

DOI: 10.3901/JME.2013.11.001

基于线性矩阵不等式空间遥操作系统的鲁棒 H_∞ 控制*

杨艳华^{1,2,3} 阳方平^{1,3} 化建宁⁴ 李洪谊¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016;

2. 泉州师范学院应用科技学院 泉州 362000;

3. 中国科学院大学 北京 100049;

4. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110014)

摘要: 针对具有力反馈空间遥操作系统的时变大时延和环境模型参数不确定问题, 提出一种基于线性矩阵不等式(Linear matrix inequality, LMI)的鲁棒 H_∞ 控制方法。对于回路时延是未知时变的遥操作系统, 该方法只需要已知时延的上下界, 可以解决环境模型参数不确定问题, 并获得良好的位置和力跟踪性能。将主从端的动力学模型转化成相应的状态空间方程, 并将其离散化、合并为一个离散状态空间方程; 然后根据该系统方程, 基于 LMI 方法设计状态反馈控制器, 通过定义 Lyapunov 函数分析闭环系统的稳定性, 并且分别给出在环境模型参数确定和不确定情况下, 使得闭环系统渐近稳定且满足给定位置跟踪性能的充分条件; 仿真试验结果表明所提出的方法可使得遥操作系统渐进稳定且具有好的位置和力跟踪性能。

关键词: 空间遥操作 大时延 不确定 线性矩阵不等式 H_∞ 控制

中图分类号: TP24

Robust H_∞ Control for Space Teleoperation Systems Based on Linear Matrix Inequality

YANG Yanhua^{1,2,3} YANG Fangping^{1,3} HUA Jianning⁴ LI Hongyi¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. College of Applied Science and Technology, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

4. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110014)

Abstract: A robust H_∞ control method based on linear matrix inequality (LMI) is proposed for force feedback space teleoperation systems with large time-varying delays and the uncertainty of the environment model parameters. This method only needs to know the bounds of the delay interval for teleoperation systems with unknown and variable round trip time delays. It also can solve the problem that the parameters of the environment are uncertain and obtain good position and force tracking performances. The master and slave dynamics are respectively transformed to state space equations, and they are incorporated to a uniform form, which is discretized in succession. A state-feedback controller is designed for the whole systems based on LMI method; the stability of the closed-loop system is analyzed by defining a Lyapunov function; and sufficient conditions for the controller are presented which enable the closed-loop system to be asymptotic stability as well as guarantee a prescribed position tracking performance under the cases that the parameters of the environment are certain or uncertain. Simulation results demonstrate that the proposed method enables the teleoperation system not only asymptotic stability, but also taking on good position and force tracking performances.

Key words: Space teleoperation Large time delay Uncertainty Linear matrix inequality H_∞ control

0 前言

时变时延是双边遥操作系统需要解决的主要

问题之一。特别是在空间遥操作系统中, 回路时延通常可达几秒甚至几十分钟^[1], 这种大时延势必导致系统性能下降甚至使系统失去稳定性。因此, 许多学者针对双边遥操作系统的时延问题提出了多种控制方法^[2-17]。

这些控制方法主要包括基于无源理论的方

* 国家自然科学基金资助项目(61005069)。20120601 收到初稿, 20130407 收到修改稿

法^[2-3]、基于模型预测控制的方法^[4-5]、基于事件的方法^[6]和基于 H_∞ 理论的方法^[7-11]等。文献[12-15]对上述方法进行了详细讨论,本文主要对基于 H_∞ 理论的方法进行简单介绍。LEUNG 等^[7]将时延建模为系统扰动,根据 μ -综合设计控制器,使系统不仅满足稳定性要求,还对这种时延扰动具有一定的鲁棒性。文献[8]将时延当成不确定来设计 H_∞ 阻抗控制器。该方法通常导致结果的保守性。SENAME 等^[9]采用混合灵敏度方法,同时借助 μ -分析与综合工具箱设计了具有环境模型和时延不确定的双边遥操作系统的 H_∞ 控制器。但是,该方法没有考虑力的跟踪问题。SADEGHI 等^[10]提出了一种基于线性矩阵不等式(Linear matrix inequality, LMI)的双边遥操作系统的鲁棒 H_∞ 和 L_1 控制器设计方法。作者在主端设计阻抗控制器,在从端设计一个开环控制器,并且在从端采用最优干扰抑制技术以抑制扰动;为了获得从端控制器,最终将控制系统转化为标准控制系统的动态输出反馈控制器设计问题。同样,该方法没有考虑力的跟踪问题,而且在从端设计的是开环控制器。文献[11]针对遥操作系统的不对称时变时延问题,提出一种 H_∞ 控制器设计方法。在该方法中,主从端分别采用位置误差反馈,并使用具有多时延的微分方程对系统建模。该方法考虑了位置和力的跟踪误差,但是该方法需要已知前向和反向时延及其变化率的上界,但在有些场合很难获得系统的前向和反向时延,而回路时延则比较容易测得,比如空间遥操作系统。该方法的另一个不足是没有考虑环境模型不确定的情况。

