基于速度闭环的自适应力位控制算法

孔民秀，游 玮，杜志江，孙立宁

（哈尔滨工业大学 机器人研究所 哈尔滨 150080，exk@hit.edu.cn）

摘 要：针对力觉主手力控制中接触刚度时变的特殊要求，提出了一种含有速度闭环的自适应力/位混合控制算法.通过构造系统特定的标量函数，证明可以通过选择合适的自适应参数更新律，使得在该控制律和更新律的共同作用下追踪力误差是有界的，力误差的导数是平方可积的.利用 Barbalat 引理证明了该控制算法具有全局渐近稳定性.给出了主手力控制系统的体系结构，并对不同频率正弦力信号进行了跟踪实验.实验结果表明：对于同样频率的力信号，所提出的方法跟踪误差小于常规阻抗控制方法，整个控制系统稳定并具有良好的控制特性.实验分析了控制律中各关键参数对控制品质的影响.

关键词：力觉主手；力位混合控制；自适应控制；Barbalat 引理

中图分类号：TP242 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)03－0409－05

Adaptive force/position control algorithm with closed loop of velocity for the haptic device

KONG Min-xiu, YOU Wei, DU Zhi-jiang, SUN Li-ning

(Robot Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, exk@hit.edu.cn)

Abstract: Aiming at the time-varying contact stiffness in haptic force/position control, an adaptive force/position control algorithm with closed loop of velocity is presented. Based on the definition of the specific scalar function of the system, the proper adaptive update law can be fixed. With the control law and update law, it can be proved that the error of tracking force is finite limit and its derivative function is square integrable. Then with Barbalat lemma the whole control algorithm is proved to be globally asymptotically stable. The architecture of hardware of the whole control system is given. The result of experiments of sinus force tracking shows that the tracking error of this algorithm is less than that of the normal impendence control algorithm at the same signal frequency. The whole control system is stable and has an excellent control quality. Effects of key parameters of the control law are also presented by analyzing the experimental results.

Key words: haptic device; force/position control; adaptive control; barbalat lemma

主从遥操作机器人系统是20世纪50年代随着核工业发展而发展起来的，借助人的参与和操纵，能够在人无法进入或对人体有害的环境中完成比较复杂的任务[1].力觉主手作为主从遥操作机器人系统的关键设备，是控制端机械手进行实时运动控制的输入设备.遥操作强调“临场感”，要求操作者的操作意图能够真实地再现到从动机器人端，主手能够真实地再现从端机械手与作业环境接触的力，为操作者提供操作所需的力感觉信息.而这些需要由一个具有良好的动态特性，并具有较高透明度的力控制控制系统的支持.因此，力觉主手控制系统及相应控制算法的研究成为力觉主手设计与研制过程中的核心与难点[2-5].文献[6]提出了同时非矛盾性地控制力和位置的概念，并在关节空间实现柔顺的思想，但是对机器人的不同关节根据具体的任务要求分别独立地进行力和位置控制，具有局限性.文献[7]在文献[6]

收稿日期：2008－10－08.

基金项目：国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA040103)；
长江学者创新团队计划资助项目(IRT0423).

作者简介：孔民秀(1972—)，男，博士，讲师；
杜志江(1972—)，男，教授，博士生导师；
孙立宁(1964—)，男，教授，博士生导师.

的基础上提出了力/位混合控制. 文献[8]提出了基于运动学模型的阻抗控制方法,简称(IFC),并被广泛应用在机器人的力控制策略中[9-12].

本文针对主手力控制中接触刚度是变化的这一特殊要求,在IFC的基础上,提出了一种含有速度闭环的自适应力/位控制算法,并给出了相应的控制系统设计和实验对比.

