

基于广义扩张状态观测器的遥操作系统同步控制

张文安, 金俊凯, 俞立, 陆群

(浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对机械臂遥操作系统中存在的时变时延问题, 提出基于广义扩张状态观测器的控制方法, 以实现遥操作系统稳定且主从机械臂关节角位置同步的控制目标. 通过反馈线性化, 将遥操作系统的主从机械臂动力学模型转化为一个关于位置跟踪误差和时延的状态空间模型. 针对该多输入多输出的干扰不匹配模型, 设计广义扩张状态观测器和相应的控制律, 从而消除时变时延以及其他扰动引起的不确定性对系统的影响, 并对系统进行稳定性和抗扰性分析. 仿真实验验证了所设计的控制方法的有效性.

关键词: 遥操作; 时延; 同步控制; 扩张状态观测器

中图分类号: TP242

文献标志码: A

Synchronization control of teleoperation systems based on generalized extended state observers

ZHANG Wen-an, JIN Jun-kai, YU Li, LU Qun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China. Correspondent: ZHANG Wen-an, E-mail: wazhang@zjut.edu.cn)

Abstract: This paper investigates the synchronization control problem for teleoperation systems with time-varying delays based on generalized extended state observers(GESO). The proposed controller ensures the stability of the teleoperation system as well as the synchronization of positions of the master and slave manipulators. By feedback linearization, the nonlinear dynamics of the teleoperation system is transformed into a state space model about tracking errors and time delay. Then, the GESO and the control law are designed for the multiple input multiple output model with mismatched uncertainties, and the GESO is able to estimate the uncertainties induced by the time-varying delay and other disturbance. Moreover, the stability and disturbance analysis are also presented for the teleoperation system. Finally, simulations are provided to verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: teleoperation; time delay; synchronization control; generalized extended state observer

0 引言

遥操作机器人的出现使得人类可以完成在难以接近或危险环境中的复杂作业, 从而在一定程度上扩展了人类的感知和操作能力, 保证了人类的安全. 目前, 遥操作机器人系统已被广泛应用在空间探索、深海开发、军事、核工业和医疗等领域, 具有重要的用途和广阔的应用前景^[1]. 但是, 随着遥控距离的增加, 通信环节的时间延迟是一个不可忽略的重要问题. 在遥操作系统中, 时延是降低遥操作性能, 影响系统透明性和稳定性的根本原因^[2].

通常, 模型的不确定性、初始状态偏移和时延都可能会引起遥操作系统主从机械臂运动的不同步. 传

统的遥操作机器人系统的控制方法主要包括预测控制^[3]、远程规划^[4]和双边控制, 其中双边控制又包括无源控制^[5]、鲁棒控制^[6]和四通道控制^[7]等方法. 上述方法中, 大部分控制算法对系统参数的鲁棒性和外界扰动的抗干扰能力比较差, 而且对系统的先验知识要求比较高. 而实际的遥操作系统, 由于建模的不精确、器件老化、环境阻力、未建模动态以及通信环境的复杂性、多变性和突然性, 得到的结果往往也与实际期望相差较远. 文献[8]中采用自抗扰控制方法来完成空间机械臂在重力环境变化下的轨迹跟踪任务, 但是未考虑存在时延的情况. 另一方面, 很多文献研究的是固定时延问题^[9-10], 但是实际系统中通信环节的

收稿日期: 2015-08-28; **修回日期:** 2016-01-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573319, 61273117); 浙江省自然科学基金项目(LR16F030005, LZ15F030003).

作者简介: 张文安(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制和多传感器融合等研究; 金俊凯(1991—), 男, 硕士生, 从事遥操作和机器人控制的研究.

时延是时变的,用定常时延模拟通信环节误差较大,在实际中不能得到期望的效果.针对时变时延的问题,文献[11]提出了一种结合自适应神经网络和非线性模型预测控制的方法补偿时延和丢包;文献[12]针对时变时延和模型缺失的系统提出了一种输入输出方法来进行时滞稳定性分析并设计控制器.但是,这两种方法都不是针对遥操作系统设计的.

