

基于 Internet 的遥操作系统带观测器的反馈控制

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: 通常遥操作系统主、从机械手间存在通信时延, 影响了系统的稳定性和操作性能. 在基于 Internet 的遥操作系统中, 时延是时变的, 对系统的影响尤为剧烈. 为了解决这个问题, 在环境模型未知的条件下, 首先提出在本地控制端用主手状态、预测的从手状态及接触力设计反馈控制器; 接着用时间前向观测器预测从机械手状态, 并将时延变化率建模为系统不确定参数, 最终得到稳定性和透明性条件. 仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词: 遥操作; 时延; 透明性; 预测

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Feedback control with observer for Internet based teleoperation systems

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

(1. School of Automation, 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: There exist time delays in communication channels of a teleoperation system, and time delay reduces significant ability of teleoperation. This problem becomes especially serious in case of Internet-based teleoperation, when the time delay is variable. To overcome the trouble under unknown environment, firstly, an idea of using master state, predicted slave state and contact force between the slave and environment to design a local state feedback controller is proposed. Secondly, state space model of the system is derived. Time forward observer of the slave is established in local controller and the observer is employed to predict the slave state. Moreover, time delay changing rate is modeled as uncertain parameter. Finally, the stability and transparency condition is achieved. Feedback parameters, which satisfies the requirement of design, can be easily obtained by solving a linear matrix inequality. The results of the simulation show the effectiveness of the proposed method.

Key words: teleoperation; time delay; transparency; prediction

1 引言 (Introduction)

遥操作系统自 1948 年诞生之日起, 就得到了广泛的应用. 近几年, 随着网络技术的发展, Internet 逐渐被用到主、从机械手的信号传递中, 为遥操作系统的设计与应用带来了很大的方便, 但同时也带来了很大的负面影响: 主、从机械手间的信号传递存在时变的通信时延. 时变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. 所以研究如何减少 Internet 通讯时延对系统的影响具有十分重要的意义.

对遥操作系统控制器进行设计, 不仅要保证系统的稳定性, 还要保证良好的跟踪性能和透明性. 时变时延下的遥操作系统控制是很困难的, 传统的控

制方法, 例如文献[1~7], 并不能直接使用. 研究人员已提出了几种时变时延的控制方法. Kosuge 等^[8]运用虚拟时延方法, 使得系统时延为常数, 从而可用定常时延的控制方法对系统进行设计. Brady 和 Tam^[9]对 Internet 的时延特性进行了分析. Munir^[10]对 Smith 预估器进行了修正, 并结合波变量方法对系统进行预测. 这些文献大多考虑的是环境已知或非时变的情况, 但在实际应用中, 环境模型往往是未知的.

本文在环境模型未知的条件下将时延变化率建模为不确定参数, 用时间前向观测器预测从手状态, 并用力、位置和速度反馈减小时延对系统影响. 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上述方法短.

2 问题的提出(Problem statement)

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)、通讯环节和从机械手(简称从手)作用于环境,而从手状态经过上述环节返回给主手.

主、从机械手的动力学模型通常表示如下:

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

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

其中: M, B 分别表示质量和阻尼系数,下标 m, s, e 分别表示主机械手、从机械手和环境, v 表示速度. u_d 为主手对从手的控制, u_{dm} 为从手反馈给主手的状态.

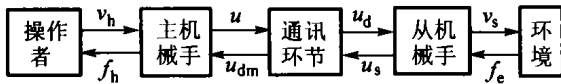


图1 遥操作系统结构框图

Fig. 1 Teleoperation system configuration

本文的通信环节为 Internet, 不可避免地存在时变的通信时延, 设 $T_R(t), T_L(t)$ 分别为前向时延和反向时延, 则

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

即主手当前接收到的信号是从手 $T_L(t)$ 时刻前的状态, 而主手当前的控制信号 $T_R(t)$ 时刻后才能作用于从手, 从而主手对从手的作用效果 $T_L(t) + T_R(t)$ 时刻后才能反馈到主手, 所以反应主手当前控制效果的是 $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$, 而不是 $u_{dm}(t)$. 因此, 对 $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$ 进行预估是非常必要的. 下面先设计系统控制器, 然后用时间前向观测器预测从手状态, 最后对稳定性和透明性进行分析.

