

遥操作系统基于观测器的预测控制

陈启宏¹, 费树岷², 全书海¹, 宋爱国³

(1. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096;

3. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 在遥操作系统中需要主、从机械手间进行通信, 但通信通道中存在较大的通讯时延, 这会降低系统操作性能, 甚至会使系统不稳定. 为了解决这个问题, 首先建立系统的状态空间模型, 接着提出用时间前向观测器预测从机械手状态, 并结合力、位置和速度反馈消除或减小时延对系统影响. 系统反馈参数可方便地通过线性矩阵不等式求解. 该方法能使系统渐近稳定而且具有良好的透明性. 仿真结果表明该方法是有用的.

关键词: 遥操作; 时延; 透明性; 状态观测器; 预测

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Predictive control of teleoperation systems based on observer

CHEN Qi-hong¹, FEI Shu-min², QUAN Shu-hai¹, SONG Ai-guo³

(1. Automation College, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China;

2. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

3. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In a teleoperation system, it is desirable to communicate states of the master and slave to each other. However, there exist communication time delays in transmission channels of a teleoperation system. Time delay will worsen the performance of the system. Moreover, the entire system tend to become unstable due to time delay. In order to eliminate or reduce the effect of time delay on the system, first of all, state space model of the system was derived. Secondly, time forward observer of the slave was established in local controller and the observer was employed to predict the state of the slave. Thirdly, force, state of the master and predicted state were used to design state feedback controller. Finally, stability and transparency condition was achieved. Feedback parameters could be easily obtained by solving a linear matrix inequality. In a word, the above method can ensure that the system is stable and the transparency is good. The results of the simulation show the effectiveness of the conclusion.

Key words: teleoperation; time delay; transparency; observer; predict

1 引言(Introduction)

具有临场感的遥操作机器人系统的实现, 将极大地改善遥操作机器人的作业能力, 人们可以将自己的智慧和技能同遥操作机器人的适应能力相结合而完成有害环境或远距离下的作业任务. 但目前还有一个问题限制着遥操作机器人的广泛应用: 由于远地从机械手和本地控制站间的距离较远, 两者间的信号传输存在着较大的通讯时延. 这样大的纯时延严重影响了系统的正常工作, 降低系统操作性能, 甚至造成系统不稳定. 所以设计控制器消除或减少通讯时延对系统的影响具有十分重要的意义.

1989 年 Anderson^[1]利用散射算子分析法提出一

种无源控制算法可以保证系统在时延下的稳定性, 1991 年 Nimeryer^[2]从能量传递的角度出发, 提出了一种类似的无源控制算法. 上述两种无源控制算法虽然可以保证系统的稳定性, 然而其代价是降低了系统的操作性能, 而且只适用于信号传输时延在 2 s 以下的小时延情况. Hashtrudi-Zaad^[3]用 4 通道的方法分析了系统的操作性能, 并最终用 3 通道实现, 但并不能使透明性达到最佳. 文献[1~5]在保证系统稳定性的同时, 也对透明性进行了分析, 但都没有达到最佳透明性, 且在控制中需要用到主、从手的加速度, 增加了系统的实现难度. Munir^[6]提出用观测器对从手状态进行观测的思想, 但不一定能保证系

统的稳定性和良好的透明性. Gallegos^[7]提出了位置、速度反馈方法,并在状态空间下对系统进行设计. Arcara^[8]对所有的控制方法进行了比较,并提出了评价标准.

本文提出用时间前向观测器预测从手状态,并用主从手的力、位置和速度反馈消除或减小时延对系统影响.在对控制器参数充分分析的基础上,所设计的控制器使系统具有良好的透明性和稳定性.利用本文的方法不需要测量主、从机械手的加速度,增加了控制器的可实现性,而且主、从机械手的跟踪时间比传统的方法要短.

