

DOI: 10.7652/xjtuxb201704013

3-PPSR 柔性并联机器人力控制研究

栾玉亮, 荣伟彬, 吴方勇, 孙立宁

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对 3-PPSR 并联机器人加入大长径比柔性铰链和与外界环境接触产生形变的问题, 在控制端提出了基于位置阻抗控制的主动柔顺控制策略。该方法在柔性并联机器人与外界环境对象的等效作用模型和基于位置的阻抗控制模型基础上, 引入外界环境作用力和结合系统的力跟踪模型, 通过调整初始参考位置控制模型的稳态误差实现基于位置的外力跟踪控制。采用 Lyapunov 稳定模型和能量方程, 在未知环境变量条件下通过力偏差直接控制目标位置的自适应控制系统实现自适应的力控制。实验结果表明, 基于位置的外力控制精度可以达到 ± 0.05 N, 应用自适应控制精度可以达到 ± 0.1 N, 3-PPSR 柔性并联机器人的末端的接触力控制精度得到了提高, 满足设计要求, 验证了该控制方法的准确性和有效性。

关键词: 柔性并联机器人; 阻抗控制; 自适应控制; 力控制

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0085-06

A Force Control Strategy for 3-PPSR Flexible Parallel Robots

LUAN Yuliang, RONG Weibin, WU Fangyong, SUN Lining

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An active compliance control strategy based on position impedance control is proposed to solve the problem of flexible hinges with high aspect ratio and the deformation of parallel robot caused by external environment. Based on the equivalent reaction model between a flexible parallel robot and external environment and the position-based impedance control model, this strategy adds an external environment force in its control process. The steady state error of force tracking model is considered and accurately controlled by adjusting the initial reference position based on position control. Then, the external force tracking control is analysed with the position control under accurate environment variables. Lyapunov stability model and Lyapunov energy equation are used under the condition of unknown environment variables, and the adaptive force control is achieved by directly controlling the target position through a force deviation. Experimental results show that the precision of the position-based force control and the adaptive control reaches ± 0.05 N and ± 0.1 N, respectively, and meets design requirement. The accuracy and effectiveness of the strategy are verified.

Keywords: flexible parallel robot; impedance control; adaptive control; force control

柔性并联机器人作为并联机器人的一种, 以其 运动精度高的特点, 在光纤对接、光学对焦以及生物

收稿日期: 2016-07-10。 作者简介: 栾玉亮(1984—), 男, 博士生; 荣伟彬(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51521003); 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室自主研究课题资助项目(SKLRS201602C)。

网络出版时间: 2017-03-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170303.0925.012.html>

加工和微纳操作等领域得到了广泛应用^[1]。在柔性并联机器人应用过程中,末端执行器与外界环境之间存在接触的情况,在受到外界环境作用力后,并联机器人系统就不再是单纯的自由系统。针对这种受限制的空间运动,由于末端执行器与外界环境力之间作用产生弹性变形,导致系统精度和控制精度下降,简单的位置控制已经不能满足要求^[2]。因此,必须对位置控制进行改进,以提升并联机器人系统对受限制环境的柔顺控制能力。

并联机器人基于位置控制的柔顺控制主要包括主动柔顺控制和被动柔顺控制。主动柔顺控制主要分为阻抗柔顺控制和力位柔顺控制^[3],文献[4-7]分别对其进行了研究分析。阻抗柔顺控制主要是在并联机器人系统刚度阻尼上进行控制,通过对动力学模型和反馈信息参数进行调节来实现对系统的阻抗柔顺控制^[8-10]。阻抗柔顺控制的关键是控制过程中阻抗控制器的设计。并联机器人通过末端执行器的反馈单元将系统的位置信息和环境力参数通过阻抗控制器对系统驱动输入进行调整,进而控制执行器的末端位置与外界环境力满足设计要求,实现对并联机器人系统的阻抗柔顺控制^[11-12]。力位柔顺控制则是在控制过程中同时进行位置控制和环境力控制,两者相互独立互不干涉。相对于阻抗柔顺控制,力位柔顺控制理论上更先进,但是由于理论仍然不够系统,所示控制过程实现起来相对困难,控制精度不够理想。