本文在文献[10-11]的基础上,提出一种基于 LMI 的大时延空间遥操作系统的 H_∞ 控制方法。该方法只需要已知系统回路时延的上下界,采用在从端设计闭环控制器的方法,考虑位置和力跟踪性能及环境模型不确定的情况。首先,采用离散状态空间方程描述整个系统(包括主从端和环境模型),然

后针对该系统设计状态反馈控制器;接着基于 LMI 方法给出了在环境模型确定和不确定情况下,使得闭环系统渐近稳定,且满足给定跟踪性能的充分条件。最后,进行了一系列仿真试验以验证所提方法的有效性。

1 问题描述

空间遥操作系统的控制框图如图 1 所示。地面操作者根据空间站反馈的从端机械臂与环境之间的作用力 $f_{ed}(t)$ 来操作操纵杆,操纵杆的输出量包括参考位置 $x_m(t)$ 和速度 $v_m(t)$ 。 $x_m(t)$ 和 $v_m(t)$ 经过通信环节(前向和反向时延分别为 τ_{ms} 、 τ_{sm})到达空间站时为 $x_{md}(t)$ 和 $v_{md}(t)$ 。然后,在从端的控制器根据参考位置 $x_{md}(t)$ 、 $v_{md}(t)$ 以及从端机械臂位置 $x_s(t)$ 和速度 $v_s(t)$ 计算控制量 $u(t)$,从而使从端机械臂跟踪主端的参考位置和速度进行运动。主端、从端以及环境的动力学模型分别为

$$m_m \ddot{x}_m(t) + b_m \dot{x}_m(t) + k_m x_m(t) = f_h(t) - f_{ed}(t) \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s(t) + b_s \dot{x}_s(t) + k_s x_s(t) = f_s(t) - f_e(t) \quad (2)$$

$$f_e(t) = b_e \dot{x}_s(t) + k_e x_s(t) \quad (3)$$

式中 m ——下标,主端

s ——下标,从端

e ——下标,环境

m ——质量

b ——阻尼

k ——弹性系数

f_h ——操作者施加的力

f_s ——从端机械臂的控制输入力

f_e ——从端机械臂与环境间的作用力

f_{ed} —— f_e 的延时, $f_{ed}(t) = f_e(t - \tau_{sm})$

将式(3)代入式(2)得

$$m_s \ddot{x}_s(t) + (b_s + b_e) \dot{x}_s(t) + (k_s + k_e) x_s(t) = f_s(t) \quad (4)$$