1 含有速度闭环的自适应力/位控制算法

1.1 算法设计

对于位置内环,采用PI控制器进行速度控制,可以实现速度的无差跟踪. 设 $\dot{x}_d(t)$ 是理想的速度给定,也是速度闭环的输入量. 机器人的末端位置为 $x(t)$,速度为 $\dot{x}(t)$. 速度环的跟踪误差定义为

$$\Delta\dot{x}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_d(t). \tag{1}$$

力觉主手的模型可以简化为一个二阶系统,PI控制器可以实现速度环的无差跟踪,即

$$\lim_{t\to\infty}\Delta\dot{x}(t) = 0. \tag{2}$$

力觉主手的接触环境为操作者手,显然是一个刚度变化的柔性环境,操作者与主手的作用力是时变的,在主手末端装有6维力/力矩传感器,可以检测主手力的输出. 设检测到的力为 $f_c(t)$,这个接触力可以用如下的刚度模型来描述:

$$f(t) = k(t)(x(t) - x_e(t)). \tag{3}$$

其中 k 表示与手接触时的刚度,它是一个与人手运动、人手臂姿态以及手与手柄握紧程度相依赖的变化的物理量. 式(3)中 $x_e(t)$ 表示操作者手所处的位置,显然这个参数也是变化的. 用 $\gamma = 1/k$ 表示机器人与环境接触的柔性,简称柔度. 上式可以写成

$$x(t) = \gamma(t)f(t) + x_e(t).$$

力觉主手的力控制的特点不同于前述文献,主手与操作者手之间的接触环境是柔性的,且接触刚度是变化的,而人手由于是握住手柄,所以是与主手末端一起运动. 为了真实描述这种变化关系,通过在线辨识获得实际的柔度,本文提出了一种含有速度闭环自适应力控制算法(Adaptive Force Controller with Velocity Loop Algorithm),以下简称(AFCV),控制结构如图1所示,微分方程形式如下:

$$\dot{x}_d(t) = -\hat{\gamma}(t)\dot{f}_d(t) + K_f\Delta f(t) + \dot{x}(t). \tag{4}$$

式中:K_f 为力反馈系数,$\hat{\gamma}$ 为环境柔性的 γ 在线估计. 自适应更新律为

$$\dot{\hat{\gamma}}(t) = -\alpha F(t). \tag{5}$$

其中:参数 α 是自适应增益,$F(t)$ 为待定的表达式. 自适应更新率(估计器)的设计和控制器的设计是相对分开的[13],估计率是独立于控制率的选择的,其核心原则是使所设计的估计率和控制率共同作用下系统能渐进稳定,所以先确定了估计率的一般形式,然后根据所构造的能量梯度函数的要求来确定 $F(t)$.

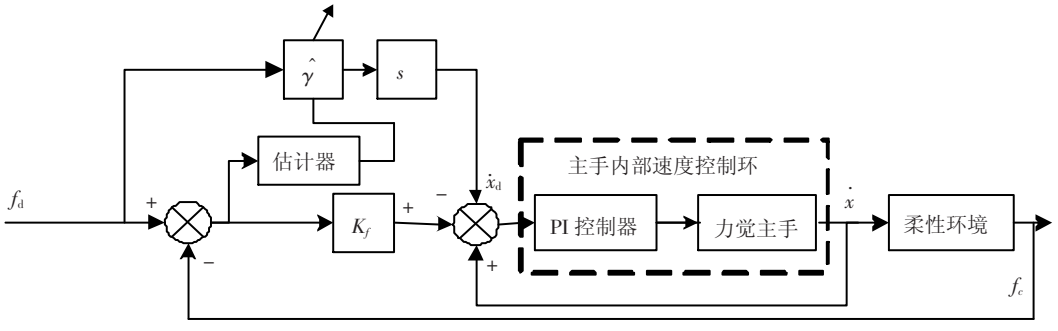


图1 含有速度闭环自适应力控制算法框图

1.2 算法稳定性分析与自适应更新率确定

由于操作者具有主动控制能力和操作者的手组织具有柔软特性,在主手运动出现较大的波动时,操作者会主动调节与主手的接触刚度,导致二者之间的接触力不会出现大的突变;正常操作时操作者也不会突然加大操作力度导致操作力出现很大的突变. 可以认为手与主手之间的接触力是一个存在二阶导数且二阶导数为有界的物理量,即 $f(t) \in L_2$. 基于这一点,对其稳定性进行分析,并确定具体的自适应更新律表达式. 根据刚度与柔度的关系:$k = 1/\gamma$,代入式(4)整理后得

$$k\dot{x}(t) - \dot{f}_d(t) + kK_f\Delta f(t) = k\tilde{\gamma}(t)\dot{f}_d(t) + k\dot{x}_d. \tag{6}$$