本文的研究对象是具有大长径比柔性铰链的3-PPSR并联机器人结构,该并联机器人由上端动平台、下端驱动平台、柔性铰链、底座、压电陶瓷驱动马达和六维力传感器组成,传感器位于上端动平台上,动平台和底座之间由柔性铰链连接,底座固定在驱动平台上,整个机构由压电陶瓷马达驱动。由于采用大长径比柔性铰链作为中间环节,使得该种结构的并联机器人不仅能够满足高精度的微操作要求,更能够达到其他柔性并联机器人不具备的大工作空间的操作要求。采用三支链的结构,更是在简化系统结构的同时大大减少了结构冗余和奇异值的出现。因此,3-PPSR 柔性并联机器人将在大工作空间高精度环境的微操作领域得到广泛应用,例如高精度镜面磨削加工等。

1 机器人与环境对象作用等效模型

3-PPSR 柔性并联机器人独立存在时,系统与外界环境之间没有作用力而处于开放环境,由位置

控制即可实现对系统末端位置的有效控制。但是,当3-PPSR 柔性并联机器人应用时,系统末端上平台与外界环境之间存在环境外力作用而处于受限制环境,因此需要将系统与外界环境力综合考虑进行分析。

当3-PPSR 柔性并联机器人末端上平台受到环境外力 $\mathbf{F}$ 时,以系统为研究对象进行力分析可得,主要作用力包括:压电马达输入驱动力 $\mathbf{F}_d$ 、机构驱动力 $\mathbf{F}_m$ 、环境外力 $\mathbf{F}$ 和系统摩擦力 $\mathbf{F}_f$,且各个力之间存在以下关系

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_m + \mathbf{J}_F^T \mathbf{F} + \mathbf{F}_f \quad (1)$$

将接触模型等效为弹性形变引起的作用力,于是,存在下式

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}_{eq}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为上平台位置坐标矩阵; $\mathbf{X}_e$ 为实际环境位置坐标矩阵; $\mathbf{K}_{eq}$ 为系统等效刚度系数,由系统轴向刚度、六维力传感器刚度和外界环境刚度串联所得。

基于大长径比柔性铰链的3-PPSR 并联机器人可以达到其他并联机器人不能满足的对末端环境接触力的精度和大小控制。为了满足微秒时间运动和1 N 内的末端环境接触力控制,采用 ATI 公司 Nano43 力传感器,对系统末端上平台的六维力和力量分量 F_x 、 F_y 、 F_z 、 T_x 、 T_y 、 T_z 分别进行测量,所选传感器在 Net F/T 功能下响应频率为 7 KHz,最小力精度为 1/256 N。

2 3-PPSR 柔性并联机器人阻抗控制

3-PPSR 柔性并联机器人与外界环境之间的作用力与位置、速度和加速度的二阶微分关系为

$$\mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{X}}_r - \ddot{\mathbf{X}}) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{X}}_r - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_d(\mathbf{X}_r - \mathbf{X}) = \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_r$ 为参考位置坐标矩阵; $\mathbf{M}_d$ 为目标动力学关系质量矩阵; $\mathbf{B}_d$ 为目标动力学关系阻尼矩阵; $\mathbf{K}_d$ 为目标动力学关系刚度矩阵。

对式(3)作拉普拉斯变换,可得目标阻抗为

$$\mathbf{Z}_d = \mathbf{F}(s)/(\mathbf{X}_r(s) - \mathbf{X}(s)) = \mathbf{K}_d + \mathbf{B}_d s + \mathbf{M}_d s^2 \quad (4)$$

具体控制时需要参数指标 $\mathbf{M}_d$ 、 $\mathbf{B}_d$ 、 $\mathbf{K}_d$ 进行调节, $\mathbf{M}_d$ 主要影响系统接触稳定性,减小超调; $\mathbf{B}_d$ 主要影响系统控制稳定性,减小振动; $\mathbf{K}_d$ 主要影响系统性能取向,增大 $\mathbf{K}_d$ 可以提高系统精度,减小 $\mathbf{K}_d$ 可以提高控制柔顺性。

通过六维力传感器将引起环境接触力的位置修正值 $\mathbf{X}_f$ 反馈,具体表示为

$$\mathbf{X}_f = \mathbf{F}/(\mathbf{K}_d + \mathbf{B}_d s + \mathbf{M}_d s^2) \quad (5)$$

