

文章编号: 1001-0920(2004)05-0538-04

遥操作机器人系统带记忆的鲁棒反馈控制

陈启宏¹, 费树岷², 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: 针对遥操作机器人系统的通信通道中存在通信时延, 以及机器人模型存在不确定性, 可能造成系统不稳定和操作性降低的问题, 提出在环境模型未知的条件下, 利用鲁棒控制理论, 采用力、位置和速度反馈的控制方法, 使得系统稳定, 并且具有良好的透明性。控制参数可通过 Matlab 的 LM I 工具箱方便地求取。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 遥操作; 时延; 鲁棒控制; 透明性

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Memory robust feedback control for teleoperation robot systems

CHEN Qi-hong¹, FEI Shu-min², SONG A-guo³

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Department of Instrument Science and Engineer, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: FEI Shu-min, E-mail: smfei@seu.edu.cn)

Abstract: In order to eliminate or reduce the effect of time delays and uncertainty on a teleoperation robot system, the force, position and velocity feedback approach is proposed based on robust control theory in the case of unknown environment. In this way, the system is stable and transparent. Moreover, control parameters can be determined through linear matrix inequality toolbox of Matlab conveniently. Analysis and simulation show that the method is effective.

Key words: teleoperation; time delay; robust control; transparency

1 引言

随着遥操作机器人系统广泛地应用于空间和深海等领域, 人们在感到遥操作机器人工作能力提高的同时, 也认识到其稳定性、鲁棒性及操作性能进一步提高所遇到的困难。由于远地从机械手和本地控制站间的距离随着应用领域的扩展而越来越远和通信带宽的限制, 二者间的信号传输时延更加突出(可由几秒到十几秒)。另外, 一般环境模型是未知的, 而且系统参数存在不确定性, 这些给系统的控制增加了一定的困难。上述问题严重影响了系统的正常工

作, 降低了系统操作性能, 甚至造成系统不稳定。所以, 在环境模型未知的条件下, 设计控制器消除或减少时延和不确定因素对系统的影响具有十分重要的意义。Anderson 和 Spong^[1]提出了基于无源性和散射理论的时延补偿方法, 使得系统对时延和参数具有鲁棒稳定性, 但时延越大, 系统操作性能越差; Gallegos 等^[2]提出了位置、速度反馈的方法, 能保证系统的稳定性; Hashtrudi-Zaad 等^[3]利用四通道方法分析了系统的操作性能, 并最终采用三通道实现, 但并不能使透明性达到最佳。

收稿日期: 2002-12-26; 修回日期: 2003-04-07

基金项目: 国家 863 高技术项目(863-2001AA 423140); 东南大学科技基金资助项目(9208001274)

作者简介: 陈启宏(1975—), 男, 湖北公安人, 博士, 从事机器人控制技术的研究; 费树岷(1961—), 男, 安徽宣州人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制系统分析与综合、时滞系统的设计与综合等研究

以上文献得到的透明性并不理想,且考虑的是环境已知情况,但实际工作中环境模型大多是未知的。本文考虑环境模型未知和系统参数不确定条件下的遥操作机器人系统的鲁棒控制,并对系统的透明性进行分析。利用鲁棒控制理论,提出用力、位置和速度反馈减小或消除时延对系统的影响,在环境模型未知的条件下使系统对参数鲁棒渐近稳定,并使系统获得良好的透明性。控制器的实现不需测量主、从机械手的加速度,从而使控制器设计简单易行。分析与仿真表明,用该方法设计的控制器能使系统鲁棒渐近稳定,并且具有良好的透明性。

2 问题描述

考虑如图 1 所示的单自由度遥操作系统,操作者的位置指令通过主机械手(简称主手)、通信环节和从机械手(简称从手)作用于环境,而环境对从手的作用力经上述环节返回到操作者手部。