考虑到自抗扰控制器^[13]中的核心模块——扩张状态观测器,能将系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总和扰动”而进行估计,因此本文希望应用扩张状态观测器来设计同步控制器,以实现按时延引起的不确定性进行补偿.然而,常规的扩张状态观测器针对的是单输入单输出的积分串联型系统,而多自由度的机械臂遥操作系统是多输入多输出的,并且存在着干扰不匹配问题,因此常规的扩张状态观测器已不适用.

针对上述这些问题,本文采用基于广义扩张状态观测器的控制方法^[14]对存在时变时延的多自由度机械臂遥操作系统进行运动同步控制.首先,通过一个非线性反馈,将遥操作控制系统转变成一个带时延扰动的状态空间模型;然后,设计广义扩张状态观测器和状态反馈控制律,估计并补偿模型中时变时延引起的不确定性,并对设计的遥操作控制系统进行稳定性和抗扰性分析;最后给出一个仿真例子,以验证此方法能有效处理机械臂遥操作系统中网络诱导时延以及初始状态偏移带来的不确定性问题.

1 问题描述

当遥操作系统处于自由运动时, n 自由度的主机机械臂和 n 自由度的从机械臂在关节空间的非线性动力学模型可以描述为

$$\begin{aligned} M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(\dot{q}_m, q_m)\dot{q}_m + \\ f_m(\dot{q}_m) + G_{q_m}(q_m) = \tau_m, \quad (1) \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(\dot{q}_s, q_s)\dot{q}_s + \\ f_s(\dot{q}_s) + G_{q_s}(q_s) = \tau_s. \quad (2) \end{aligned}$$

其中: $q_m, q_s \in R^n$ 表示关节角位置; $\tau_m, \tau_s \in R^n$ 表示输入力矩向量; $M_m(q_m), M_s(q_s) \in R^{n \times n}$ 表示惯性矩阵; $C_m(q_m, \dot{q}_m), C_s(q_s, \dot{q}_s) \in R^{n \times n}$ 表示离心力和哥氏力矩阵; $G_m(q_m), G_s(q_s) \in R^n$ 表示重力项; $f_m(\dot{q}_m), f_s(\dot{q}_s) \in R^n$ 表示外部摩擦力.

由于机械臂遥操作系统的通信环节中存在的时变时延是一个不可忽略的问题,本文假设其前后向通信通道中时变时延均为 $d_t(t)$,并且时延 $d_t(t)$ 及其一阶导数 $\dot{d}_t(t)$ 是有界的.如无特殊说明,下文用 d_t 代替 $d_t(t)$.

本文的目的是设计基于广义扩张状态观测器的

控制方法,在通信环节中存在时变时延的情况下,保证整个遥操作系统稳定,且使主从机械臂的关节角位置状态达到同步,即满足

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |q_m(t - d_t(t)) - q_s(t)| &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |q_s(t - d_t(t)) - q_m(t)| &= 0. \end{aligned}$$

2 控制器设计

2.1 模型线性化

参考文献[15]的方法对上述的遥操作系统模型线性化.定义变量

$$\begin{aligned} r_m = \dot{q}_m + \Lambda q_m, \quad r_s = \dot{q}_s + \Lambda q_s, \\ \dot{q}_{mr} = -\Lambda q_m, \quad \dot{q}_{sr} = -\Lambda q_s. \end{aligned}$$

其中: Λ 是一个正定的对角矩阵, r_m 是主机机械臂关节角位置向量 q_m 和速度向量 \dot{q}_m 的线性组合, r_s 是从机械臂关节角位置向量 q_s 和速度向量 \dot{q}_s 的线性组合.因此,可以用 r_m 和 r_s 的收敛性来代表系统的稳定性.