令 $x_1 = x_s$, $x_2 = \dot{x}_s$, 从端模型可转化为如下形式

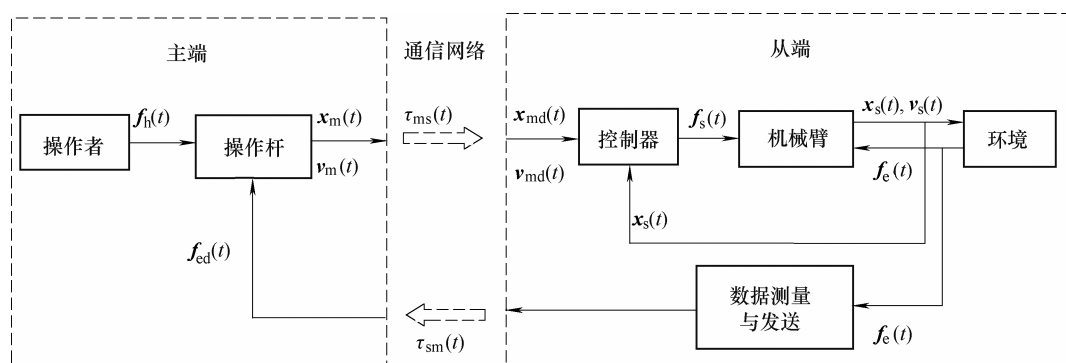


图 1 遥操作控制系统结构图

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_1(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_s + k_e}{m_s} & -\frac{b_s + b_e}{m_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{x}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ m_s \end{pmatrix} \mathbf{u}(t) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}_s(t)$ 。令

$$\mathbf{x}_3(t) = \mathbf{x}_m(t - \tau_{ms}) \quad \mathbf{x}_4(t) = \dot{\mathbf{x}}_m(t - \tau_{ms})$$

则主端模型转化为状态空间方程

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_3(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_m}{m_m} & -\frac{b_m}{m_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_3(t) \\ \mathbf{x}_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ m_m \end{pmatrix} \mathbf{w}(t - \tau_{ms}) \quad (6)$$

式中, $\tau(t) = \tau_{ms}(t) + \tau_{sm}(t)$, $\mathbf{w}(t) = \mathbf{f}_h(t)$ 。 $\mathbf{f}_h(t)$ 是人的操作力, 由于人本身的特性, 其能量是有限的, 因此 $\mathbf{w}(t)$ 满足能量有界条件: $\int_0^\infty \|\mathbf{w}(t)\|^2 \leq \alpha$, α 为常数。

令 $\mathbf{x}(t) = (\mathbf{x}_1^T(t) \quad \mathbf{x}_2^T(t) \quad \mathbf{x}_3^T(t) \quad \mathbf{x}_4^T(t))^T$, 整个系统的状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t - \tau(t)) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_w\mathbf{w}(t - \tau_{ms}(t)) \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s + k_e}{m_s} & -\frac{b_s + b_e}{m_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{k_m}{m_m} & -\frac{b_m}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_e}{m_m} & -\frac{b_e}{m_m} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = (0 \quad 1/m_s \quad 0 \quad 0)^T$$

$$\mathbf{B}_w = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1/m_m)^T$$

将式(7)离散化, 可得如下离散系统

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_{d1}\mathbf{x}(k-d(k)) + \mathbf{B}_d\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_{dw}\mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) \\ \mathbf{z}(k) = ((\mathbf{C}\mathbf{x}(k))^T \quad (q\mathbf{u}(k))^T)^T \end{cases} \quad (8)$$

式中 d ——下标, 表示矩阵的离散化, 矩阵 \mathbf{A}_d ,

\mathbf{A}_{d1} , \mathbf{B}_d , \mathbf{B}_{dw} 分别为 \mathbf{A} , \mathbf{A}_1 , \mathbf{B} , \mathbf{B}_w

的离散化值

$d(k)$ ——回路时延, $d(k) = \tau(t)/T_s$, T_s 是采样周期, 且 $d_1 \leq d(k) \leq d_2$, 其中 d_1, d_2 为整数, 且 $0 \leq d_1 \leq d_2$

$d_{ms}(k)$ ——前向时延, $d_{ms}(k) = \tau_{ms}(t)/T_s$

$\mathbf{z}(k)$ ——系统的受控输出

\mathbf{C} ——实矩阵, $\mathbf{C} = (1 \quad 0 \quad -1 \quad 0)$

q ——权因子

设计状态反馈控制器

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{K}\mathbf{x}(k) \quad (9)$$

式中, \mathbf{K} 为设计的控制器参数矩阵, 则闭环系统为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A}_d + \mathbf{B}_d\mathbf{K})\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_{d1}\mathbf{x}(k-d(k)) + \mathbf{B}_{dw}\mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) \\ \mathbf{z}(k) = ((\mathbf{C}\mathbf{x}(k))^T \quad (q\mathbf{K}\mathbf{x}(k))^T)^T \end{cases} \quad (10)$$