2 遥操作机器人系统的构成 (Teleoperation system configuration)

力觉临场感遥操作机器人系统的结构如图1所示,它由操作者、主机械手、通讯环节、从机械手和环境构成.操作者的位置指令通过主机械手、通讯环节和从机械手作用于环境,而环境对从机械手的作用力经过上述环节返回给操作者.在力觉临场感理想状态下(即无通信时延),从机械手工作稳定,从手的速度等于主手的速度,操作者受力等于环境对从手的作用力.

由于距离和通信带宽的影响,通信环节不可避免地存在通信时延,本文设 T_R, T_L 分别为前向时延和反向时延,并讨论时不变的情况.时变情况将另文讨论.

图1所示的力觉临场感遥操作机器人系统动力学模型:

主机械手:

$$f_h = M_m \dot{v}_m + B_m v_m + u_{dm}. \quad (1)$$

从机械手:

$$u_d = M_s \dot{v}_s + B_s v_s + f_e. \quad (2)$$

通讯环节:

$$u_d(t) = u_m(t - T_R), u_{dm} = u_s(t - T_L). \quad (3)$$

环境:

$$f_e = M_e \dot{v}_s + B_e v_s + K_e x_s. \quad (4)$$

其中: M, B, K 分别表示质量、阻尼和弹性系数;下标 m, s, e 分别表示主机械手、从机械手和环境; v_m, v_s 表示主、从手速度;用 x_m, x_s 表示主、从手位置; f_h 为操作者对主机械手的作用力; f_e 为从机械手和环境的作用力; u_d 为对从手的控制量; u_{dm} 为对主手控制量.

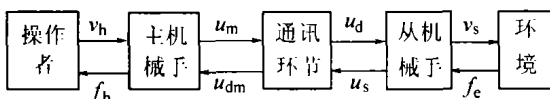


图1 遥操作机器人系统结构

Fig. 1 Configuration of a teleoperation system

本文的主要内容是在时延存在的条件下设计控制器使得系统稳定并透明.下面首先设计系统控制器,然后通过时间前向观测器实现,接着进行稳定性和透明性分析.

3 主要结果 (Main results)

3.1 控制器设计 (Controller design)

主机械手当前传给从机械手的信号是 $u_m(t)$, 而能反应 $u_m(t)$ 对从机械手影响的是从机械手位置 $x_s(t + T_R)$ 、速度 $v_s(t + T_R + T_L)$ 以及从机械手与环境的相互作用力 $f_e(t + T_R)$. 如果用这些信号对主机械手设计反馈控制器,控制效果将会有很大改善.但是,由于时延的存在,这些信号是无法得到的,那么,能否通过预测来解决这个问题呢? 答案显然是肯定的.经过研究发现,要使透明性对环境具有鲁棒性,操作者对主手的作用力、主手位置和速度信息要传给从手;同理,从手与环境的作用力、从手位置和速度信息也要传给主手.因此,设计控制器如下:

$$u_{dm}(t) = f_{11} x_m(t) + f_{12} v_m(t) + f_{13} \hat{x}_s(t + T_R) + f_{14} \hat{v}_s(t + T_R) + c_1 f_h(t) + c_2 \hat{f}_e(t + T_R). \quad (5)$$

式中, $F_1 \triangleq (f_{11} \ f_{12} \ f_{13} \ f_{14})$; c_1, c_2 为反馈系数; $\hat{x}_s(t + T_R), \hat{v}_s(t + T_R), \hat{f}_e(t + T_R)$ 分别为 $x_s(t + T_R), v_s(t + T_R), f_e(t + T_R)$ 的预测值; $\hat{x}_s(t + T_R), \hat{v}_s(t + T_R)$ 由下节的观测器实现.环境模型是已知的, $\hat{f}_e(t + T_R)$ 可由 $\hat{x}_s(t + T_R), \hat{v}_s(t + T_R)$ 及 $\dot{v}_s(t + T_R)$ 逼近.