由 $\dot{q}_j = -\Lambda q_j + r_j$ 可以得到 $\ddot{q}_j = -\Lambda \dot{q}_j + \dot{r}_j$,其中 $j = m, s$.令

$$\begin{aligned} \mu_m = M_m(q_m)\ddot{q}_{mr} + C_m(\dot{q}_m, q_m)\dot{q}_m + \\ f_m(\dot{q}_m) + G_m(q_m), \\ \mu_s = M_s(q_s)\ddot{q}_{sr} + C_s(\dot{q}_s, q_s)\dot{q}_s + \\ f_s(\dot{q}_s) + G_s(q_s). \end{aligned}$$

结合式(1)和(2)可以得到

$$M_m(q_m)\dot{r}_m = \tau_m - \mu_m, \quad (3)$$

$$M_s(q_s)\dot{r}_s = \tau_s - \mu_s. \quad (4)$$

对遥操作系统采用如下形式的非线性反馈控制律:

$$\tau_m = M_m(q_m)(U_m + M_m^{-1}(q_m)\mu_m), \quad (5)$$

$$\tau_s = M_s(q_s)(U_s + M_s^{-1}(q_s)\mu_s). \quad (6)$$

可以将 q_m 和 q_s 的闭环子系统转化为如下形式的附加控制:

$$\dot{r} = U. \quad (7)$$

其中: $r = [r_m^T \ r_s^T]^T$; $U = [U_m^T \ U_s^T]^T$, U_m 和 U_s 是需要设计的两个附加控制变量,具体将在下文给出.定义位置跟踪误差如下:

$$e_m(t) = q_m(t - d_t) - q_s(t), \quad (8)$$

$$e_s(t) = q_s(t - d_t) - q_m(t). \quad (9)$$

如果上述主从机械臂的位置跟踪误差趋向于零,则所讨论的遥操作系统就实现了主从端运动同步.对两个跟踪误差分别求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_m(t) = \dot{q}_m(t - d_t) - \dot{q}_s(t) = \\ [-\Lambda q_m(t - d_t) + r_m(t - d_t)] \times \\ (1 - \dot{d}_t) + \Lambda q_s(t) - r_s(t) = \\ -\Lambda e_m(t) + \Lambda q_m(t - d_t)\dot{d}_t + \end{aligned}$$

$$r_m(t - d_t)(1 - \dot{d}_t) - r_s(t), \tag{10}$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_s(t) &= \dot{q}_s(t - d_t) - \dot{q}_m(t) = \\ &[-\Lambda q_s(t - d_t) + r_s(t - d_t)] \times \\ &(1 - \dot{d}_t) + \Lambda q_m(t) - r_m(t) = \\ &- \Lambda e_s(t) + \Lambda q_s(t - d_t) \dot{d}_t + \\ &r_s(t - d_t)(1 - \dot{d}_t) - r_m(t). \end{aligned} \tag{11}$$

由式 (10) 和 (11) 可得

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \begin{bmatrix} \dot{e}_m \\ \dot{e}_s \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} -\Lambda & 0 \\ 0 & -\Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_m \\ e_s \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} r_m(t - d_t)(1 - \dot{d}_t) - r_s(t) \\ r_s(t - d_t)(1 - \dot{d}_t) - r_m(t) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \Lambda q_m(t - d_t) \dot{d}_t \\ \Lambda q_s(t - d_t) \dot{d}_t \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定义变量 $X = [e^T r^T]^T$, 则 $X \in R^{4n \times 1}$. 结合式 (7), 可以建立如下的增广动态系统:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= [\dot{e}_m^T \dot{e}_s^T \dot{r}_m^T \dot{r}_s^T]^T = \\ &\begin{bmatrix} -\Lambda & 0 & 0 & -I \\ 0 & -\Lambda & -I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_m \\ e_s \\ r_m \\ r_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \\ &\begin{bmatrix} (1 - \dot{d}_t)r_m(t - d_t) + \Lambda q_m(t - d_t)\dot{d}_t \\ (1 - \dot{d}_t)r_s(t - d_t) + \Lambda q_s(t - d_t)\dot{d}_t \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ U_s \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{12}$$