式中:

$$\tilde{\gamma}(t) = \hat{\gamma}(t) - \gamma$$

代表了柔性估计误差. 由力模型式(3)可知 $f(t) = k(x(t) - x_e(t))$,$\Delta f(t) = f(t) - f_d(t)$,从而式(6)可以写成如下形式:

$$\Delta\dot{f}(t) + kK_f\Delta f(t) = k\tilde{\gamma}(t)\dot{f}_d + \psi(t). \tag{7}$$

其中:$\psi(t) = k(\dot{x}_d(t) - \dot{x}_e(t))$,由于系统的速度

控制是无差系统，由式(1)，(2) 可知

$$\lim_{t\to\infty}\dot{x}_{\mathrm{d}}(t)-\dot{x}(t)=0.$$

又因为手与设备之间相对运动与手与设备握紧程度有关，当把握比较紧时，这种相对运动就会变小，而且柔度变化也会随之减小. 可以认为满足：

$$\lim_{t\to\infty}\dot{x}(t)-\dot{x}_e(t)=0,\text{且}\lim_{t\to\infty}\dot{\gamma}=0,$$

故有

$$\lim_{t\to\infty}\psi(t)=k\{\lim_{t\to\infty}[\dot{x}_{\mathrm{d}}(t)-\dot{x}(t)]+\lim_{t\to\infty}[\dot{x}(t)-\dot{x}_{\mathrm{e}}(t)]\}=0.$$

这说明 $\psi(t)\in L_2$. 因此存在一个正数：$0\leqslant M\leqslant\infty$，满足

$$\int_0^t\psi^2(\tau)\mathrm{d}\tau\leqslant 4kK_fM. \tag{8}$$

定义标量函数：

$$V(t,\Delta f,\tilde{\gamma})=0.5\Delta f(t)^2+1/(2\alpha)k\tilde{\gamma}(t)^2+M-\frac{1}{4kK_f}\int_0^t\psi^2(\tau)\mathrm{d}\tau. \tag{9}$$

由式(9) 知，对于所有 t，有 $V(t,\Delta f,\tilde{\gamma})\geqslant 0$. 但是由于 $V(t,0,0)=M$，而 M 可能不为0，所以严格上说，函数 $V(t,\Delta f,\tilde{\gamma})$ 并不是 Lyapunov 函数，故不能直接用 Lyapunov 稳定性判据来进行稳定性判断. 对式(9) 微分后，考虑到 $\dot{\tilde{\gamma}}(t)\gg\dot{\gamma}(t)$(即接触柔度为缓变量)，故有 $\dot{\tilde{\gamma}}(t)=\dot{\gamma}(t)$. 将式(5) 代入，得

$$\dot{V}(t,\Delta f(t),\tilde{\gamma})=-\left\{\sqrt{kK_f}\Delta f(t)-\frac{1}{2\sqrt{kK_f}}\psi(t)\right\}^2+k\tilde{\gamma}(t)(\dot{f}_{\mathrm{d}}(t)\Delta f(t)-F(t)).$$