这样一来,如果预测准确,则系统好像只存在前向传输时延,而没有反向传输时延,系统的跟踪时间将比以前提前 T_L . $u_d(t)$ 设计如下:

$$u_d(t) = f_{21} x_m(t - T_R) + f_{22} v_m(t - T_R) + f_{23} x_s(t) + f_{24} v_s(t) + c_3 f_h(t - T_R) + c_4 f_e(t). \quad (6)$$

式中, $F_2 \triangleq (f_{21} \ f_{22} \ f_{23} \ f_{24})$, c_3, c_4 为反馈系数.

3.2 观测器设计 (Observer design)

将式(4)、(6)代入式(2)并整理得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_s(t) &= (A_s + b_s f_2') \bar{x}_s(t) + b_s \bar{u}_d(t), \\ \bar{y}(t) &= c' \bar{x}_s(t), \quad t \geq 0. \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$\bar{x}_s = \begin{pmatrix} x_s(t) \\ v_s(t) \end{pmatrix}, \quad A_s = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{(1 - c_4)K_e}{M_s + (1 - c_4)M_e} & -\frac{B_s + (1 - c_4)B_e}{M_s + (1 - c_4)M_e} \end{pmatrix},$$

$$b_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{M_s + (1 - c_4)M_e} \end{pmatrix}, f_2' = (f_{23} \ f_{24}),$$

$$\bar{u}_d(t) = f_{21}x_m(t - T_R) + f_{22}v_m(t - T_R) + c_3f_h(t - T_R),$$

$$c' = (1 \ 1).$$

取 $\bar{y}(t) = (1 \ 1)\bar{x}_s(t)$ 是为方便建立观测器。显然,从手状态是可观的。

为了预测 $x_s(t + T_R), v_s(t + T_R)$, 首先应得到 $t + T_R$ 时的状态方程。将式(7)的时间前移 T_R 得

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_s(t + T_R) = (A_s + b_s f_2')\bar{x}_s(t + T_R) + b_s \bar{u}_d(t + T_R), \\ \bar{y}(t + T_R) = c'\bar{x}_s(t + T_R). \end{cases} \quad (8)$$

$\bar{x}_s(t + T_R)$ 是检测不到的,建立观测器对 $\bar{x}_s(t + T_R)$ 进行观测:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = (A_s + b_s f_2')z(t) + b_s \bar{u}_d(t + T_R) + L(\bar{y}(t - T_L) - y(t - T_L - T_R)), \\ y(t) = c'z. \end{cases} \quad (9)$$

其中, L 为待设计的观测器增益。令观测误差为 $e(t) = \bar{x}_s(t + T_R) - z(t)$, 则误差方程为

$$\dot{e}(t) = (A_s + b_s f_2')e(t) + Lc'e(t - T_L - T_R). \quad (10)$$

3.3 稳定性分析(Stability analysis)

环境模型如式(4)所示,则

$$\begin{aligned} \hat{f}_e(t + T_R) = \\ M_e \hat{v}_s(t + T_R) + B_e \hat{v}_s(t + T_R) + K_e \hat{x}_s(t + T_R). \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5),并将其中的预测值用 z , 即 $\bar{x}_s(t + T_R) - e(t)$ 代替,则整个系统的状态方程为

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + BF + b_1 \bar{F} & -b_1 \bar{f}_2 - b_1 f_1' \\ 0 & A_s + b_s f_2' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} 0 & b_3 L c' \\ 0 & L c' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t - T) \\ e(t - T) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix} f_h(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_m(t) \\ v_m(t) \\ x_s(t + T_R) \\ v_s(t + T_R) \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 & A_s \end{pmatrix},$$

$$B \triangleq (b_1 \ b_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s + (1 - c_4)M_e} \end{pmatrix},$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1 - c_1}{M_m} - \frac{c_2 c_3}{M_m(M_s + (1 - c_4)M_e)} \\ 0 \\ \frac{c_3}{M_s + (1 - c_4)M_e} \end{pmatrix},$$

$$\bar{c} = (0 \ 1), b_3 = c_2 M_e b_1 \bar{c},$$

$$\bar{F} \triangleq (\bar{f}_1 \ \bar{f}_2) =$$

$$c_2 \left(\frac{M_e f_2}{M_s + (1 - c_4)M_e} (K_e \ B_e) + M_e \bar{c} (A_s + b_s f_2') \right),$$