从而由式 (12) 表示的增广动态系统可以简写如下:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_d W + B_u U, \\ Y_m = C_m X, \\ Y_o = C_o X. \end{cases} \tag{13}$$

其中

$$W = \begin{bmatrix} (1 - \dot{d}_t)r_m(t - d_t) + \Lambda q_m(t - d_t)\dot{d}_t \\ (1 - \dot{d}_t)r_s(t - d_t) + \Lambda q_s(t - d_t)\dot{d}_t \end{bmatrix}$$

为观测器需估计的未知扰动; $U, W \in R^{2n \times 1}$; $A \in R^{4n \times 4n}$; $B_f, B_d, B_u \in R^{4n \times 2n}$; $Y_m \in R^{4n \times 1}$ 为测量输出, $Y_o \in R^{2n \times 1}$ 为控制输出. 由此可得

$$\begin{aligned} C_m &= \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}_{4n \times 4n}, \\ C_o &= \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \end{bmatrix}_{2n \times 4n}. \end{aligned}$$

本文的控制目标是在主从机械臂初始状态不一致的情况下, 设计控制器使遥操作系统稳定, 使扰动对系统的影响尽可能小, 达到时延补偿和同步控制的目的.

2.2 广义扩张状态观测器设计

从式 (12) 中的状态空间模型可以看出, 扰动和控制量不在相同通道上, 即存在干扰不匹配问题. 所以常规的扩张状态观测器设计方法对这个多输入多输出系统已经不适用, 对此考虑设计广义扩张状态观测器对扰动进行估计补偿.

定义一个扩张变量 $X_{4n+1} = W$, 则 $X_{4n+1} \in R^{2n \times 1}$, 原来的系统可以扩张为

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = \bar{A}\hat{X} + \bar{B}_u U + E H, \\ Y_m = \bar{C}_m \hat{X}. \end{cases} \tag{14}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{X} &= [X^T X_{4n+1}^T]^T_{6n \times 1}, \\ H &= \dot{W}_{2n \times 1}, \\ \bar{A} &= \begin{bmatrix} A_{4n \times 4n} & (B_d)_{4n \times 2n} \\ 0_{2n \times 4n} & 0_{2n \times 2n} \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_u &= \begin{bmatrix} (B_u)_{4n \times 2n} \\ 0_{2n \times 2n} \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_m &= [(C_m)_{4n \times 4n} \quad 0_{4n \times 2n}], \\ E &= \begin{bmatrix} 0_{4n \times 2n} \\ I_{2n \times 2n} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

可以验证系统 (\bar{C}_m, \bar{A}) 是可观的, 则对于扩张的系统 (14) 可以设计广义扩张状态观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = \bar{A}\hat{X} + \bar{B}_u U + L(Y_m - \hat{Y}_m), \\ \hat{Y}_m = \bar{C}_m \hat{X}. \end{cases} \tag{15}$$

其中: $\hat{X} = [\hat{X}, \hat{X}_{4n+1}]^T$ 是对状态量和未知扰动的估计值; L 是需要设计的观测器增益, 满足扩张后系统观测器 (15) 的闭环特征方程

$$\lambda_1(s) = |sI - (\bar{A} - L\bar{C}_m)| = \prod_{k=1}^{6n} (s - \beta_k).$$

β_k 为需要配置的闭环极点.

2.3 控制律设计

验证由式 (13) 表示的系统 (A, B_u) 是可控的, 则可以设计如下控制律:

$$U = K_x \hat{X} + K_d \hat{W}, \tag{16}$$

其中 K_x 和 K_d 分别是反馈控制增益矩阵和扰动增益矩阵, K_x 满足原系统 (13) 的闭环特征方程

$$\lambda_2(s) = |sI - (A + B_u K_x)| = \prod_{i=1}^{4n} (s - \beta_i).$$

β_i 为需要配置的闭环极点. 但是, 遥操作系统两端的

控制律与其在同一端的状态量有关,而与不同端的状态量无关,所以对于 K_x 的结构是有限制的. 设本文中主从机械臂遥操作系统的状态控制律为

$$U_x = \begin{bmatrix} U_m \\ U_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 r_m(t) \\ K_2 r_s(t) \end{bmatrix}.$$