可知只需使 $F(t)=\dot{f}_{\mathrm{d}}(t)\Delta f(t)$，即柔度更新率设定为下式：

$$\dot{\tilde{\gamma}}(t)=-\alpha\dot{f}_{\mathrm{d}}(t)\Delta f(t),$$

即可对于任意 t，$\dot{V}(t,\Delta f(t),\tilde{\gamma})\leqslant 0$，而 $V(t,\Delta f(t),\tilde{\gamma})\geqslant 0$，从而确定了 $\Delta f(t)$ 和 $\tilde{\gamma}(t)$ 是有界的，且 $\dot{\tilde{\gamma}}(t)$ 也是有界的. 且有

$$\int_0^\infty\left\{\sqrt{kK_f}\Delta f(t)-\frac{1}{2\sqrt{kK_f}}\psi(t)\right\}^2\mathrm{d}t\leqslant V(0,\Delta f(t),\tilde{\gamma}(0))<\infty.$$

则

$$\left\{\sqrt{kK_f}\Delta f(t)-\frac{1}{2\sqrt{kK_f}}\psi(t)\right\}\in L_2,$$

根据式(8)知

$$(1/(2\sqrt{kK_f}))\psi(t)\in L_2,$$

根据 Minkowski[14] 定理，有

$$\sqrt{kK_f}\Delta f(t)=(\sqrt{kK_f}\Delta f(t)-(1/(2\sqrt{kK_f}))\psi(t))+((1/(2\sqrt{kK_f}))\psi(t))\in L_2. \tag{10}$$

由式(10)知 $\Delta f(t)\in L_2$，且从式(7) 可知，$\Delta\dot{f}(t)$ 是有界的，由 Barbalat 引理[15] 可知

$$\lim_{t\to\infty}\Delta f(t)=0.$$

因此，得到控制方法为全局稳定且可以渐近跟踪理想力.

如果当操作者与手柄相握不紧时，则 $\dot{x}(t)-\dot{x}_{\mathrm{e}}(t)\neq 0$，使 $\lim_{t\to\infty}\psi(t)\neq 0$，但从实际系统出发，必存在一个正数 M，满足 $\lim_{t\to\infty}\psi(t)\leqslant M$. 此时，柔度估计误差是渐近有界的，即 $\lim_{t\to\infty}\tilde{\gamma}(t)\leqslant M_1(M_1\geqslant 0)$；理想力变化率是有界的，即

$$|f_{\mathrm{d}}(t)|\leqslant M_2(M_2\geqslant 0).$$

由式(7) 可得

$$\limsup_{t\to\infty}|\Delta f(t)|\leqslant(1/K_f)(M_1M_2+M).$$

说明此时力误差 $\Delta f(t)$ 是有界的，并且可以通过增大力反馈系数 K_f 使其尽量小，无论在操作者与手柄相握是否紧密，都可以通过增加增大力反馈系数 K_f 来获得良好的力跟踪效果.

2　实验验证

针对主手对不同频率的正弦力、弹性力、阻尼力以及零力信号跟踪性能进行了实验测试. 以验证控制算法的有效性. 图 2 为实验所用力觉接口设备控制系统的体系结构，包括运动控制模块，采集测量模块、运动状态检测与安全保护模块.

为了检验主手在采用该控制方法后力跟踪特性，进行了下面实验：程序生成一个施加在 z 轴方向上的理想力，操作者握住主手手柄，在 z 向上做自由运动，通过检测传感器的输出来验证力的跟踪特性，并与阻抗控制方法的效果进行对比.

施加的理想力为

$$f_{\mathrm{d}}=3+2\sin(2\pi ft).$$

频率取值分别为 0.5、1.5、5.0 Hz. 人手握住手柄做随机运动，同时，随着抓握紧密程度的变化，接触刚度也是时变的，这些因素都会对力跟踪效果造成影响. 图 3(a) ~ (f) 给出了采用阻抗控制和采用本文中控制器的力跟踪曲线. 从图中可看出：对于同样频率的力信号，采用本章的方法误差较文献[8]阻抗控制(IFC)追踪误差小. 对于力信号频率较低(<5 Hz)的操作，主手可以实现良好的力的跟随，具有良好的透明度.