3 主要结果(Main results)

3.1 控制器设计(Controller design)

对遥操作机器人系统进行设计, 一般要考虑2个重要的指标: 稳定性和透明性. 对稳定性的要求不用解释, 这是所有系统的共同要求; 透明性是指操作者对环境的感知程度, 当系统完全透明时, 操作者感觉就象在直接对环境进行操作一样, 具有身临其境的感受.

当环境模型未知时, 要使系统透明, 传统的方法^[1,4,9,10]需要相互传递位置、速度、加速度和力的信息. 但加速度一般比较难测量, 增加了系统的实现难度.

经过对系统的分析, 可用主、从手的位置、速度和力信息取代需要传送的加速度信息, 即可设计控制器如下:

$$u_{dm}(t) = f_{11}x_m(t - T(t)) + f_{12}v_m(t - T(t)) + f_{13}x_s(t - T_L(t)) + f_{14}v_s(t - T_L(t)) + c_1f_h(t - T(t)) + c_2f_e(t - T_L(t)). \quad (4)$$

其中: $x_m(t), x_s(t)$ 分别为主、从手位置; $T(t) = T_R(t) + T_L(t)$, $f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}, c_1, c_2$ 为待定系数, $f_1 \triangleq (f_{11} \ f_{12}), \tilde{f}_1 \triangleq (f_{13} \ f_{14})$. 同理可设计

$$u_d(t) = f_{21}x_m(t - T_R(t)) + f_{22}v_m(t - T_R(t)) + f_{23}x_s(t) + f_{24}v_s(t) + c_3f_h(t - T_R(t)) + c_4f_e(t). \quad (5)$$

其中: $f_{21}, f_{22}, f_{23}, f_{24}, c_3, c_4$ 为待定系数, $f_2 \triangleq (f_{21} \ f_{22}), \tilde{f}_2 \triangleq (f_{23} \ f_{24})$.

$u_{dm}(t)$ 包含从手 $t - T_L(t)$ 时的状态, 是 $u(t - T_R(t) - T_L(t))$ 对从手控制效果的反应. 反应 $u(t)$ 对从手控制效果的是 $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$. 所以, 用 $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$ 的预测值取代 $u_m(t)$ 作为从手的反馈信号, 则主手感觉和没时延一样, 彻底消除了时延对透明性的影响. $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$ 的预测值记为 $\hat{u}_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$:

$$\begin{aligned} \hat{u}_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t)) = & f_{11}x_m(t) + f_{12}v_m(t) + f_{13}\hat{x}_s(t + T_R(t)) + \\ & f_{14}\hat{v}_s(t + T_R(t)) + c_1\hat{f}_h(t + T_R(t)) + c_2\hat{f}_e(t + T_R(t)). \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\hat{f}_e(t + T_R(t))$ 为 $f_e(t + T_R(t))$ 的预测值, 由神经网络模型实现, 具体的预测方法已另文给出, 在此不再赘述. $\hat{x}_s(t + T_R(t)), \hat{v}_s(t + T_R(t))$ 分别为 $x_s(t + T_R(t)), v_s(t + T_R(t))$ 的预测值, 由时间前向观测器实现.

这样既解决了传统方法中控制信号包含加速度的问题, 也消除了时延对透明性的影响.

3.2 观测器设计(Observer design)

将式(5)代入式(2), 可得从手的状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_s(t) = (A_s + b_s \tilde{f}_2) \bar{x}_s(t) + b_s(c_4 - 1)f_e(t) + b_s \hat{u}_d(t), \\ \bar{y}(t) = c' \bar{x}_s(t), \\ t \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\bar{x}_s(t) = \begin{pmatrix} x_s(t) \\ v_s(t) \end{pmatrix}, \quad A_s = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{B_s}{M_s} \end{pmatrix}, \quad b_s = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_s} \end{pmatrix},$$

$$c' = (1 \quad 1),$$

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

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

为了预测 $u_{dm}(t + T_R(t) + T_L(t))$, 首先必须预测 $x_s(t + T_R(t)), v_s(t + T_R(t))$, 故将式(7)的时间前移 $T_R(t)$:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_s(t + T_R(t)) = \\ (1 + \dot{T}_R(t))\{(A_s + b_s\tilde{f}_2)\bar{x}_s(t + T_R(t)) + \\ b_s(c_4 - 1)f_e(t + T_R(t)) + \\ b_s[f_{21}\bar{x}_m(t + T_R(t) - T_R(t + T_R(t))) + \\ c_3f_h(t + T_R(t) - T_R(t + T_R(t)))]\}, \\ \bar{y}(t + T_R(t)) = c'\bar{x}_s(t + T_R(t)). \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\bar{x}_m(t) = (x_m(t) \quad v_m(t))^T$ 。