因此,可以得到 K_x 的结构为

$$K_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_2 \end{bmatrix}.$$

从而推出

$$|sI - (A + B_u K_x)| = \prod_{i=1}^{4n} (s - \beta_i) = |sI + \Lambda| |sI + \Lambda| |sI - K_1| |sI - K_2|.$$

即所求极点为 $\beta_i = -\Lambda, -\Lambda, K_1, K_2$.

由上面极点配置求得 K_x 后,可以参考文献[14]中的方法,通过用待定系数法求解下式得到 K_d :

$$C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_u K_d = -C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_d. \tag{17}$$

令 $K_d = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$,代入式(17)可以得到

$$\begin{bmatrix} 0 & -\Lambda^{-1} K_2^{-1} \\ -\Lambda^{-1} K_1^{-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda^{-1} & 0 \\ 0 & \Lambda^{-1} \end{bmatrix}.$$

因此,可以解得

$$K_d = \begin{bmatrix} 0 & -K_1 \\ -K_2 & 0 \end{bmatrix}.$$

满足状态量与控制律在同一端的要求.

注1 式(17)中 $(A + B_u K_x)^{-1}$ 的求解稍微复杂,对于 n 个关节的机械臂系统,需要求解的逆矩阵维数是 $4n$.

可以得到基于广义扩张状态观测器的控制结构图,如图1所示.

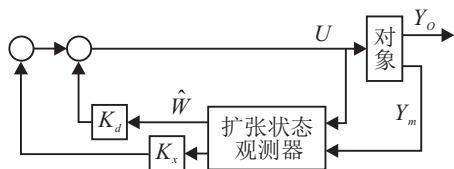


图1 基于广义扩张状态观测器控制结构

3 稳定性和抗扰性分析

假定 q_j 和 \dot{q}_j 是有界的,则 r_j 也是有界的,从而可以得出 W 和 $H = \dot{W}$ 也是有界的. 定义状态量和扰动的估计误差分别如下:

$$e_x = \hat{X} - X, \\ e_w = \hat{W} - W.$$

记 $e = [e_x^T \ e_w^T]^T, A_e = \bar{A} - L\bar{C}_m, A_f = A + B_u K_x$, 则由式(14)和(15)可以得到

$$\dot{e} = (\bar{A} - L\bar{C}_m)e - EH = A_e e - EH.$$

由于系统 (\bar{C}_m, \bar{A}) 是可观的,可以通过选择合适的矩阵 L 使 A_e 的所有特征根均具有负实部,则对于任意有界的 $H = \dot{W}$,可以使 GESO 的估计误差 e 有界.

由式(13)和(16)可以得到

$$\dot{X} = (A + B_u K_x)X + (B_d + B_u K_d)W + B_u K e = A_f X + (B_d + B_u K_d)W + B_u K e, \tag{18}$$

其中 $K = [K_x \ K_d]$. 从而可得

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_f & B_u K \\ 0 & A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_d + B_u K_d \\ -E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ W \end{bmatrix}.$$

由于系统 (A, B_u) 是可控的,可以选择合适的 K_x , 使得矩阵 A_f 的所有特征值均具有负实部. 因此,可以通过设计合适的观测器增益矩阵 L 和控制器增益矩阵 K_x , 使这个系统是有界输入有界输出稳定.

另一方面,由式(18)可以得到

$$X = (A + B_u K_x)^{-1} [\dot{X} - (B_d + B_u K_d)W - B_u K e]. \tag{19}$$

结合式(17)和(19),可以得到受控输出为

$$Y_o = C_o X = C_o(A + B_u K_x)^{-1} \dot{X} - C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_u K e - [C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_u K_d + C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_d] W = C_o(A + B_u K_x)^{-1} \dot{X} - C_o(A + B_u K_x)^{-1} B_u K e. \tag{20}$$

从而可以在输出通道上将扰动抵消,实现抗扰的目的. 当 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{X}(t) = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 时,可以使 $\lim_{t \rightarrow \infty} Y_o = 0$, 即遥操作系统中的主从机械臂关节角位置跟踪误差达到了零,从而实现运动同步的目标.