位置修正 $\mathbf{X}_f$ 的意义就是通过不断地调整使得实际位置控制输入 $\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_r - \mathbf{X}_f$, 当阻抗控制满足控制精度要求时, 系统实际末端位置等于实际控制位置, 即 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_d$, 同时 $\mathbf{X}_f = \mathbf{X}_r - \mathbf{X}$ 满足式(3)。

通过六维力控制器反馈系统控制调整量, 将实际控制量通过机构运动学模型转化为压电马达驱动输入值后对系统进行部分闭环控制, 从而达到控制末端环境接触力和柔顺控制的目的, 但不能确定接触力的数值。在应用该算法时, 还需要对控制稳定性进行分析。当系统控制满足精度要求时, 将独立位置控制转化为受限制环境下时, 只有满足下式

$$\left. \begin{aligned} \xi_i &\geq 0.5[(1+K)^{1/2} - 1] \\ \xi_i &= \mathbf{B}_d/2(\mathbf{K}_d \mathbf{M}_d)^{1/2} \\ \mathbf{K} &= \mathbf{K}_{eq}/\mathbf{K}_d \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

才能保证系统的柔顺稳定性^[13-14]。

3 力偏差阻抗控制

在实际应用时, 需要精确控制 3-PPSR 柔性并联机器人与外界环境之间的接触力大小。在没有参考力的情况下, 单一的阻抗位置控制虽然能够实现从独立环境到受限制环境的柔顺控制转换, 但依然不能控制系统与外界环境之间的接触力的大小。因此, 在式(3)的基础上引入一个参考力 $\mathbf{F}_r$, 使得位置修正 $\mathbf{X}_f$ 能反映力误差与位置的关系。加入参考力后的式(3)变为

$$\mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{X}} - \ddot{\mathbf{X}}_r) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + \mathbf{K}_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = \mathbf{F}_e \quad (7)$$

在引入参考力后, 对系统稳态控制误差分析时, 针对式(2), x_r, x, x_e 分别为参考位置、实际位置和环境位置, f_r 为参考力。将外界环境等效于刚度为 k_{eq} 的线性弹簧, 于是有

$$f = \begin{cases} k_{eq}(x - x_e), & x > x_e \\ 0, & x \leq x_e \end{cases} \quad (8)$$

当系统与外界环境稳定作用后, x_r 成为固定值, 相应速度和加速度等于 0, 由式(7)可得

$$m_d \ddot{x} + b_d \dot{x} + k_d(x - x_r) = f_e \quad (9)$$

由式(8)可得

$$x = f/k_{eq} + x_e = 1/(k_{eq}(f_r - f_e)) + x_e \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 可得

$$\begin{aligned} m_d \ddot{f}_e + b_d \dot{f}_e + (k_d + k_{eq})f_e = \\ m_d \ddot{f}_r + b_d \dot{f}_r + k_d f_r - k_d k_{eq}(x_r - x_e) \end{aligned} \quad (11)$$

当系统与外界环境稳定接触时, 参考力 f_r 为常值, 力差值 f_e 固定不变, 所以两者前二阶导数均等

于 0, 于是由式(11)可得

$$f_{es} = k_1(f_r/k_{eq} + x_e - x_r) \quad (12)$$

实际环境外力稳态值为

$$\begin{aligned} f_s = f_r - f_{es} = f_r - k_1(f_r/k_{eq} + x_e - x_r) = \\ k_1(f_r/k_{eq} + x_e - x_r) \end{aligned} \quad (13)$$

参考力和理论位置直接影响环境外力稳态值 f_s 。当不存在误差, 即 f_{es} 等于 0 时, 代入式(12)可得

$$x_r = f_r/k_{eq} + x_e \quad (14)$$

只有获得确定的位置参数才能使力控制消除误差。当受到环境影响时, 此时外界环境刚度为 $\hat{k}_{eq}$, 位置参数为 $\hat{x}_e$, 由式(12)得

$$f_{es} = [k_d/(k_d + k_{eq})](k_{eq}\Delta x_e - f_r\Delta k_{eq}/\hat{k}_{eq}) \quad (15)$$