由于实时计算 $\dot{T}_R(t)$ 存在一定的困难,即使能计算出来也存在很大的误差,将 $\dot{T}_R(t)$ 当作系统不确定参数来考虑,可得以下模型:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_s(t + T_R(t)) = \\ (A_s + b_s\tilde{f}_2 + \Delta A_s(t))\bar{x}_s(t + T_R(t)) + (b_s(c_4 - 1) + \Delta\tilde{b}_s(t))f_e(t + T_R(t)) + (b_s + \Delta b_s(t))[f_{21}\bar{x}_m(t) + c_3f_h(t) + w(t)], \\ \bar{y}(t + T_R(t)) = c'\bar{x}_s(t + T_R(t)). \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\Delta A_s, \Delta b_s$ 为不确定参数:

$$\Delta A_s(t) = \Delta(t)(A_s + b_s\tilde{f}_2),$$

$$\Delta\tilde{b}_s(t) = \Delta(t)b_s(c_4 - 1),$$

$$\Delta b_s(t) = \Delta(t)b_s, \quad \Delta(t) = \dot{T}_R(t),$$

$$w(t) = f_{21}\bar{x}_m(t + T_R(t) - T_R(t + T_R(t))) + c_3f_h(t + T_R(t) - T_R(t + T_R(t))) - f_{21}\bar{x}_m(t) - c_3f_h(t).$$

$w(t)$ 是由时延的变化产生的,视作系统扰动。

$f_e(t + T_R(t))$ 检测不到的,用 $\hat{f}_e(t + T_R(t))$ 代替;同样的, $\bar{x}_s(t + T_R(t))$ 是得不到的,建立观测器对 $\bar{x}_s(t + T_R(t))$ 进行观测:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \\ (A_s + b_s\tilde{f}_2)z(t) + b_s(c_4 - 1)\hat{f}_e(t + T_R(t)) + b_s(f_{21}\bar{x}_m(t) + c_3f_h(t)) + \\ L(\bar{y}(t - T_L(t)) - y(t - T_R(t) - T_L(t))), \\ y(t) = c'z. \end{cases} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & (A_s + b_s\tilde{f}_2)e(t) + \Delta A_s(t)\bar{x}_s(t + T_R(t)) + \\ & (b_s(c_4 - 1) + \Delta\tilde{b}_s(t))f_e(t + T_R(t)) - \\ & b_s(c_4 - 1)\hat{f}_e(t + T_R(t)) + Lc'e(t - T_L(t) - T_R(t)) + \Delta b_s(t)(f_{21}\bar{x}_m(t) + \\ & c_3f_h(t)) + (b_s + \Delta b_s(t))w(t). \end{aligned} \quad (11)$$

3.3 系统模型(System model)

用 $\hat{u}_{dm}(t + T_R + T_L)$ 取代 $u_m(t)$ 作为从手的反馈信号,并将式(6)中的 $\bar{x}_s(t + T_R(t)), \bar{v}_s(t + T_R(t))$ 用观测值 z 代替,则主、从手模型和观测误差方程可用一个状态方程描述如下:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} A + BF + \Delta A(t) & B\tilde{f}_1 \\ \Delta E(t) & A_s + b_s\tilde{f}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ e(t) \end{pmatrix} + \\ & \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Lc' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t - T(t)) \\ e(t - T(t)) \end{pmatrix} + \\ & \begin{pmatrix} B_1 + \Delta B_1(t) \\ B_2 + \Delta B_2(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{f}_e(t + T_R(t)) \\ f_e(t + T_R(t)) \end{pmatrix} + \\ & \begin{pmatrix} B_3 + \Delta B_3(t) \\ b_s + \Delta b_s(t) \end{pmatrix} w(t) + (b + \Delta b(t))f_h(t), \end{aligned} \quad (12)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (13)$$