在实验过程中，同时进行控制参数变化对力跟踪效果影响的研究. 图4 给出了不同 K_f 值(分别取 0.5，1.0，3.0 和 10.0) 下对力信号跟踪误差曲线，显然 K_f 越大，误差越小，但过大的 K_f 会引起系统的输出饱和.

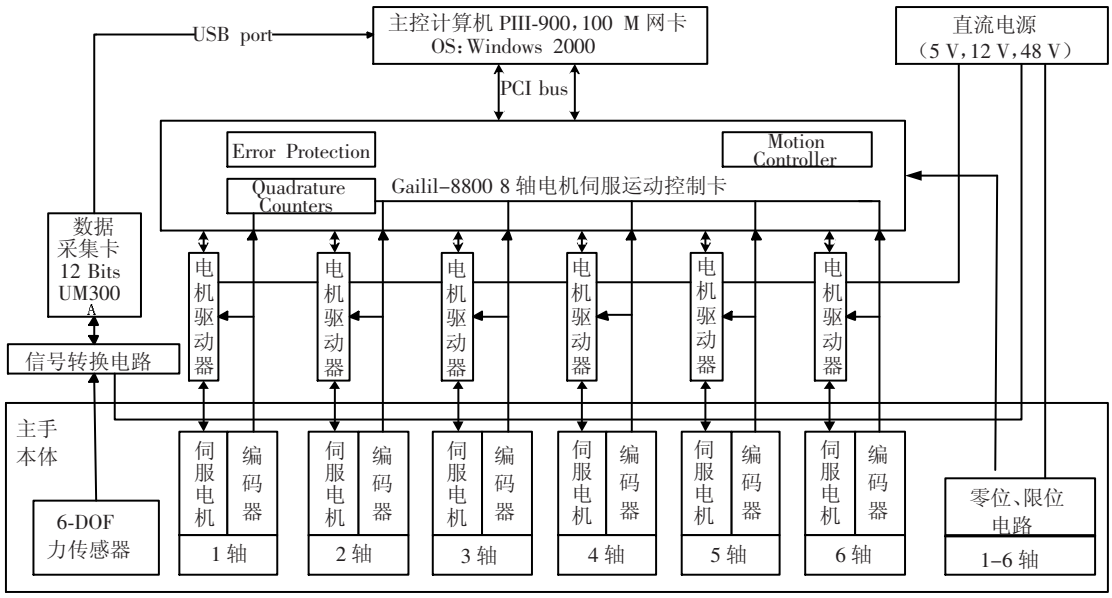
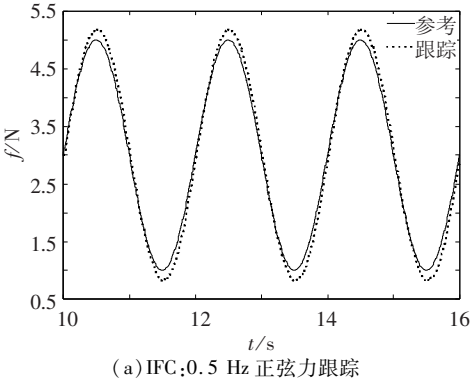
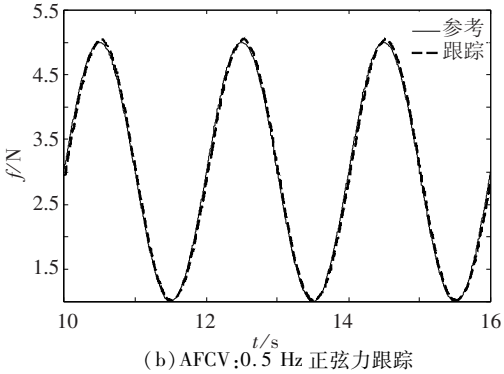