4 自适应阻抗力控制

基于位置的阻抗控制的本质是通过与外界环境的定量力接触, 以及力位移转换器反馈的接触力偏差来调整目标位置。但是, 这种方法需要估计复杂的环境变量和确定的数学模型, 因此本节在基于位置的阻抗控制基础上, 采用 Lyapunov 稳定模型设计 Lyapunov 能量方程, 通过力偏差直接控制目标位置的自适应控制系统, 实现了 3-PPSR 柔性并联机器人的自适应阻抗力控制。

在控制过程中, 系统通过六维力传感器反馈的力误差在线修正目标位置, 同时实时检测目标位置和控制调整值的和, 实现对系统末端接触力的控制。设定目标位置与接触力偏差方程式为

$$x_r(t) = x_r(0) + f(t) + k_p(t)e(t) + k_d\dot{e}(t) \quad (16)$$

式中: $x_r(0)$ 为末端执行器初始位置; $k_p(t)$ 为比例增益; k_d 为微分增益; $e(t)$ 为力误差, 也就是 $f_r - f$; $f(t)$ 为辅助项。

由系统实际工作环境可知, 参考力和环境位置均为定值, 于是两个参数的前两阶导数均等于 0。将式(14)代入式(9)可得

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} + (k_d + k_{eq})e = k_d(f_r + k_{eq}x_e) - k_d k_{eq}x_r \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)可得

$$\ddot{e} + a(t)\dot{e} + b(t)e = h(t) \quad (18)$$

式中: $a(t), b(t), h(t)$ 为简化公式所加入的变量系数, 具体表达式为

$$a(t) = b_d + k_d k_{eq} k_d(t)/m_d \quad (19)$$

$$b(t) = k_d + k_{eq} + k_d k_{eq} k_p(t)/m_d \quad (20)$$

$$h(t) = k_d[x_r(0) + f_r + k_{eq}x_e - k_d k_{eq}f(t)]/m_d \quad (21)$$

在设计自适应控制器时, 采用参考模型法并结

合系统控制参数,由 Lyapunov 稳定理论可知,确定调整值函数的系数变化规律,可实现系统跟参考模型的控制结果相一致。

式(18)的标准二阶线性表达为

$$\ddot{e}_m + 2\xi\omega\dot{e}_m + \omega^2 e_m = 0 \quad (22)$$

式中: e_m 为期望力偏差大小; ω 为二阶线性系统阻尼比; ξ 为二阶线性系统无阻尼自然频率。

由式(18)和式(22)比较可得

$$\ddot{e} + 2\xi\omega\dot{e} + \omega^2 e_m = \delta_a(t)\dot{e} + \delta_b(t)e + \delta_c(t) \quad (23)$$

由 Lyapunov 方程及其稳定性理论 $\dot{V} > 0$ 和 $\dot{V} < 0$, 可得

$$V = (\omega^2 + 2w_p\xi\omega - w_p^2)\epsilon^2 + q^2 + [\delta_c(t) + \beta_0 q]^2/\alpha_0 + [\beta_1 q\dot{e} - \delta_a(t)]^2/\alpha_1 + [\beta_2 q\dot{e} - \delta_b(t)]^2/\alpha_2 \quad (24)$$

式中: α_i, β_i 为任意正实数, $i=1, 2, 3$; w_p 为任意常数, $q = w_p\epsilon + \dot{\epsilon}$ 。可以看出,为了满足 $\dot{V} > 0$, 则要满足 $(\omega^2 + 2w_p\xi\omega - w_p^2) > 0$, 即 $0 \leq w_p < 2\xi\omega$ 。

对式(24)求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\dot{\epsilon}(w_p - 2\xi\omega) - 2w_p\omega^2\epsilon^2 - 2\beta_0 q^2 - 2\beta_1 (q\dot{e})^2 - 2\beta_2 (q\dot{e})^2 + \\ & 2[\delta_c(t) + \beta_0 q]\{q + [\dot{\delta}_c(t) + \beta_0 \frac{dq}{dt}]/\alpha_0\} + \\ & 2[\beta_1 q\dot{e} - \delta_a(t)]\{q\dot{e} + [-\dot{\delta}_a(t) + \beta_1 \frac{d(q\dot{e})}{dt}]/\alpha_1\} + \\ & 2[\beta_2 q\dot{e} - \delta_b(t)]\{q\dot{e} + [-\dot{\delta}_b(t) + \beta_2 \frac{d(q\dot{e})}{dt}]/\alpha_2\} \end{aligned} \quad (25)$$