其中

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

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \end{pmatrix}, \quad B_1 \triangleq (b_{11} \quad b_{12}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{c_2}{M_m} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_4 - 1}{M_s} \end{pmatrix},$$

$$b = \left(0 \quad \frac{1 - c_1}{M_m} \quad 0 \quad \frac{c_3}{M_s} \quad 0 \quad 0\right)^T,$$

$$F = \begin{pmatrix} f_1 & \tilde{f}_1 \\ f_2 & \tilde{f}_2 \end{pmatrix}, \quad \tilde{f}_1 = \begin{pmatrix} -\tilde{f}_1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$B_2 = ((1 - c_4)b_s \quad (c_4 - 1)b_s),$$

$$B_3 = (0 \quad b_s)^T, \quad C = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 1),$$

$$\Delta E(t) = (b_s\tilde{f}_2 \quad A_s + b_s\tilde{f}_2)\Delta(t) = E_2\Delta(t),$$

$$\Delta A(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ E_2 \end{pmatrix} \Delta t \triangleq E_1\Delta(t),$$

$$\Delta B_2(t) = (0 \quad (c_4 - 1)b_s)\Delta(t),$$

$$\Delta B_1(t) = (0 \quad b_{12})\Delta(t),$$

$$\Delta B_3(t) = \Delta(t)B_3,$$

$$\Delta b(t) = (0 \quad b_s^T c_3 \quad b_s^T c_3)^T \Delta(t).$$

根据系统特性,本文作如下假设:

假设 1 $\forall t \in [0, \infty), \exists \varepsilon$ 使得 $|\dot{T}_R(t)| \leq \varepsilon$, 其中 $\varepsilon \in (0, \frac{1}{2.5 + M_s}) \cup (\frac{1}{2}, 1)$; $\forall t \in [0, \infty)$, $\exists \sigma \in (0, 1)$ 使得 $|\dot{T}(t)| \leq \sigma$;

假设 2 设 $\omega(t) = x(t + T_R(t) - T_R(t + T_R(t))) - x(t)$, $\forall t \in [0, \infty)$, $\exists k \in (0, 1)$ 使得

$$\begin{pmatrix} Q_1 & PB\bar{f}_1 & 0 \\ (B\bar{f}_1)^T P & Q_2 & PeLc' \\ 0 & (Lc')^T Pe & -S(1-\sigma) \\ Q_3 & (c_4 - 1)b_s^T Pe & 0 \\ Q_4 & Q_5 & -\frac{1}{2}\bar{c}Lc' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_3^T & Q_4^T \\ (c_4 - 1)Peb_s & Q_5^T \\ 0 & -\frac{1}{2}(Lc')^T \bar{c}^T \\ Q_6 & 0 \\ 0 & Q_7 \end{pmatrix} < 0. \quad (14)$$

其中

$$\bar{c} = (0 \quad 1), \quad \bar{c} = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1),$$

$$Q_1 = (A + BF - \varepsilon E_1)^T P + P(A + BF - \varepsilon E_1) + P[\varepsilon b_{12}b_{12}^T + (1 + \varepsilon)B_3\bar{f}_2(B_3\bar{f}_2)^T]P + (1 + \frac{3}{4}\varepsilon)\bar{c}E_2(\bar{c}E_2)^T + k(1 + \varepsilon)I,$$

$$Q_2 = (A_s + b_s\bar{f}_2 - \varepsilon E_2)^T Pe + Pe(A_s + b_s\bar{f}_2 - \varepsilon E_2) + Pe[(1 + \varepsilon)b_s\bar{f}_2(b_s\bar{f}_2)^T + |1 - c_4| \varepsilon b_s b_s^T]Pe + S,$$

$$Q_3 = b_{12}^T P + \frac{1}{2}\bar{c}(A + BF), \quad Q_4 = b_{11}^T P + \frac{1}{2}\bar{c}(A + BF),$$