$$F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}, f_1' = (f_{13} \ f_{14}), f_2 = (f_{21} \ f_{22}),$$

$$f_2' = (f_{23} \ f_{24}), C = (0 \ 0 \ 1 \ 1), T = T_L + T_R.$$

定理 1 如果存在矩阵 L, F 和正定阵 P, P_e, S 使得不等式(13)成立,则式(12)所示基于观测器的遥操作机器人系统是渐近稳定的。

$$\begin{pmatrix} \Pi & -b_1(\bar{f}_2 + f_1')P_e^{-1} b_3 L c' & 0 \\ -P_e^{-1}(\bar{f}_2 + f_1')^T b_1^T & \Gamma & L c' & P_e^{-1} \\ (b_3 L c')^T & (L c')^T & -S & 0 \\ 0 & P_e^{-1} & 0 & -S \end{pmatrix} < 0. \quad (13)$$

其中: $\Pi = P^{-1}(A + BF + b_1 \bar{F})^T + (A + BF + b_1 \bar{F})P^{-1}, \Gamma = P_e^{-1}(A_s + b_s f_2')^T + (A_s + b_s f_2')P_e^{-1}$.

证 取系统 V 函数为

$$V(x, e) = x^T(t)Px(t) + e^T(t)P_e e(t) + \int_{-T}^t e^T(\tau)Se(\tau)d\tau.$$

其中, P, P_e 和 S 为待定的正定阵. $V(x, e)$ 沿着系统的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, e) = \\ [(A + BF + b_1 \bar{F})x(t) - b_1(\bar{f}_2 + f_1')e(t) + b_3 L c' e(t - T)]^T Px(t) + x^T(t)P[(A + BF + b_1 \bar{F})x(t) - b_1(\bar{f}_2 + f_1')e(t) + b_3 L c' e(t - T)] + \\ [(A_s + b_s f_2')e(t) + L c' e(t - T)]^T P_e e(t) + e^T(t)P_e[(A_s + b_s f_2')e(t) + L c' e(t - T)] + \end{aligned}$$

$$e^T(t)Se(t) - e^T(t-T)Se(t-T) = w^T(t)Qw(t).$$

其中

$$Q = \begin{pmatrix} \Phi & -Pb_1(\bar{f}_2+f_1') & Pb_3Lc' \\ -(\bar{f}_2+f_1')^T b_1^T P & \Omega & P_c L c' \\ (b_3Lc')^T P & (Lc')^T P_c & -S \end{pmatrix},$$

$$w^T(t) = (x^T(t) \quad e^T(t) \quad e^T(t-T)),$$

$$\Phi = (A + BF + b_1\bar{F})^T P + P(A + BF + b_1\bar{F}),$$

$$\Omega = (A_s + b_s f_2')^T P_c + P_c(A_s + b_s f_2') + S.$$

为使 $\dot{V}(x, e) < 0$, 只要

$$Q < 0$$

成立即可. 由 Schur 补引理^[9], 将上式左右两端同乘以 $\text{diag}(P^{-1}, P_c^{-1}, 0)$ 等效于式(13), 故 $\dot{V}(x, e) < 0$, 因此, 当控制参数满足(13)时, 系统是鲁棒渐近稳定的.

3.4 透明性分析(Transparency analysis)

遥操作系统在理想情况下, 操作者对环境的感知具有身临其境的力觉感受, 即让操作者感觉到主手在直接对环境进行操作. 从阻抗的角度评价, 当环境阻抗与主手感觉到的从端阻抗相等, 即 $\frac{F_c(s)}{V_s(s)} = \frac{F_h(s)}{V_m(s)}$ 时, 具有最佳临场感效果. 其中 $F_c(s)$, $V_s(s)$, $F_h(s)$, $V_m(s)$ 分别为 $f_c(t)$, $v_s(t)$, $f_h(t)$, $v_m(t)$ 的拉普拉斯变换.