同理,为了满足 $\dot{V} < 0$, 则以下条件必须成立

$$\left. \begin{aligned} q + [\dot{\delta}_c(t) + \beta_0 \frac{dq}{dt}]/\alpha_0 &= 0 \\ q\dot{e} + [-\dot{\delta}_a(t) + \beta_1 \frac{d(q\dot{e})}{dt}]/\alpha_1 &= 0 \\ q\dot{e} + [-\dot{\delta}_b(t) + \beta_2 \frac{d(q\dot{e})}{dt}]/\alpha_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

通过求解式(26)即可获取系统位置与接触力差值方程式中的时变参数

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= f(0) + \gamma_{00} \int_0^t q dt + \gamma_{01} q \\ k_d(t) &= k_d(0) - \gamma_{10} \int_0^t q\dot{e} dt - \gamma_{11} q\dot{e} \\ k_p(t) &= k_p(0) - \gamma_{20} \int_0^t qe dt - \gamma_{21} qe \\ q &= w_p(e - e_m) + (\dot{e} - \dot{e}_m) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

5 实验

通过以上分析,对系统垂直方向与外界环境作用力进行控制实验,具体实验装置如图 1 所示。实

验室以系统上平台圆心为初始原点,圆心运动轨迹的起始坐标和终点坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 2000)$, 位移 s 单位为 μm , 各个坐标轴向的阻抗值分别为 $k_d = 1600 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, $b_d = 2 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, $m_d = 0.5 \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ 。

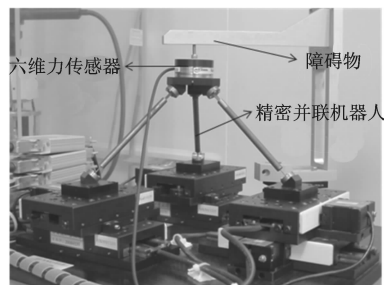
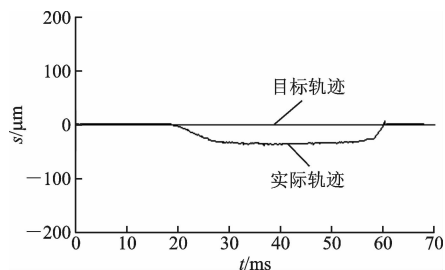


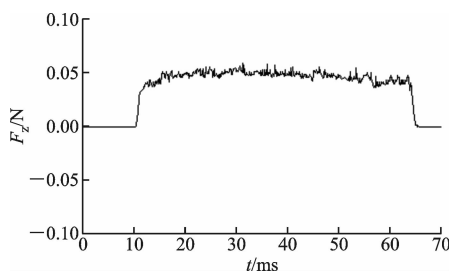
图 1 3-PPSR 柔性并联机器人阻抗控制实验装置

如图 2 所示为基于位置的阻抗控制响应曲线。实验分别记录了 3 个坐标轴向的位置响应曲线和上平台与外界环境之间的接触力响应曲线,其中直线为目标轨迹,曲线为实际轨迹。由图 2 可以看出,在系统末端上平台受到外界环境作用力时,轴向的位置和力响应变化明显,经过力控制转换后,通过力控制将系统位置偏差减小,使得末端上平台位置和接触力回到期望值。同时,在另外两个坐标轴方向,受轴向力的影响,会存在一定系统位置和接触力的调整偏差值。通过实验可以得出,在外界环境参数明确的条件下,3-PPSR 柔性并联机器人的基于位置的阻抗控制可以达到 $\pm 0.05 \text{ N}$ 的力控制精度。