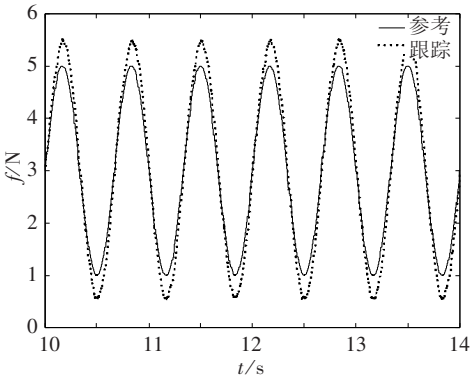
图 2 系统总体结构



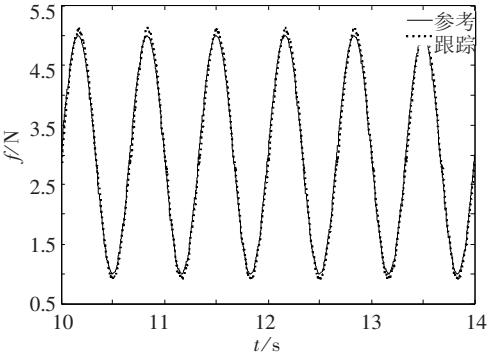
(a) IFC：0.5 Hz 正弦力跟踪



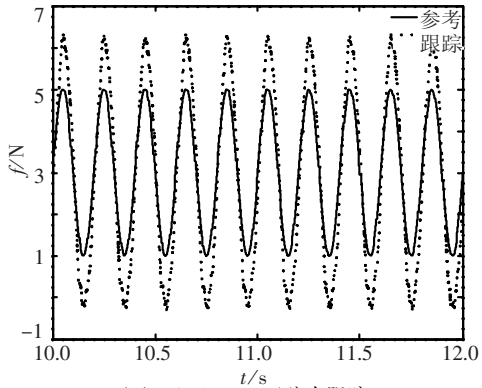
(b) AFCV：0.5 Hz 正弦力跟踪



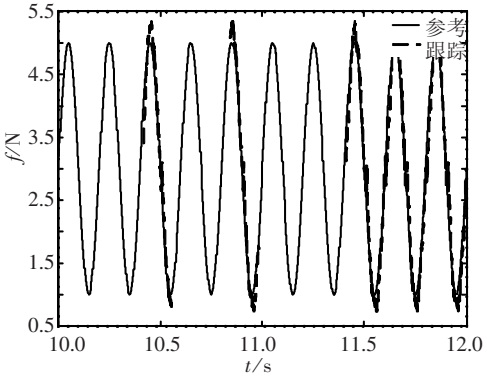
(c) IFC：1.5 Hz 正弦力跟踪



(d) AFCV：1.5 Hz 正弦力跟踪



(e) IFC：5.0 Hz 正弦力跟踪



(f) AFCV：5.0 Hz 正弦力跟踪

图 3 人手牵引扰动下两种控制方法对正弦力的跟踪曲线

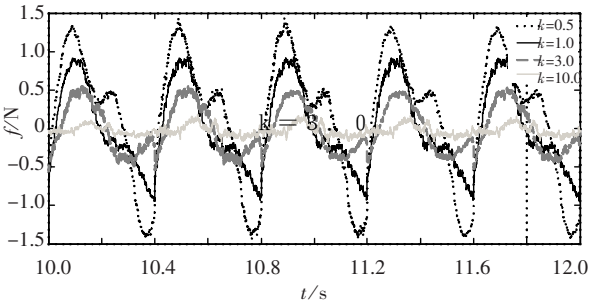


图 4　K_f 值对跟踪误差的影响

为了考察公式(5)中数 α 对柔度系数 γ 收敛性的影响，在实验条件不变的情况下，改变 α 值，测试其对 γ 收敛性的影响. 结果如图 5 所示，表明对应 α 的不同取值，γ 都是收敛的. 而且，α 的值越大，收敛得越快，但过大的 α 值会使迭代过程对噪声变得更敏感，令输出有振动，不利于输出力的保真，但过小的 α 值会使对刚度变化不敏感，造成输入与输出产生很大的误差，因此这个值要选取合适，本实验最终取值为 $\alpha = 3$.