系统模型进行拉氏变换并根据透明性条件得

$$c_2 = 1 - c_4, \tag{14}$$

$$c_3 = 1 - c_1, \tag{15}$$

$$c_2 = \frac{M_s}{M_m} c_3, \tag{16}$$

$$M_s(f_{12} + f_{22}) + M_m(f_{14} + f_{24}) - M_m B_s + M_s B_m = 0, \tag{17}$$

$$M_s(f_{11} + f_{21}) + M_m(f_{23} + f_{13}) = 0. \tag{18}$$

当控制参数满足式(14)~(18)、 $|c_3| \gg 1$ 时,

$\frac{F_h(s)}{V_m(s)} \rightarrow Z_e$, 即系统可获得良好的透明性. 在设计控制参数时, 可先设计 c_3 , 使得 $|c_3| \gg 1$, 再对其他参数进行设计.

综上所述, 可得以下推论:

推论 1 环境模型已知时, 如果存在矩阵 L, F , 常数 $c_1, c_2, |c_3| \gg 1, c_4$ 和正定阵 P, P_c, S , 使得不等式(13)和等式(14)~(18)同时成立, 则式(12)所

示基于观测器的遥操作系统是鲁棒渐近稳定的, 而且还可获得良好的透明性.

式(13)~(18)可以非常方便的由 MATLAB 的 LMI 工具箱求解^[10].

4 仿真结果(Simulation results)

用于仿真的主、从手及环境手参数为

$$M_m = M_s = 1.532 \text{ kg}, B_m = B_s = 0.051,$$

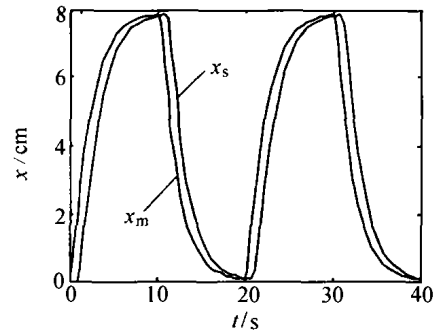
$$M_e = 1 \text{ kg}, B_e = 0.12, K_e = 0.1.$$

取 $c_1 = c_4 = -30, c_2 = c_3 = 31$, 由式(13)~(18), 用 MATLAB 的 LMI 工具箱求得一组控制参数:

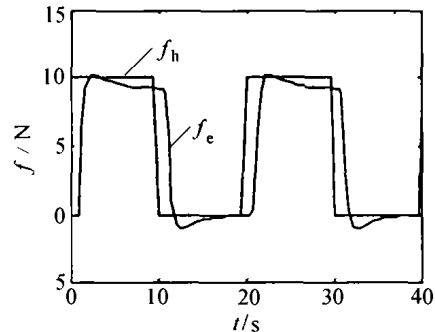
$$F = \begin{pmatrix} 26.5189 & 58.0038 & 18.0457 & 44.9326 \\ -18.0457 & -44.9326 & -26.5189 & -58.0038 \end{pmatrix},$$

$$L = \begin{pmatrix} -22.935 \\ 0.499 \end{pmatrix}.$$

用上述参数控制的结果如图 2 所示.



(a) 位置跟踪曲线



(b) 力跟踪曲线

图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

5 结束语(Conclusion)

针对通讯时延对临场感遥操作机器人系统的影响, 用时间前向观测器预测从手状态, 并用力、位置和速度反馈对系统进行校正, 使得系统渐近稳定且具有良好的透明性. 分析和实验表明, 该方法与已有的方法相比具有以下优点: 主、从手的跟踪时间较短, 不用测量主、从手的加速度, 从而使得算法实现更简单准确, 而且透明性较好.

(下转第 446 页)

工作将主要是针对移动机器人在未知环境中以及规划过程中存在的不确定性,寻求一种自主和鲁棒的规划算法.