自适应阻抗力控制利用安装在上平台的六维力传感器进行接触力反馈,设定上平台圆心原点 $Z=0$



(a) X 方向位置响应



(b) X 方向力响应

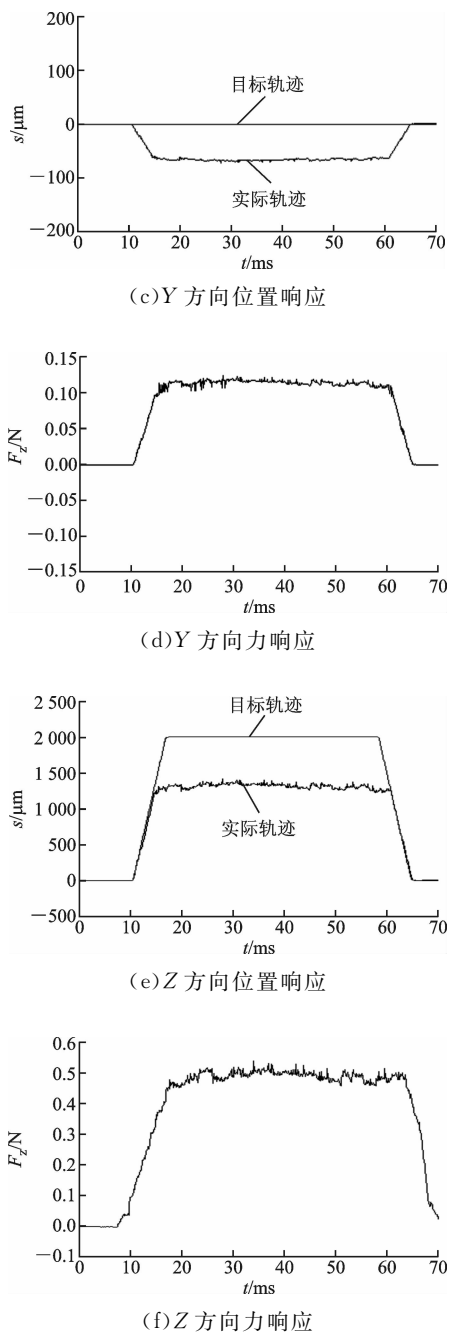


图 2 3-PPSR 精密并联机器人阻抗控制实验结果

μm , 目标环境接触力 $f=0.8\text{ N}$, 其他外界环境未知。

实验过程中, 控制压电马达驱动上平台垂直向上位移, 所经历运动过程的实验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 位置响应和接触力响应变化分为 3 个阶段: 在系统末端上平台与外界环境接触前, 位置响应和力响应均没有变化; 随着上平台与外界环境接触, 由于实际接触力与目标接触力差值大, 位置响应和力响应迅速增大; 最后随着 f 增大 f 减小, 位置响应和力响应变化平缓并最终达到稳定状态。自适应阻抗力控制实现了未知环境变量和数学模型条件下对系统的力控制, 且末端控制精度在 $\pm 0.1\text{ N}$ 。

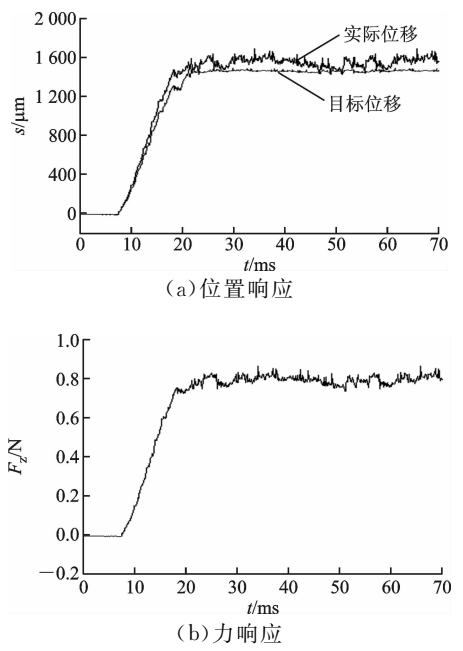


图 3 自适应阻抗力控制实验结果

6 结 论

通过对 3-PPSR 柔性并联机器人力跟踪模型的稳态误差分析, 在已知精确的环境参数情况下, 通过调整初始参考位置得到精确力控制的效果, 研究了两种基于位置的阻抗力控制柔顺控制方法。一种是利用精确环境变量实现基于位置的外力跟踪控制, 获得精确的力控制效果; 另一种是在不确定外部环境变量的条件下, 利用自适应控制器控制力偏差实现自适应力控制。两种方法都能实现 $0\sim 1\text{ N}$ 范围内的力控制, 实验结果表明: 采用基于位置的阻抗力控制器, 力控制精度达到 $\pm 0.05\text{ N}$; 采用自适应阻抗力控制器, 力控制精度达到 $\pm 0.1\text{ N}$, 满足设计要求, 验证了方法的有效性。

参考文献:

[1] 刘善增, 朱真才, 王洪欣, 等. 柔性并联机器人的研究进展 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(5): 1-7.