针对该闭环系统设计控制器参数 \mathbf{K} , 使得以下几点成立。

(1) 在外部扰动 $\mathbf{w}(k) = 0$ 情况下, 闭环系统是渐近稳定的。

(2) 在零初始条件下, 闭环系统具有 H_∞ 性能 γ ($\gamma > 0$, 给定的最大跟踪误差), 即

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{z}^T(k)\mathbf{z}(k) - \gamma^2\mathbf{w}^T(k-d_{ms})\mathbf{w}(k-d_{ms})) \leq 0 \quad \forall \mathbf{w}(k-d_{ms}) \neq 0 \quad (11)$$

2 控制器设计

定理 1: 遥操作系统式(10)渐近稳定, 且满足给定位置跟踪误差 γ ($\gamma > 0$) 的充分条件是存在正定对称阵 \mathbf{X} , \mathbf{W} 和矩阵 \mathbf{Y} 使得式(12)和式(13)成立, 式中 $\Theta = d_2 - d_1 + 1$ 。

$$\begin{pmatrix} -\mathbf{X} & & & & & & \\ 0 & -\mathbf{W} & & & & & \\ 0 & 0 & -\gamma^2\mathbf{I} & & & & \\ \mathbf{A}_d\mathbf{X} + \mathbf{B}_d\mathbf{Y} & \mathbf{A}_{d1}\mathbf{W} & \mathbf{B}_{dw} & -\mathbf{X} & & & \\ \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\Theta}\mathbf{W} & & \\ \mathbf{C}\mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{I} & \\ q\mathbf{Y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{I} \end{pmatrix} < 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{Y}\mathbf{X}^{-1} \quad (13)$$

证明: 令 $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}$, $\mathbf{Y} = \mathbf{K}\mathbf{P}^{-1}$, $\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1}$, 则式(12)等价于式

$$\begin{pmatrix} -P & & & & & & \\ 0 & -R & & & & & \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & & & & \\ A_d + B_d K & A_{d1} & B_{dw} & -P^{-1} & & & \\ I & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\Theta} R^{-1} & & \\ C & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & \\ qK & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (14)$$

选取如下 Lyapunov 函数

$$V(k) = \mathbf{x}^T(k) P \mathbf{x}(k) + V_1(k) + V_2(k) \quad (15)$$

$$V_1(k) = \sum_{m=k-d(k)}^{k-1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) \quad (16)$$

$$V_2(k) = \sum_{n=-d_2+2}^{-d_1+1} \sum_{l=k+n-1}^{k-1} \mathbf{x}^T(l) R \mathbf{x}(l) \quad (17)$$

则

$$\begin{aligned} V_1(k+1) - V_1(k) &= \mathbf{x}^T(k) R \mathbf{x}(k) - \\ &\quad \mathbf{x}^T(k-d(k)) R \mathbf{x}(k-d(k)) + \\ &\quad \sum_{m=k+1-d(k+1)}^{k-d_1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) + \\ &\quad \sum_{m=k+1-d_1}^{k-1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) - \\ &\quad \sum_{m=k+1-d(k)}^{k-1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} V_2(k+1) - V_2(k) &= \\ &\quad \sum_{n=-d_2+2}^{-d_1+1} \left(\mathbf{x}^T(k) R \mathbf{x}(k) + \sum_{l=k+n}^{k-1} \mathbf{x}^T(l) R \mathbf{x}(l) - \right. \\ &\quad \left. \sum_{l=k+n-1}^{k-1} \mathbf{x}^T(l) R \mathbf{x}(l) \right) = (d_2 - d_1) \mathbf{x}^T(k) R \mathbf{x}(k) - \\ &\quad \sum_{m=k-d_2+1}^{k-d_1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) \end{aligned} \quad (19)$$

因为 $d_1 \leq d(k) \leq d_2$, 所以有

$$\sum_{m=k+1-d_1}^{k-1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) - \sum_{m=k+1-d(k)}^{k-1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) \leq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{m=k+1-d(k+1)}^{k-d_1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) - \sum_{m=k-d_2+1}^{k-d_1} \mathbf{x}^T(m) R \mathbf{x}(m) \leq 0 \quad (21)$$

所以, 当 $\mathbf{w}(k)=0$ 时, 有式(22)