$$Q_5 = -(c_4 - 1)b_s^T Pe - \frac{1}{2}\bar{c}(A_s + b_s\bar{f}_1),$$

$$Q_6 = \frac{c_4 - 1}{M_s}[1 - (\frac{5}{2} + M_s)\varepsilon] + 2\varepsilon,$$

$$Q_7 = \frac{c_4 - 1}{M_s}(1 - 2\varepsilon) + 4\varepsilon + 1.$$

证 取系统 V 函数为

$$V(x, e) = x^T(T)Px(t) + e^T(t)Pe(t) + \int_{t-T(t)}^t e^T(\tau)Se(\tau)d\tau + \int_0^{t+T_R(t)} f_e(\tau)\dot{V}_s(\tau)d\tau + \int_0^t \hat{f}_e(\tau + T_R(\tau))\bar{c}\dot{z}(\tau)d\tau$$

其中 P, Pe 和 S 为待定的正定阵.

求 $V(x, e)$ 关于时间的导数 $\dot{V}(x, e)$, 并根据引理 1 将 $\dot{V}(x, e)$ 进行适当的缩放, 则可得到以下结果:

$$\dot{V}(x, e) \leq \tilde{x}^T(t)\Xi\tilde{x}(t).$$

$$\omega^T(t)\omega(t) \leq kx^T(t)x(t).$$

假设 3 $\forall t \in [0, \infty), \int_0^t f_e(\tau)\dot{v}_e(\tau)d\tau > 0$,

$\int_0^t \hat{f}_e(\tau + T_R)\bar{c}\dot{z}(\tau)d\tau > 0$, 其中 $\bar{c} = (0 \quad 1)$.

3.4 稳定性分析(Stability analysis)

引理 1^[11] 对于任意适当维数的矩阵 X, Y 有

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

定理 1 如果存在矩阵 L, F 和正定阵 P, Pe, S , 使得不等式(4)成立, 则式(12), (13)所示基于观测器的遥操作系统是鲁棒渐近稳定的.

其中: $\tilde{x}(t) = (x(t) \quad e(t) \quad e(t - T) \quad f_e(t + T_R(t)) \quad \hat{f}_e(t + T_R(t)))^T$, Ξ 代表矩阵不等式(14)左端的矩阵. 由式(14)得 $\dot{V}(x, e) < 0$.

所以, 当控制参数满足(14)时, 系统是鲁棒渐近稳定的.

注 1 由于参数较多, 不等式(14)不易求解, 可根据 Schur 补引理^[12]将(14)化为线性矩阵不等式, 然后用 MATLAB 的线性矩阵不等式工具箱可方便地求得控制参数.

3.5 透明性分析(Transparency analysis)

遥操作机器人系统可等效为一个二端口网络: 力等效为电压、速度等效为电流^[1]. 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. 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、从机械手能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.

将式(12)进行拉氏变换, 根据透明性定义得到如下透明性条件:

$$c_2 = 1 - c_4, \quad (15)$$

$$c_3 = 1 - c_1, \quad (16)$$

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

$$M_s(f_{12} + f_{22}) + M_m(f_{14} + f_{24}) - M_m B_s + M_s B_m = 0, \quad (18)$$

$$M_s(f_{11} + f_{21}) + M_m(f_{23} + f_{13}) = 0. \quad (19)$$

即当控制参数满足式(15)~(19)并有 $|c_3| \gg 1$

成立时, $\frac{F_h(s)}{V_m(s)} \rightarrow Z_e$, 即系统可获得良好的透明性, 与环境模型已知时得到的透明性条件相同. 在设计控制参数时, 可先设计 c_3 , 使得 $|c_3| \gg 1$, 再对其它参数进行设计.

综上所述, 可得以下推论:

推论 1 如果存在矩阵 F, F' , 常数 c_1, c_2, c_3, c_4 和正定矩阵 P, S 满足式(14) ~ (19) 及 $|c_3| \gg 1$, 则式(12)所示基于观测器的遥操作系统是鲁棒渐近稳定的, 还可获得良好的透明性.