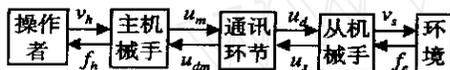


图 1 遥操作系统结构

由于元件的老化和工作环境的变化,机器人参数可能发生变化,而且在对机器人建模时,不可避免地会产生建模误差,所以模型中含有不确定项。主、从手的动力学模型通常用如下方程描述:

$$f_h(t) = (M_m + \Delta M_m(t))\ddot{v}_m(t) + (B_m + \Delta B_m(t))\dot{v}_m(t) + u_{dm}(t), \quad (1)$$

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

其中: \$M\$ 和 \$B\$ 分别表示质量和阻尼系数, \$\Delta M\$ 和 \$\Delta B\$ 表示相应的不确定项, \$m, s\$ 和 \$e\$ 分别表示主、从手和环境, \$v\$ 表示速度, \$f_h\$ 为操作者对主手的作用力, \$f_e\$ 为从手与环境的作用力, \$u_d\$ 和 \$u_{dm}\$ 为控制量,且环境模型未知。

假设前向和反向时延均为 \$T\$, 且时不变, 则主手当前接收到的信号是从手 \$T\$ 时刻前的状态, 而主手当前的控制信号 \$T\$ 时刻后才能作用于从手, 即

$$u_d(t) = u_m(t - T), \quad (3)$$

$$u_{dm}(t) = u_s(t - T). \quad (4)$$

从而主手对从手的作用效果 \$2T\$ 时刻后才能反馈到主手, 而且环境模型未知, 这就导致系统操作性能降低, 甚至不稳定。

式(1)~(4)可用如下的状态方程描述:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A(t))x(t) + (B_1 + \Delta B_1(t))r(t) + (B_2 + \Delta B_2(t))u(t) +$$

$$(B_3 + \Delta B_3(t))f_e(t), \quad (5)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (6)$$

其中

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_m(t) \\ v_m(t) \\ x_s(t) \\ v_s(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{M_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B_s}{M_s} \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M_s} \end{bmatrix},$$

$$r(t) = f_h(t), u(t) = \begin{bmatrix} u_{dm} \\ u_m \end{bmatrix}, C = (0 \quad -1 \quad 0 \quad 1).$$

其中: \$x_m\$ 和 \$x_s\$ 表示主、从手位置, \$\Delta A(t)\$, \$\Delta B_1(t)\$, \$\Delta B_2(t)\$ 和 \$\Delta B_3(t)\$ 分别表示相应参数的不确定项, 可写成

$$(\Delta A(t) \quad \Delta B_1(t) \quad \Delta B_2(t) \quad \Delta B_3(t)) = H \Delta(t) (E \quad E_{b1} \quad E_{b2} \quad E_{b3}), \quad (7)$$

其中 \$\forall t \in [0, +\infty)\$, \$\Delta^T(t)\Delta(t) \leq I\$. 为表达方便, 系统参数定义为

$$\begin{cases} \hat{A} \triangleq A + \Delta A(t), \hat{B}_1 \triangleq B_1 + \Delta B_1(t), \\ \hat{B}_2 \triangleq B_2 + \Delta B_2(t), \hat{B}_3 \triangleq B_3 + \Delta B_3(t). \end{cases} \quad (8)$$

3 主要结果

3.1 控制器设计

由已有的研究结果可知, 当环境模型未知时, 要使系统透明, 操作者对主手的作用力、主手加速度和速度信息要传给从手; 同理, 从手与环境的作用力、从手加速度和速度信息也要传给主手。这种传统的方法有 2 个缺点: 一是主、从手的加速度一般较难测量, 增加了系统的实现难度; 另一个致命的缺点是只要有传输时延存在, 系统就不可能完全透明。