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) \leq \\ &\quad \mathbf{x}^T(k) \{ (A_d + B_d K)^T P (A_d + B_d K) - P + \\ &\quad (d_2 - d_1 + 1) R \} \mathbf{x}(k) + \\ &\quad 2 \mathbf{x}^T(k) (A_d + B_d K)^T P A_{d1} \mathbf{x}(k-d(k)) + \\ &\quad \mathbf{x}^T(k-d(k)) (A_{d1}^T P A_{d1} - R) \mathbf{x}(k-d(k)) = \end{aligned}$$

$$\xi(k)^T \Lambda \xi(k) \quad (22)$$

$$\xi(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k-d(k)) \end{pmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} (A_d + B_d K)^T P (A_d + B_d K) - P + & * \\ (d_2 - d_1 + 1) R & \\ A_{d1}^T P (A_d + B_d K) & A_{d1}^T P A_{d1} - R \end{pmatrix}$$

由 Shur 补引理可知, 当式(14)成立时有式(22)<0, 因此闭环系统(10)是渐近稳定的。

当 $\mathbf{w}(k) \neq 0$ 时

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) = \\ &\quad \mathbf{x}^T(k) \Lambda \mathbf{x}(k) + \\ &\quad \mathbf{w}^T(k-d_{ms}(k)) B_{dw}^T P B_{dw} \mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) + \\ &\quad 2 \mathbf{x}^T(k) (A_d + B_d K)^T P B_{dw} \mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) + \\ &\quad 2 \mathbf{x}^T(k-d(k)) A_{d1}^T P B_{dw} \mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) = \\ &\quad \eta(k)^T \Pi \eta(k) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Pi = \left(\begin{array}{c|c} \Lambda & \\ \hline B_{dw}^T P (A_d + B_d K) & B_{dw}^T P A_{d1} \\ \hline B_{dw}^T P B_{dw} & \end{array} \right)$$

$$\eta(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}(k-d(k)) \\ \mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) \end{pmatrix}$$

那么

$$\Delta V(k) + \mathbf{z}^T(k) \mathbf{z}(k) - \gamma^2 \mathbf{w}^T(k-d_{ms}) \mathbf{w}(k-d_{ms}) = \eta(k)^T (\Pi + \Xi) \eta(k) \quad (24)$$

$$\Xi = \begin{pmatrix} C^T C + q^2 K^T K & & \\ 0 & 0 & \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{pmatrix}$$

由 Shur 补引理可知, 当式(14)成立时有

$$\Delta V(k) + \mathbf{z}^T(k) \mathbf{z}(k) - \gamma^2 \mathbf{w}^T(k-d_{ms}) \mathbf{w}(k-d_{ms}) < 0 \quad (25)$$

则

$$\sum_{k=0}^{\infty} \{ \Delta V(k) + \mathbf{z}^T(k) \mathbf{z}(k) - \gamma^2 \mathbf{w}^T(k-d_{ms}) \mathbf{w}(k-d_{ms}) \} < 0 \quad (26)$$

因为零初始 $\mathbf{x}(0)=0$, 且系统是渐近稳定的,

所以闭环系统具有 H_∞ 性能。

证毕。

因为实际系统中环境模型参数往往是不确定的, 所以当参数 k_e , b_e 不确定时, 闭环系统可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = (A_d + \Delta A + B_d K) \mathbf{x}(k) + \\ \quad (A_{d1} + \Delta A_1) \mathbf{x}(k-d(k)) + B_{dw} \mathbf{w}(k-d_{ms}(k)) \\ \mathbf{z}(k) = ((C \mathbf{x}(k))^T \quad (q \mathbf{u}(k))^T)^T \end{cases} \quad (27)$$

式中, ΔA 和 ΔA_1 是反映系统模型中参数不确定性的未知实矩阵, 可描述为式(28)的范数有界形式, 即

$$\Delta A = H_1 F(k) E \quad \Delta A_1 = H_2 F(k) E \quad (28)$$

式中, H_1 , H_2 , E 是具有适当维数的常数矩阵, 反映了不确定参数的结构信息; $F(k)$ 是未知的实值时变矩阵函数, 其元素 Lebesgue 可测且有界, 满足 $F(k)^T F(k) \leq I$, I 为适当维数的单位阵。