4 仿真结果及分析

为了说明本文采用的基于广义扩张状态观测器的控制方法对于解决存在时变时延的遥操作系统同步控制问题的有效性,以一对二自由度的机械臂遥操作系统为仿真对象进行研究.

分别取主从机械臂的初始位置为

$$q_{m0} = [0.1 \ 0.2]^T, \\ q_{s0} = [0.4 \ 0.6]^T.$$

根据主从机械臂的初始位置可以得到位置跟踪误差

以及状态量的初始值如下：

$$e_m = [-0.3 \quad -0.4]^T, e_s = [0.3 \quad 0.4]^T,$$

$$r_m = [0.4 \quad 0.8]^T, r_s = [1.6 \quad 2.4]^T.$$

假定通信环节时变时延为 $d_t = 0.2\sin^2 t$ ，正定对角系数矩阵 $A = \text{diag}[4, 4]$ ，则闭环系统极点和扩张状态观测器极点可以配置如下：

$$P_{cl} = [-4, -4, -4, -4, -1, -1, -1, -1]^T,$$

$$P_{ESO} = [-20, -20, -20, -20, -20, -20, -20, -20, -16, -16, -16, -16]^T.$$

由此，可以得到

$$L = \begin{bmatrix} 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 32 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 32 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 320 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 320 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 320 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 320 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

仿真结果如图 2~图 5 所示。图 2 为主从机械臂关节角位置跟踪误差 e 的状态曲线，图 3 为主从机械臂状态 r 的曲线，图 4 为主从机械臂关节角位置 q 的状态曲线，图 5 为主从机械臂关节角速度 v 的状态曲线。