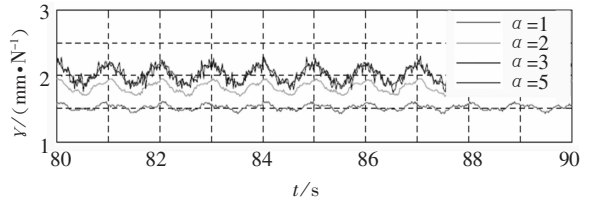


图 5　α 对柔度系数 γ 收敛性的影响

实验结果表明，采用位置/速度和力自适应控制器的力觉主手能够实现对力信号的快速跟踪，并能同参数缓慢变化的环境作用时保持良好的稳定性.

3　结　论

1)本文所提出的含有速度闭环的自适应力控制算法可通过在线识别环境刚度达到对环境刚度变化的自适应性，并可证明其具有全局稳定性.

2) 对于同样频率的力信号，采用本文所提出的方法跟踪误差较常规阻抗控制方法追踪误差要小. 整个控制系统具有良好的控制特性.

3) 控制参数中力反馈系数 K_f 和自适应增益参数 α 对整个控制系统特性影响较大. K_f 越大，误差越小，但是过大的 K_f 会引起系统的输出饱和. α 越大，收敛的越快，但过大的 α 值会使迭代过程对噪声变得更敏感，过小的 α 值会使其对刚度变化不敏感.

参考文献：

[1] GOERTZ R C. Fundamentals of gerneral-purpose remote manipulators [J]. Journal of Nucleonics, 1952, 10(11):36 – 42.

[2] MARIN R, SANZ P J. A Predictive Interface on Virtual and Augmented Reality for Task Specification in a Web Telerobotics System [C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems. Lausaunne, Switzerland:[s n], 2002:3005 – 3010.

[3] ADAMS R J, HANNAFORD B. Control law design for haptic interfaces to virtual reality [J]. IEEE Transaction on Control systems Technology, 2002, 10(1):3 – 13.

[4] LEE C D. Modeling mechanism and hand impedances for improved control of haptic interfaces [D]. [S.l,]: University of Colorado,2002:1 – 13.

[5] LAWRENCE D A, PAO L Y, DOUGHERTY A M. Human perception of friction in Haptic Interfaces [C]//Proceedings of ASME International. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dynamic Systems and Control Division. Anaheim,USA:[s n], 1998:287 – 294.

[6] MASON M. Compliance and force control for computer controlled manipulators [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics,1981,11(6):418 – 432.

[7] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators [J]. Journal of Dynamics Systems Measurement and Control,1981, 103(2):126 – 133.

[8] ROY J, WHITCOMB L L. Adaptive force control of position/velocity controlled robots: Theory and Experiment [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(2): 121 – 137.

[9] XIE Y, SUN D, LIU C, *et al.* An Adaptive Impedance Force Control Approach for Robotic Cell Microinjection [C]//Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France:[s n], 2008: 907 – 912.

[10] GIACOMO Z, ANTONIO V, GIOVANNI L. Iterative learning explicit hybrid force/velocity control for contour tracking [C]//Proceeding of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich, Switzerland:[s n], 2007:871 – 876.

[11] MEHRZAD N, FARHAD A. Adaptive force control of robots in presence of uncertainty in environment[C]// Proceeding of the American Control Conference. Minneapolis,USA:[s n], 2006:3253 – 3258.

[12] DUSHYANT P, TANNER H G. Hybrid velocity/force control for robot navigation in compliant unknown environments [J]. ROBOTICA, 2006, 24(6): 745 – 758.

[13] SLOTINE J J E, LI W. Applied Nonlinear Control [M]. [S. l.]: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.

[14] 薛小平，孙立民，武立中. 应用泛函分析 [M]. 第 2 版. 北京：电子工业出版社，2006:38 – 40.

[15] TAO G. A simple alternative to the Barbalat lemma [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 42(5): 698.

（编辑　杨　波）