$$\begin{pmatrix} -X & & & & & & & & & & \\ 0 & -W & & & & & & & & & \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & & & & & & & & \\ A_d X + B_d Y & A_{d1} W & B_{dw} & -X & & & & & & & \\ X & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\Theta} W & & & & & & \\ CX & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & & & & & \\ qY & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \lambda H_1^T & 0 & 0 & 0 & -\lambda I & & & \\ EX & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I & & \\ 0 & 0 & 0 & \lambda H_2^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I & \\ 0 & EW & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{pmatrix} < 0 \quad (29)$$

$$K = YX^{-1} \quad (30)$$

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

3 仿真结果

选取与文献[10]相同的主手和从手参数, 即 $m_m=1$ kg, $b_m=1$ N·s/m, $k_m=1$ N/m。 $m_s=1$ kg, $b_s=1$ N·s/m, $k_s=0$ N/m, 环境参数: $b_e=0.1$ N·s/m, $k_e=0.1$ N/m。控制周期 $T_c=0.2$ s, 因此取 $d_1=3/0.2=15$, $d_2=5/0.2=25$, $q=0.1$ 。环境参数确定的情况下, 采用定理 1, 可以计算出性能指标

$$\gamma_1=0.427$$

$$K=(-9.978 \ 2, -10.005, -9.779 \ 5, -10.024 \ 2)$$

为了得到单位增益的主从端位置跟踪, 仿真过程中将主端给从端的参考位置反向后再发送给从端。此时, 在如图 2 所示的系统回路时延下, 控制系统的位置和力跟踪曲线如图 3 所示。可以看出, 该控制方法不但可使系统渐近稳定, 还保证了其位置跟踪误差满足给定的性能指标且获得良好的力跟踪效果。

环境参数不确定时, 不确定参数分别为

$$H_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

将定理 1 扩展到针对不确定系统式(27), 得到如下定理。

定理 2: 遥操作系统式(27)渐近稳定, 且满足给定的位置跟踪误差 γ ($\gamma>0$) 的充分条件是存在正定对称阵 W , X , 矩阵 Y 和常数 $\lambda>0$, 使得式(29)和式(30)成立。证明从略。

选取初值 $\lambda=0.1$, 由式(29)和函数 `fminsearch`, 可以寻得 $\lambda=0.114 \ 5$ 时存在次优的 $\gamma_2=0.932 \ 8$, 相应控制增益 $K=(-9.976 \ 4, -10.006 \ 7, -9.778 \ 8, -10.019)$ 。其他参数不变, 而环境参数存在误差, 即 $b_e=0.12$ N·s/m, $k_e=0.12$ N/m 时, 位置和力跟踪曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 当环境模型存在误差时, 所提出的方法也能保证系统的稳定, 并且可以使跟踪性能满足给定的性能指标。

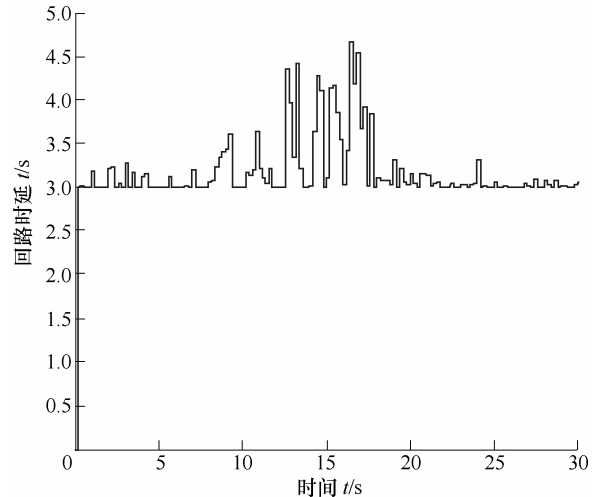
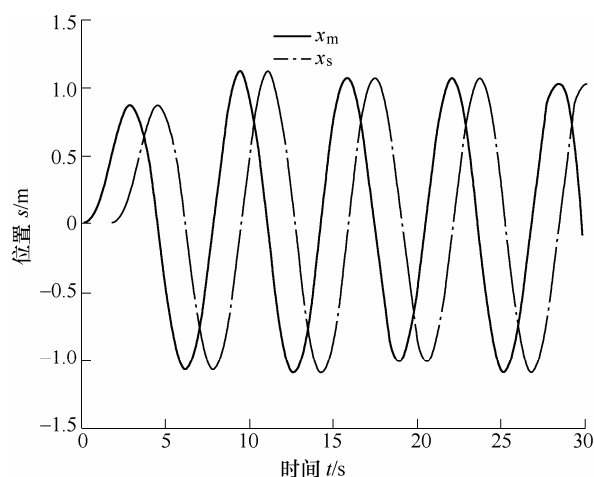
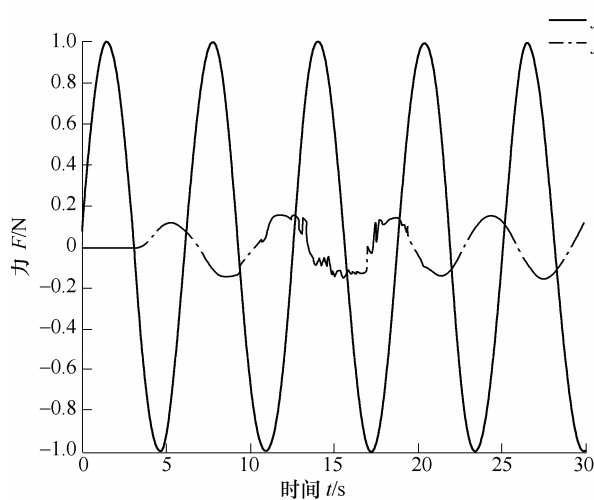