4 仿真结果 (Simulation results)

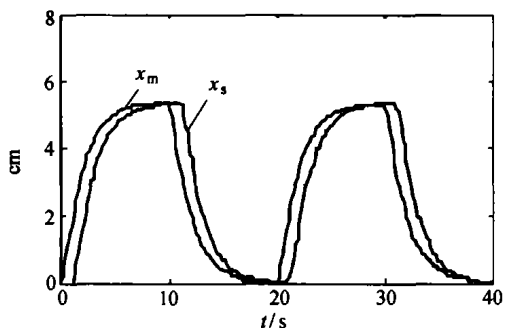
用于仿真的主、从手参数为 $M_m = M_s = 1.532$, $B_m = B_s = 0.051$; 通信时延 $T_R = 1\text{ s} \sim 1.2\text{ s}$, $T_L = 1.4\text{ s} \sim 1.6\text{ s}$, 而且 $\epsilon = 0.2, \sigma = 0.6$, 环境为一个二阶系统. 取 $c_1 = c_4 = -30, c_2 = c_3 = 31$, 由式(14) ~ (19), 由 MATLAB 解得一组反馈系数:

$$F = \begin{pmatrix} 31.3533 & 64.4843 & 23.1174 & 52.8127 \\ -23.1174 & -52.8127 & -31.3533 & -64.4843 \end{pmatrix},$$

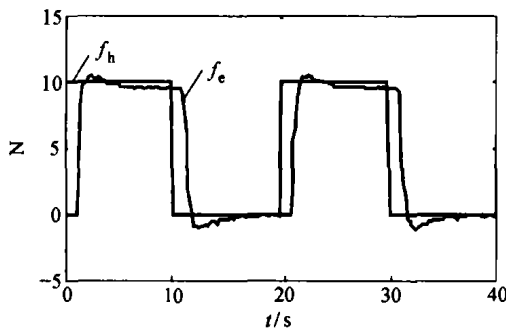
$$L = \begin{pmatrix} -128.4820 \\ 56.5543 \end{pmatrix}.$$

仿真结果如图 2 所示.

仿真表明: 主、从机械手工作稳定, 主机械手的位置和力变化情况同 1.1 s 后从机械手的情况较为一致, 从手的跟踪时间比传统的方法提前了约 1.5 s (T_L), 即在时间前向观测器的作用下, 系统好像没有反向时延, 说明用观测器预估有效.



(a) 位置跟踪曲线



(b) 力跟踪曲线

图 2 仿真曲线

Fig. 2 Simulation results

5 结束语 (Conclusion)

针对时变的 Internet 时延对遥操作系统的影响, 在环境模型未知条件下, 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. 分析和仿真表明, 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, 而且透明性良好.

参考文献 (References):

- [1] LAWRENCE D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1993, 8(2): 624 - 637.
- [2] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay [J]. *IEEE Trans on Automation Control*, 1989, 34(4): 494 - 501.
- [3] NIEMEYER G, SLOTINE J J E. Stable adaptive teleoperation [J]. *IEEE J of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152 - 162.
- [4] 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.
- [5] SONG A G, HUANG W Y. Adaptive passive control of space telemanipulation systems [J]. *J of Astronautics*, 1997, 18(3): 26 - 32.
- [6] 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.
- [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] KOSUGE K, MURAYAMA H, TAKEO K. Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network [C] // *Proc of 1996 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Osaka: IEEE Press, 1996: 1380 - 1385.
- [9] BRADY K, TARN T J. Internet-based remote teleoperation [C] // *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation*. Leuven: IEEE Press, 1998: 65 - 70.
- [10] MUNIR S. *Internet based teleoperation* [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2001.
- [11] PETERSEN I R, HOLLOT C V. A Riccati equation to the stabilization of uncertain linear system [J]. *Automatica*, 1986, 22(4): 397 - 411.
- [12] MALEK M Z, JAMSHIDI M. Time delay systems: analysis, optimization and application [M] // *North Holland System and Control Series*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987.
- [13] JIANG X F. *Robust and adaptive control of linear time delay system* [D]. Nanjing: Southeast University, 2001.

作者简介:

陈启宏 (1975—), 男, 博士, 副教授, 研究兴趣为遥操作系统控制技术, E-mail: qh.chen@hotmail.com;

费树岷 (1961—), 东南大学自动化研究所教授, 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;

宋爱国 (1968—), 男, 东南大学仪器科学与工程系教授, 博士生导师, 研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.