分析系统模型可知, 与从手相互作用的环境力是 \$f_e(t)\$, 而作用在主手上的环境力是 \$f_e(t - T)\$, 这势必会对透明性产生较大的影响。主手端是得不到 \$f_e(t)\$ 的, 但可将 \$f_e(t)\$ 延时 \$T\$ 时刻后再作用于从手。这样当时间为 \$t\$ 时, 对主、从手作用的环境力都是 \$f_e(t - T)\$, 透明性将得到提高。基于此思想, 可在 \$u_d(t)\$ 中加入 \$f_e(t)\$ 的信息, 抵消已有的 \$f_e(t)\$ 对从手的影响, 同时加入 \$f_e(t - T)\$ 的信息, 让 \$f_e(t - T)\$ 与从手相互作用; 另外, 利用主、从手带记忆的位置、速

度取代加速度,则控制器可设计如下:

$$u_d(t) = F_2x(t) + F_2x(t-T) + c_3f_e(t-T) + f_e(t) + c_4f_e(t-T). \quad (9)$$

其中: $F_2 = (f_{ij})_{R^{1 \times 4}}, F_2 = (f_{ij})_{R^{1 \times 4}}, i = 2, j = 1, \dots, 4; c_3$ 和 c_4 为待定参数 显然, 应有 $f_{21} = f_{22} = 0$, 否则无法实现 同理, 可设计

$$u_{dm}(t) = F_1x(t) + F_1x(t-T) + c_2f_e(t-T) + f_h(t) + c_1f_h(t-T). \quad (10)$$

其中: $F_1 = (f_{ij})_{R^{1 \times 4}}, F_1 = (f_{ij})_{R^{1 \times 4}}, i = 1, j = 1, \dots, 4; c_1$ 和 c_2 为待定参数, $f_{13} = f_{14} = 0$ 将式(9)和(10)代入式(5)得

$$\dot{x} = (\bar{A} + \bar{B}_2F)x + \bar{B}_2F x(t-T) + \bar{B}_3f_e(t-T) + \bar{B}_1f_h(t-T). \quad (11)$$

其中 $F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix},$
 $\bar{B}_1 = B_1 + \Delta B_1(t), \bar{B}_3 = B_3 + \Delta B_3(t),$
 $(\Delta b_1(t) \ \Delta b_3(t)) = H \Delta(t) (E_{b1} \ E_{b3}),$
 $B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{c_1}{M_m} & 0 & \frac{c_3}{M_s} \end{bmatrix}^T,$
 $B_3 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{c_2}{M_m} & 0 & \frac{c_4}{M_s} \end{bmatrix}^T.$

3.2 稳定性分析

引理 1^[4] 对于任意适当维数的矩阵 X, Y , 有

$$X^T Y + Y^T X \leq \alpha X^T X + \frac{1}{\alpha} Y^T Y, \quad \forall \alpha > 0 \quad (12)$$

定理 1 如果 $\forall t > 0, \int_0^t f_e(t-T)v_s(t)dt > 0$ 成立, 且存在矩阵 F 和 F , 常数 c_1, c_2, c_3, c_4 及正定矩阵 P 和 S , 满足

$$D = \begin{bmatrix} \Omega & P^{-1}B_2F & P^{-1}B_3 + \frac{1}{2}x \\ (P^{-1}B_2F)^T & -S + \frac{1}{2}(E_{b2F})^TE_{b2F} & \frac{1}{2}(B_2F)^TC^T \\ (P^{-1}B_3)^T + \frac{1}{2}c\tilde{c}(A+B_2F) & \frac{\tilde{c}}{2}B_2F & \Phi \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

其中

$$\Omega = P^{-1}(A + B_2F) + (A + B_2F)^T P^{-1} + S + 3P^{-1}H H^T P^{-1} + 2(E + E_{b2F})^T (E + E_{b2F}),$$

$$\Phi = \frac{c_4}{M_s} + 2E_{b3}^T E_{b3} + \frac{3}{4}\tilde{c}H(\tilde{c}H)^T,$$

$$\tilde{c} = (0 \ 0 \ 0 \ 1).$$

则取式(9)和(10)的控制律时, 遥操作机器人系统(5)是内部鲁棒渐近稳定的

证明 定义 Lyapunov 函数

$$V(t) = x^T(t)P^{-1}x(t) + \int_{-T}^t x^T(t)Sx(t)dt + \int_0^t f_e(t-T)v_s(t)dt$$