参考文献(References):

- [1] POPA D O, WEN J T. Nonholonomic path planning with obstacle avoidance: a path-space approach [C]// *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Minneapolis, Minnesota: IEEE Publish Society, 1996:2662 - 2667.
- [2] ZULLI R, FIERRO R, CONTE G, et al. Motion planning and control for nonholonomic mobile robots [C]// *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Aichi: IEEE Publish Society, 1995:551 - 557.
- [3] NEUS M, MAOUCHE S. Motion planning using the modified visibility graph [C]// *Proc of Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*. Tokyo: IEEE Publish Society, 1999:651 - 655.
- [4] KANYAMA Y, MIYAKE N. Trajectory generation for mobile robots

[C]// *Proc of Int Symp on Robotics Research*. Gouvieaa, USA: IEEE Publish Society, 1985:16 - 23.

- [5] KANAYAMA Y, HARTMAN B I. Smooth local path planning for autonomous vehicle [C]// *Proc of Int Conf on Robotics and Automation*. Scottsdale, Arizona: IEEE Publish Society, 1989:1265 - 1270.
- [6] WEBER H. A motion planning and execution system for mobile robots driven by stepping motors [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 33(4):207 - 221.

作者简介:

郭丙华 (1966 —), 男, 副教授, 2003 年获得博士学位, 主要研究兴趣为智能控制, 移动机器人运动规划等, E-mail: gbhl@21cn.com;

胡跃明 (1960 —), 男, 教授, 博士生导师, 曾任香港理工大学电子系副研究员和研究员等职, 主要研究兴趣为非线性控制与移动机器人应用技术, 智能医疗器械, 基于视觉技术的检测与控制系统设计等, E-mail: auyuhu@scut.edu.cn.

(上接第 442 页)

参考文献(References):

- [1] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay [J]. *IEEE Trans on Automation Control*, 1989, 34(4):494 - 501.
- [2] NIEMEYER G, SLOTLINE J J E. Stable adaptive teleoperation [J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1):152 - 162.
- [3] HAHTRUDI-ZAAD K, SALCUDEAN S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2002, 18(1):101 - 114.
- [4] 宋爱国, 黄惟一. 空间遥控作业系统的自适应无源控制[J]. 宇航学报, 1997, 18(3):26 - 32.
(SONG Aiguo, HUANG Weiyi. Adaptive passive control of space telemanipulation systems [J]. *J of Astronautics*, 1997, 18(3):26 - 32.)
- [5] ANDERSON R J, SPONG M W. Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay [J]. *Int J of Robotics Research*, 1992, 11(2):135 - 149.
- [6] MUNIR S. *Internet based teleoperation* [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [7] GALLEGOS J A, RODRIGUEZ D C, SPONG M W. A stable control scheme for teleoperators with time delay [J]. *Int J of Robotics and*

Automation, 1997, 12(3):73 - 79.

- [8] ARCARA P, MELCHIORRI. Control schemes for teleoperation with time delay: a comparative study [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 38(1):49 - 64.
- [9] MALEK M Z, JAMSHIDI M. *Time Delay Systems: Analysis, Optimization and Application*, North Holland System and Control Series [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987.
- [10] 姜偕富. 线性时滞系统的鲁棒及自适应控制[D]. 南京: 东南大学, 2001.
(JIANG Xiefu. *Robust and adaptive control of linear time delay system* [D]. Nanjing: Southeast University, 2001.)

作者简介:

陈启宏 (1975 —), 男, 工学博士, 副教授, 研究领域为遥操作机器人控制技术, E-mail: qh-chen@hotmail.com;

费树岷 (1961 —), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为机器人控制技术, 非线性控制系统分析与综合, 鲁棒控制, 自适应控制, 时滞系统的设计与综合等, E-mail: smfei@seu.edu.cn;

全书海 (1956 —), 男, 教授, 教授, 博士生导师, 研究领域为智能控制技术, E-mail: quanshuh@mail.whut.edu.cn;

宋爱国 (1968 —), 男, 教授, 博士生导师, 究领域为机器人传感与控制技术, 智能信息处理技术, E-mail: a.g.song@seu.edu.cn.