图2 系统回路时延

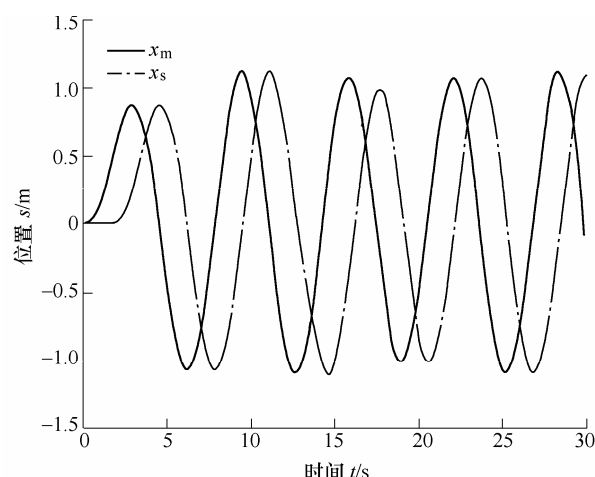


(a) 位置跟踪曲线

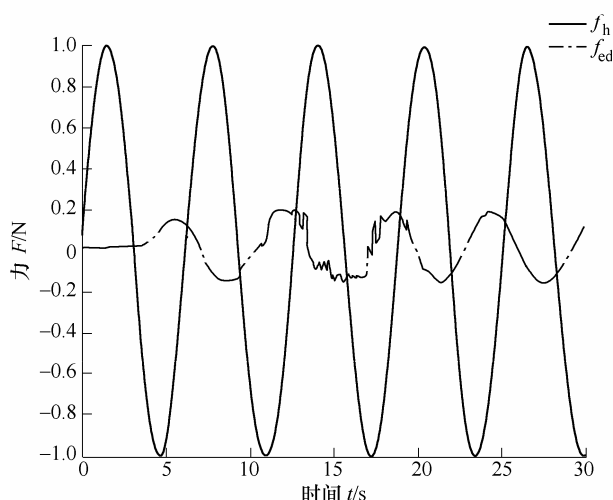


(b) 力跟踪曲线

图3 环境参数确定时的跟踪曲线



(a) 位置跟踪曲线



(b) 力跟踪曲线

图4 环境参数不确定时的跟踪曲线

由仿真结果可知,在环境模型参数不确定情况下,其 H_∞ 性能 γ_2 大于参数确定时的 γ_1 ,即在同样的扰动下,其位置跟踪误差较大。因此,提高控制系统对环境模型参数不确定的鲁棒性是以牺牲位置跟踪误差为代价的。

4 结论

(1) 本文针对空间遥操作系统的大时变时延以及环境模型参数不确定问题,提出一种具有力反馈双边遥操作系统的基于 LMI 的状态反馈 H_∞ 控制器设计方法。通过定义 Lyapunov 函数给出了闭环系统渐近稳定且满足给定跟踪性能的充分条件,并且将其转换成 LMI,采用 Matlab LMI 工具箱求解控制器参数。仿真试验结果表明该方法的有效性。