其中 P 和 S 为待定的正定矩阵, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & x^T(t)P^{-1}(A + B_2F)x(t) + \\ & x^T(t)P^{-1}B_2F x(t-T) + \\ & x^T(t)P^{-1}B_3f_e(t-T) + f_e(t-T)B_3^T P^{-1}x(t) + \\ & x^T(t)(A + B_2F)^T P^{-1}x(t) + \\ & x^T(t-T)(B_2F)^T P^{-1}x(t) + \\ & x^T(t)Sx(t) - x^T(t-T)Sx(t-T) + \\ & f_e(t-T)c\tilde{c}[(A + B_2F)x(t) + \\ & B_2F x(t-T) + B_3f_e(t-T)] + \\ & x^T(t)P^{-1}H \Delta(t)(E + E_{b2F})x(t) + \\ & x^T(t)(E + E_{b2F})^T \Delta^T(t)H^T P^{-1}x(t) + \\ & x^T(t)P^{-1}H \Delta(t)E_{b2F}x(t-T) + \\ & x^T(t-T)(E_{b2F})^T \Delta^T(t)H^T P^{-1}x(t) + \\ & x^T(t)P^{-1}H \Delta(t)(E_{b3}f_e(t-T) + \\ & (E_{b3}f_e(t-T))^T \Delta^T(t)H^T P^{-1}x(t) + \\ & f_e(t-T)\tilde{c}H \Delta(t)[(E + E_{b2F})x(t) + \\ & E_{b2F}x(t-T) + E_{b3}f_e(t-T)] \end{aligned}$$

由引理 1, 得

$$\dot{V}(x) \leq z^T(t)Dz(t),$$

其中 $z^T(t) = (x(t) \ x(t-T) \ f_e(t-T))$.

由式(13)得 $V(x) < 0$, 故系统是内部鲁棒渐近稳定的

3.3 透明性分析

遥操作机器人系统等效为一个二端口网络: 力等效为电压, 速度等效为电流^[1]. 则一个遥操作机器人系统是透明的, 是指操作者感觉到的阻抗等于环境阻抗, 即 $\frac{F_h(s)}{V_m(s)} = \frac{F_e(s)}{V_s(s)}$. 其中 $f_e(s), V_s(s), F_h(s), V_m(s)$ 分别为 $f_e(t), v_s(t), f_h(t), v_m(t)$ 的拉普拉斯变换 系统透明时操作者对环境的感知具有身临其境的力觉感受, 而且主、从机械手的速度和受力能很好地相互跟踪 因此, 透明性是遥操作机器人系统的一个重要指标

记环境阻抗 $Z_e \triangleq \frac{F_e(s)}{V_e(s)}$. 将系统模型进行拉普拉斯变换并解得

$$\frac{F_h(s)}{V_m(s)} = \frac{[\bar{Z}_m \bar{Z}_s + (\bar{f}_{22} + \frac{\bar{f}_{21}}{s})(\bar{f}_{14} + \frac{\bar{f}_{13}}{s})] + [-c_1 e^{-sT} \bar{Z}_s - (\bar{f}_{14} + \frac{\bar{f}_{13}}{s})c_3 e^{-sT}] + [-c_4 e^{-sT} \bar{Z}_m + (\bar{f}_{22} + \frac{\bar{f}_{21}}{s})c_2 e^{-sT}]}{[c_1 c_4 e^{-2sT} - c_2 c_3 e^{-2sT}]} Z_e \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{Z}_m &= (M_m + \Delta M_m(s))s + B_m + \Delta B_m(s) + \bar{f}_{12} + \frac{\bar{f}_{11}}{s}, \\ \bar{Z}_s &= (M_s + \Delta M_s(s))s + B_s + \Delta B_s(s) - \bar{f}_{24} - \frac{\bar{f}_{23}}{s}, \end{aligned}$$

