 2014: 5203-5208.
- [8] ZHANG X D, KHAMESEEE M B. Adaptive force tracking control of a magnetically navigated microrobot in uncertain environment[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(4): 1644-1651.
- [9] 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):1-10.
LI Z, ZHAO H, WANG H, et al. Research on contact steady-state adaptive force tracking of robot grinding and polishing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(9): 1-10.
- [10] 李二超,李战明. 基于力/力矩信息的面向位控机器人的阻抗控制[J]. 控制与决策,2016,31(5):957-960.
LI E C, LI Z M. Impedance control for positional controlled robotic manipulators based on force/ torque information[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 957-960.
- [11] CALANCA A, FIORINI P. Understanding environment adaptive force control of series elastic actuators[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(1): 413-423.
- [12] 陈满意,朱自文,朱义虎,等. 曲面抛光机器人的模糊自适应阻抗控制[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(1):1-17.
CHEN M Y, ZHU Z W, ZHU Y H, et al. Fuzzy adaptive impedance control of surface polishing robot[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(1): 1-17.
- [13] PENG G, CHEN C L P, YANG C. Neural networks en-

- hanced optimal admittance control of robot-environment interaction using reinforcement learning[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, 2021, 33(9):4551-4561.
- [14] ZHANG X, SUN L T, KUANG Z A, et al. Learning variable impedance control via inverse reinforcement learning for force-related tasks[J]. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2021, 6(2):2225-2232.
- [15] KRONANDER K, BILLARD A. Stability considerations for variable impedance control[J]. **IEEE Transactions on Robotics**, 2016, 32(5):1298-1305.
- [16] DUAN J, GAN Y, CHEN M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2018, 102(4):54-65.
- [17] 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[J]. **控制与决策**, 2019, 34(10):2134-2142.
- GAN Y H, DUAN J J, DAI X Z. Adaptive variable impedance control for robot force tracking in unstructured environment[J]. **Control and Decision**, 2019, 34(10):2134-2142.
- [18] DONG J, XU J, ZHOU Q, et al. Physical human-robot interaction force control method based on adaptive variable impedance[J]. **Journal of The Franklin Institute Engineering and Applied Mathematic**, 2020, 357(12):7864-7878.
- [19] SEUL J, HSIA T C, BONNITZ R G. Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2004, 12(3):474-483.
-
- (上接第 171 页)
- [13] 管豪. 子弹入水过程弹体检测与跟踪算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021:49-53.
- Zi H. **Research on the Detection and Tracking Algorithm of Projectile in the Process of Projectile Entry into Water**[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021:49-53.
- [14] 孔明,徐志玲,徐勇,等. 实际边缘轮廓下的螺栓综合尺寸质量检测[J]. **计量学报**, 2021, 42(6):724-730.
- KONG M, XU Z L, XU Y, et al. Quality inspection of overall bolt dimension with actual edge profile[J]. **Acta Metrologica Sinica**, 2021, 42(6):724-730.
- [15] BAO N S, WU Z F, RAN X, et al. Research on machine vision size measurement method based on particle weight [C]//**2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference**. Chengdu, China: IEEE, 2017:1498-1503.
- [16] 王欢,王修晖. 基于阈值判断的自适应中值滤波算法[J]. **中国计量大学学报**, 2011, 22(4):382-385.
- WANG H, WANG X H. An improved adaptive median filter based on noises detection[J]. **Journal of China University of Metrology**, 2011, 22(4):382-385.
- [17] 马庆鹏,何春涛,王聪,等. 球体垂直入水空泡实验研究[J]. **爆炸与冲击**, 2014, 34(2):174-180.
- MA Q P, HE C T, WANG C, et al. Experimental investigation on vertical water-entry cavity of sphere[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2014, 34(2):174-180.
- [18] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1986, 8(6):679-698.
- [19] ARISTOFF J, TRUSCOTT T, TECHET A, et al. The water entry of decelerating spheres[J]. **Physics of Fluids**, 2010, 22(3):70-340.
- [20] 王恒. 球体穿越粘性流体层入水空泡演化及运动特性试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020:29-51.
- WANG H. **Experimental Study on the Cavity Evolution and Motion Characteristics of Sphere Entry through a Viscous Fluid Layer Resting on the Water**[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020:29-51.
- [21] SUN T Z, WANG S S, BAI P Y, et al. Cavity dynamics of water entry for a head-ventilated cylinder[J]. **Physics of Fluids**, 2022, 34(7):073302(1-10).