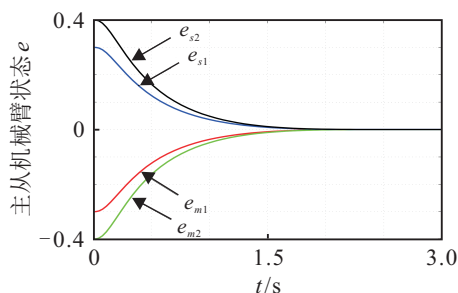


图 2 主从机械臂跟踪误差 e 状态曲线

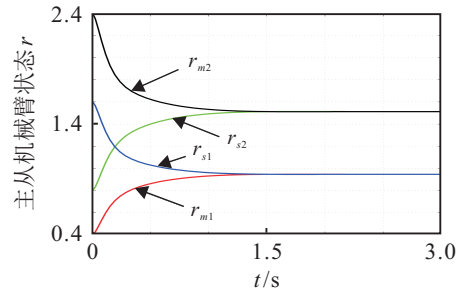


图 3 主从机械臂 r 状态曲线

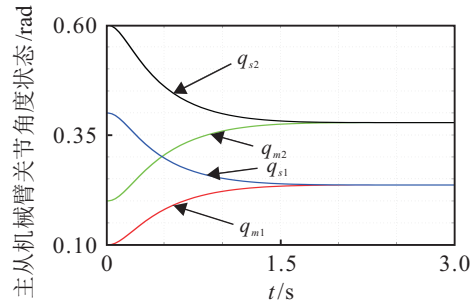


图 4 主从机械臂关节角位置 q 状态曲线

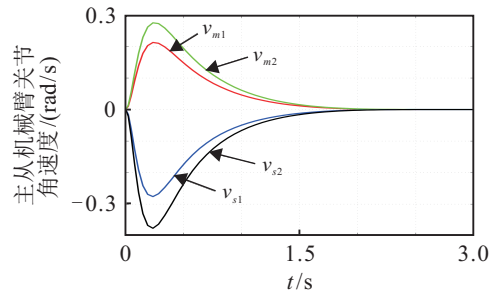


图 5 主从机械臂关节角速度 v 状态曲线

从图 2 和图 5 可以看出，主从机械臂的位置跟踪误差 e 和关节角速度 v 均能平稳快速地在 2s 以内趋向于 0，并保持稳定；从图 3 和图 4 可以看出，主从机械臂相对应的关节角位置 q 和中间状态变量 r 均能平稳快速地在 2s 以内趋向于定值，并保持稳定，表明机械臂遥操作系统在该时刻达到稳态，并且具有较好的收敛速度。因此，本文提出的基于广义扩张状态观测器的控制算法不仅能够保证整个遥操作系统的稳定，同时可以使主从机械臂关节角位置快速达到同步。仿真结果表明，所提出的方法不仅能够较好地处理时变时延问题，而且对于多输入多输出以及干扰不匹配系统的控制问题有较好的借鉴意义。

5 结 论

本文针对机械臂遥操作系统的通信环节中存在时变时延的实际，研究了其同步控制问题。采用了基于广义扩张状态观测器的时延补偿和同步控制方法，不仅保证了遥操作系统的稳定，而且实现了主从机械臂运动同步的控制目标。在对遥操作系统模型反馈线性化的基础上，设计广义的扩张状态观测器和控制律对其基于时延引起的不确定性进行补偿和控制，并对系统进行稳定性和抗扰性分析。最后通过仿真验证了

所提出方法的有效性. 具有时变时延影响的遥操作系统在外界环境作用下的透明性问题将是下一步的研究课题.

参考文献(References)

- [1] Hua C C, Liu X P. Delay-dependent stability criteria of teleoperation systems with asymmetric time-varying delays[J]. IEEE Trans on Robotics, 2010, 26(5): 925-932.
- [2] Niemeyer G. Telemanipulation with time delays[J]. The Int J of Robotics Research, 2004, 23(9): 873-890.
- [3] Sheridan T B. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 592-606.
- [4] Haule D D, Malowany A S. Control scheme for delayed teleoperation tasks[C]. Proc of the IEEE Pacific Rim Conf on Communications, Computers, and Signal Processing. Victoria: IEEE, 1995: 157-160.
- [5] Chopra N, Berestesky P, Spong M W. Bilateral teleoperation over unreliable communication networks[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2008, 16(2): 304-313.
- [6] Leung G M H, Francis B A, Apkarian J. Bilateral controller for teleoperators with time delay via μ -synthesis[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, 11(1): 105-116.
- [7] 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): 108-114.
- [8] 刘福才, 梁利环, 高娟娟, 等. 不同重力环境的空间机械臂自抗扰轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3): 352-360.
(Liu F C, Liang L H, Gao J J, et al. Trajectory tracking control with active disturbance rejection for space manipulator in different gravity environments[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(3): 352-360.)
- [9] Lee D, Spong M W. Passive bilateral teleoperation with constant time delay[J]. IEEE Trans on Robotics, 2006, 22(2): 269-281.
- [10] Hokayem P F, Song M W. Bilateral teleoperation: An historical survey[J]. Automatica, 2006, 42(12): 2035-2057.
- [11] Wang T, Gao H J, Qiu J B. A combined adaptive neural network and nonlinear model predictive control for multirate networked industrial process control[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(2): 416-425.
- [12] Qiu J, Wei Y, Karimi H R. New approach to delay-dependent H_∞ control for continuous-time markovian jump systems with time-varying delay and deficient transition descriptions[J]. J of the Franklin Institute, 2015, 352(1): 189-215.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(Han J Q. Active disturbance rejection control technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [14] Li S, Yang J, Chen W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4792-4802.
- [15] Li Z J, Cao X Q, Ding N. Adaptive fuzzy control for synchronization of nonlinear teleoperators with stochastic time-varying communication delays[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2011, 19(4): 745-757.

(责任编辑: 齐 霖)