$\Delta M_m(s)$, $\Delta B_m(s)$ 和 $\Delta M_s(s)$, $\Delta B_s(s)$ 分别为主、从手参数不确定项的拉氏变换, $\bar{f}_{ij} = f_{ij} + f_{ij}e^{-sT}$, $i = 1, 2, j = 1 \sim 4$

令 $Z_m = M_m s + B_m + \bar{f}_{12} + \bar{f}_{11}/s$, $Z_s = M_s s + B_s - \bar{f}_{24} - \bar{f}_{23}/s$ 由于环境未知, 控制参数应与环境模型无关 为使系统透明, 应有下式成立:

$$c_1 c_4 - c_2 c_3 = 0, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} c_1 Z_s + (\bar{f}_{14} + \bar{f}_{13}/s)c_3 &= \\ c_4 Z_m - (\bar{f}_{22} + \bar{f}_{21}/s)c_2 & \end{aligned} \quad (16)$$

成立 为计算方便, 取 $c_1 = -c_2, c_3 = -c_4$, 解得

$$c_1 = -c_2 = -\frac{M_m}{M_s}, c_3 = \frac{M_m}{M_s} c_4, \quad (17)$$

$$M_m f_{24} + M_s f_{12} - M_m B_s + M_s B_m = 0, \quad (18)$$

$$M_m (f_{22} + f_{24}) + M_m (f_{14} + f_{12}) = 0, \quad (19)$$

$$M_s f_{11} + M_m f_{23} = 0, \quad (20)$$

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

由式(14)可知, 当控制参数满足式(17) ~

(21) 且 $|c_1| \gg 1$ 时, $\frac{F_h(s)}{V_m(s)} Z_e$, 即可获得良好的透明性 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.

在目前已有的文献中, Hashtrudi-Zaad 在文献 [3] 中得出的时延条件下的透明性结果是最好的, 当系统参数都确定时, $\frac{F_h(s)}{V_m(s)} Z_e e^{2sT}$. 显然, 本文的结果比该结果好.

综上所述, 可得如下推论:

推论 1 如果 $\forall t > 0, \int_0^t f_e(t-T)v_s(t)dt > 0$

成立, 且存在矩阵 F 和 F , 常数 c_1, c_2, c_3, c_4 及正定矩

阵 P 和 S , 满足式(13) 和(17) ~ (21) 及 $|c_3| \gg 1$, 则取式(9) 和(10) 的控制律时, 遥操作机器人系统(5) 是内部鲁棒渐近稳定的, 而且可获得良好的透明性

注 1 由于参数较多, 不等式(13) 不易求解 可将式(13) 化为线性矩阵不等式, 然后联立式(17) ~ (21), 用 Matlab 的线性矩阵不等式工具箱可方便地求得控制参数

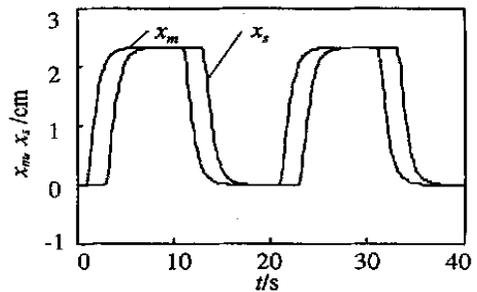
4 仿真结果

用于仿真的主、从手参数为: $M_m = M_s = 1.532, B_m = B_s = 0.051$, 通信时延 $T = 1$ s, 环境为一个二阶系统 取 $c_1 = -c_2 = -c_3 = c_4 = -25$, 由式(13) 和(17) ~ (21), 由 Matlab 解得一组反馈系数