LIU Shanzeng, ZHU Zhencai, WANG Hongxin, et al. Recent development of flexible parallel manipulators [J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2010(5): 1-7.

[2] WHITNEY D E. Historical perspective and state of the art in robot force control [J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(1): 3-14.

[3] MASON M T, SALISBURY J K. Robot hands and the mechanics of manipulation [M]. Cambridge, MA,

- USA: MIT Press, 1985: 3-93.
- [4] SALISBURY J K. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates [C]// Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1980: 95-100.
- [5] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation; I theory, II implementation, III applications [J]. ASME Transactions Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control; B, 1984, 107(1): 304-313.
- [6] LIU K, GLENN R. Stewart-platform-based inlet duct painting system [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 106-112.
- [7] YANG Chifu, HUANG Qitao, JIANG Hongzhou, et al. PD control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45: 666-677.
- [8] BELLAKEHAL S, ANDREFF N, MEZOUAR Y, et al. Vision/force control of parallel robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(1): 1376-1395.
- [9] CACCAVALE F, SICILIANO B, VILLANI L. The tricept robot: dynamics and impedance control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(2): 263-268.
- [10] BRUZZONE L E, MOLFINO R M, ZOPPI M. Modelling and control of peg-in-hole assembly performed by translational robot [C]// Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. Calgary, Alberta, Canada: Acta Press, 2002: 512-517.
- [11] 刘伊威. DLR/HIT 仿人灵巧手系统及手指柔顺控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 83-90.
- [12] FASSE E D, GOSSELIN C M. On the spatial impedance control of Gough-Stewart platforms [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 1749-1754.
- [13] SURDILOVIC D. Contact stability issues in position based impedance control: theory and experiments [C]// Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1996: 1675-1680.
- [14] SURDILOVIC D, COJBASIC Z. Robust robot compliant motion control using intelligent adaptive impedance approach [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 2128-2133.

(编辑 武红江)

(上接第 78 页)

- [10] PROKOPOV O, SHIMA T. Linear quadratic optimal cooperative strategies for active aircraft protection [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2013, 36(3): 753-764.
- [11] GARCIA E, CASBEER D W, PACHTER M. Cooperative strategies for optimal aircraft defense from an attacking missile [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(8): 1510-1520.
- [12] SHAFERMAN V, SHIMA T. Cooperative multiple-model adaptive guidance for an aircraft defending missile [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(6): 1801-1813.
- [13] 邹昕光, 周荻, 杜润乐, 等. 大气层外主动防御三维自适应滑模制导律 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2): 365-371.
- ZOU Xinguang, ZHOU Di, DU Runle, et al. Active defense exo-atmospheric adaptive sliding mode guidance law in three dimensions [J]. System Engineering and Electronics, 2015, 37(2): 365-371.
- [14] 邹昕光, 周荻, 杜润乐, 等. 主动防御非奇异终端滑模协同制导律 [J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 476-483.
- ZOU Xinguang, ZHOU Di, DU Runle, et al. Active defense nonsingular terminal sliding mode cooperative guidance law [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(3): 476-483.
- [15] ZARCHAN P. Tactical and strategic missile guidance [M]. 3rd ed. Reston, VA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997: 143-205.
- [16] BRYSON A, HO Y C. Applied optimal control [M]. Waltham, MA, USA: Blaisdell Publishing Company, 1969: 148-176.
- [17] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2009, 54(6): 1254-1269.
- [18] BAR-SHALOM Y, LI X R, KIRUBARAJAN T. Estimation with application to tracking and navigation [M]. New York, USA: Wiley, 2001: 742-746
- [19] OSHMAN Y, ARAD D. Differential-game-based guidance law using target orientation observations [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 316-326.

(编辑 刘杨)