(2) 该方法只需要已知系统回路时延的上下界,而不需要获得时延的实际值,并且考虑了位置和力跟踪性能,以及环境模型不确定的情况。

参考文献

- [1] BURRIDGE R R, HAMBUCHEN K A. Using prediction to enhance remote robot supervision across time delay[C]// IEEE/RSJ Int. Con. IROS, Oct. 11-15, 2009, St. Louis, MO, United States, 2009: 5628-5634.
- [2] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(5): 494-501.
- [3] CHOPRA N, SPONG M W, LOZANO R. Synchronization of bilateral teleoperation with time delay[J]. Automatica, 2008, 44 (8): 2142-2148.
- [4] 陈丹, 席宁, 王越超, 等. 广义预测控制方法在网络遥操作机器人系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 191-196.
CHEN Dan, XI Ning, WANG Yuechao, et al. Generalized predictive control scheme for the Internet-based telerobot control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 191-196.
- [5] SLAMA T, TREVISANI A, AUBRY D, et al.

- Experimental analysis of an Internet-based bilateral teleoperation system with motion and force scaling using a model predictive controller[J]. IEEE Trans. on Ind. Elect., 2008, 55(9): 3290-3299.
- [6] 陈宜滨, 席宁, 李洪谊. 基于事件的控制理论研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 152-158.
CHEN Yibin, XI Ning, LI Hongyi. Event-based control theories and applications[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 152-158.
- [7] LEUNG G M H, FRANCIS B A. Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis[J]. IEEE Trans. on Rob. and Auto., 1995, 11(1): 105-116.
- [8] FATTOUH A, SENAME O. H_∞ -based impedance control of teleoperation systems with time delay[C]// 4th IFAC Workshop on Time Delay Systems, Sep. 8-10, 2003, Rocquencourt, France, 2003.
- [9] SENAME O, FATTOUH A. Robust H_∞ control of bilateral teleoperation systems under communication time-delay[J]. Appl. of Time Delay Systems, LNCIS, 2007, 352: 99-116.
- [10] SADEGHI M S, MOMENI H R, AMIRIFAR R. H_∞ and L_1 control of a teleoperation system via LMIs[J]. Applied Math. Comp., 2008, 206: 669-677.
- [11] WANG Yan, SUN Zengqi, CHOU Wusheng. Robust controller design for teleoperation systems with time-varying delays[C]// Int. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Mar. 13-14, 2010, Changsha, China, 2010: 266-269.
- [12] SHERIDAN T B. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis[J]. IEEE Trans. Rob. Auto., 1993, 9(5): 592-606.
- [13] ARCARA P, MELCHIORRI C. Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study[J]. Robot. Auton. Syst., 2002, 38: 49-64.
- [14] HOKAYEM P F, SPONG M W. Bilateral teleoperation: An historical survey[J]. Automatica, 2006, 42(12): 2035-2057.
- [15] NUÑO A E, BASAÑEZ L, ORTEGA R. Passivity-based control for bilateral teleoperation: A tutorial[J]. Automatica, 2011, 47(3): 485-495.
- [16] ZHANG Jiafan, FU Hailun, DONG Yiming, et al. Novel 6-dof wearable exoskeleton arm with pneumatic force-feedback for bilateral teleoperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(3): 58-65.
- [17] 蒋再男, 赵京东, 刘宏. 力反馈柔性虚拟夹具辅助遥操作[J]. 机器人, 2011, 33(6): 685-690.
JIANG Zainan, ZHAO Jingdong, LIU Hong. Haptic flexible virtual fixture for teleoperation[J]. Robot, 2011, 33(6): 685-690.
- [18] GAO Haibo, DENG Zongquan, DING Liang, et al. Virtual simulation system with path-following control for lunar rovers moving on rough terrain[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(1): 38-46.

作者简介: 杨艳华 (通信作者), 女, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为遥操作、鲁棒控制、网络控制系统。

E-mail: yangyh@sia.cn

李洪谊, 男, 1972 年出生, 博士后, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为遥操作、微型机器人、仿生机器人。

E-mail: hli@sia.cn