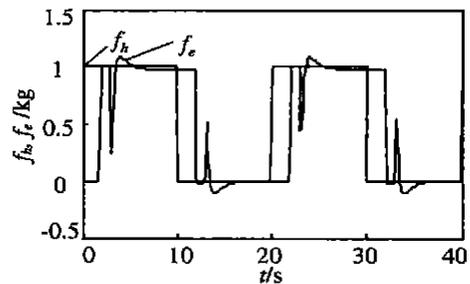
$$F = \begin{bmatrix} 1.832 & 0.974 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.832 & -0.974 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 20.4862 & 48.5189 & 0.9397 & 0.7085 \\ -0.9397 & -0.7085 & -20.4862 & -48.5189 \end{bmatrix}.$$

仿真结果如图 2 所示



(a) 位置跟踪曲线



(b) 力跟踪曲线

图 2 仿真结果

由仿真曲线可知, 在式(9) 和(10) 的控制下, 整个遥操作机器人系统是稳定的, 主、从机械手的位置和受力能较好地相互跟踪, 说明系统具有良好的透明性, 操作者具有真实的力觉感受 因此, 本文的方法是有效的

(下转第 545 页)

$$P = \left| \frac{1-a_0}{b_0} - \gamma \right| + \left| \frac{a_0}{b_0} - \gamma a_0 \right|,$$

$$Q = 1 + |\gamma b_0 - 1|$$

若取 $\gamma = 1/b_0$, 则 $P = a_0/b_0, Q = 1$, 此时鲁棒稳定域

$$\delta_k < \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a_0}{b_0}\right)^2 + 1}} = \frac{b_0}{\sqrt{a_0^2 + b_0^2}} \quad (24)$$

比较式(23)和(24), 显然引入 $G_f = \frac{1}{b_0}(1 + a_0q^{-1})^2$ 后, 其鲁棒稳定域得到了改善

5 结 语

本文针对 GPC 缺乏对未建模动态的主动抑制能力的问题, 提出一种新的添加独立设计的失配滤波器方法, 提高了算法的鲁棒性. 仿真算例证明了该方法的有效性. 至于失配滤波器增益 γ 的选取规律还有待于进一步研究

参考文献(References):

[1] Clarke D W, Mohtadi C, Tutts P S. Generalized predictive control: Part 1 and Part 2[J]. *Automatica*,

1987, 23(1): 137-160

[2] 席裕庚, 厉隽悱. 广义预测控制系统的闭环分析[J]. *控制理论与应用*, 1991, 8(4): 419-424

(Xi Y G, Li J X. Closed-loop analysis of the generalized predictive control systems [J]. *Control Theory and Applications*, 1991, 8(4): 419-424)

[3] 席裕庚, 张俊, 吴玮琪. 广义预测控制系统性质的进一步研究[J]. *自动化学报*, 1998, 24(3): 400-404

(Xi Y G, Zhang J, Wu W Q. Future study on properties of GPC system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(3): 400-404)

[4] 吴玮琪, 席裕庚, 耿晓军. 广义预测控制器的鲁棒化改进[J]. *控制与决策*, 1999, 14(6): 663-668

(Wu W Q, Xi Y G, Geng X J. Robustness improvement to generalized predictive control [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(6): 663-668)

[5] Sun M W, Chen Z Q, Yuan Z H. The principle of robustness in generalized predictive control [J].

Applied Mathematics — A J of Chinese University, 1999, 13(2): 293-300.

(上接第 541 页)

5 结 语

本文针对通信时延和参数的不确定性对遥操作机器人系统稳定性和透明性的影响, 在环境模型未知的前提下, 提出了带记忆的力、位置和速度反馈控制方法. 分析和仿真表明该方法具有以下优点: 1) 能保证系统的稳定性和良好的透明性; 2) 用 Matlab 的 LM I 工具箱求取反馈系数非常方便; 3) 允许系统模型的不确定性; 4) 无需已知环境模型, 并且允许环境模型发生变化; 5) 不需测量主、从手的加速度

参考文献(References):

[1] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1989, 34(4): 494-501.

[2] 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.

[3] Hashtrudi-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] Petersen I R, Hollot C V. A Riccati Equation to the stabilization of uncertain linear system [J]. *Automatica*, 1986, 22(4): 397-411.

[5] 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.