

面向在轨服务的机器人遥操作双边控制*

王瑞奇¹, 顾文锦^{1*}, 夏长俊², 张文广¹

(1. 海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 军械工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:为解决随机分布时延对双边遥操作系统稳定性的影响,将马尔可夫跳变参数技术应用到时延建模中。首先将遥操作系统的一般方程转化为状态空间描述形式;针对时延的随机分布特征,建立了时延分布的马尔可夫跳变模型;在此基础上,利用线性矩阵不等式方法,构建了系统的时延独立稳定性定理,并用李雅普诺夫函数方法进行了证明;最后,在两种马尔可夫概率转换矩阵下对闭环系统进行了仿真。实验结果表明,采用所提供的方法可以获得较好的稳定性能。

关键词:在轨服务;双边控制;遥操作;机器人;线性矩阵不等式

中图分类号:TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0577-05

Bilateral control of robot teleoperation for on-orbit services

WANG Rui-qi¹, GU Wen-jin¹, XIA Chang-jun², ZHANG Wen-guang¹

(1. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

(2. Department of Ordnance Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the stabilization problem of bilateral teleoperation system with random distribution time delay, the Markov jumping parameters technique was investigated. System equations were firstly transformed into state space expression. After the analysis of time delay, the Markov jumping model was established. Then, based on linearity matrix inequations, delay independent stabilization theorem was presented to obtain the stable system, Lyapunov function method was used to prove the stabilization theorem. Finally, the closed system was evaluated on the two different Markov probability transition matrix. Experimental results show that this approach is valid and has encouraging stabilization performance.

Key words: on-orbit services; bilateral control; teleoperation; robot; linearity matrix inequations

0 引 言

双边遥操作系统的研究近年来逐渐成为一个热点。“嫦娥一号”、“嫦娥二号”探月卫星的成功,表明中国已经完成探月工程的前两步。第三步的“落月”计划中急需解决的是落月之后,“月球车”等一些可操纵设备的超远距离操作问题。而遥操作技术正是其中的一项关键技术。遥操作系统的初步研究始于 20 世纪 60 年代,并且从 1989 年之后,含时延和从手力反馈的双边遥操作系统成为研究的重点。

近年来,相关文献中涉及的实验硬件在飞速地更新换代^[1-3]。国外一些先进的实验室已经开发出了第三代、第四代双边遥操作系统^[4-6]。这一切都预示着,双边遥操作正在从理论走向应用。

面向在轨服务的双边遥操作是双边遥操作系统的-一个重要应用,也是“月球车”等超远距离遥操作控制的基础和前提。在轨服务遥操作指的是通过地面的操作,完成对太空中的设备(卫星、空间站等)的燃料加注、更换元件等服务。此服务不需要宇航员的参与,因此不但可以大大降低太空设备的维护成本,而且迅捷便利,可以处置突发故障。由于地面与太空之间距离

收稿日期:2010-12-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA704339)

作者简介:王瑞奇(1980-),男,河南辉县人,博士研究生,主要从事面向在轨服务的遥操作系统双边控制、空间机器人路径规划方面的研究。

E-mail: richkey1980@gmail.com

通信联系人:顾文锦,男,教授,博士生导师. E-mail: wenjingu11@gmail.com

遥远,会使通信系统产生较大时延,另外,时延的具体数值也会随着太空中设备的运动而存在波动。因此,所设计的双边遥操作系统必须能适应时延的变化,并在大时延条件下具有良好的稳定性能。

关于双边遥操作系统稳定控制的文献中提出了许多不同的控制策略。例如,基于绝对稳定理论的控制^[7]、无源理论的控制方法^[8]、模型预测控制^[9]、离散控制^[10]、鲁棒控制^[11]、Smith 预测器^[12]、自适应控制^[13]。

最近,基于 LMI 方法越来越多地被用于处理遥操作系统的稳定问题^[14-16]。LMI 方法由于有 Matlab 工具箱的支持,在控制器参数求解时简单方便。但是在处理时延方面,文献[14]使用一阶泰勒展开对时延进行近似。对于大时延情况,近似误差会急剧增大,遥操作系统也难以稳定。

本研究利用马尔可夫跳变参数对时延建模并结合 LMI 方法给出了时延相关的遥操作系统稳定条件,在大时延条件下,得到了令人满意的稳定性能。

1 基于状态方程的遥操作系统模型

遥操作系统是指操作者对主机械手进行操作,远端从机械手跟踪主机械手的运动,从而完成远程复杂或危险环境下的任务。而双边遥操作系统除此之外,还要求主手操作者在操作时有临场感也即要求主机械手反作用于操作者的力能够跟踪环境反作用于从机械手的力。该力从从端反馈到主端的过程称为从端的力反馈。

2003 年, Azorin 等提出基于状态方程的时滞遥操作系统控制器设计和动态分析。随后,文献[16-17]在此基础上,对遥操作系统进了设计。参考文献[14]中,有下面的双边遥操作系统状态方程模型:

主手的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \ddot{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b_m}{m_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_m} \end{bmatrix} \tau_m \quad (1)$$

$$y_m(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}$$

从手的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b_s}{m_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_s} \end{bmatrix} \tau_s \quad (2)$$

$$y_s(t) = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix}$$

其对应的结构图如图 1 所示。

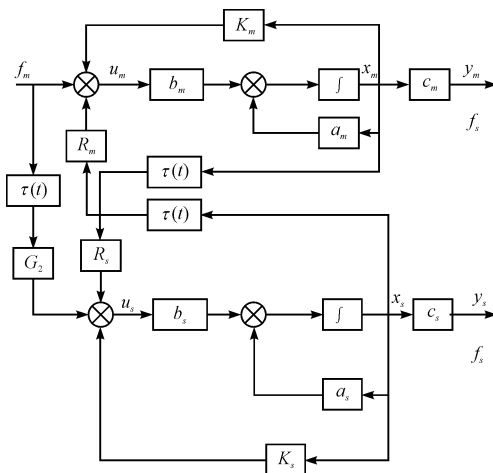


图 1 遥操作系统控制框图

主手的控制输入:

$$\tau_m(t) = K_m X_m(t) + R_m X_s(t - \tau(t)) + F_m(t) \quad (3)$$

其中:

$$X_m(t) = [x_m \quad \dot{x}_m]^T, X_s(t) = [x_s \quad \dot{x}_s]^T$$

从手的控制输入:

$$\tau_s(t) = K_s X_s(t) + R_s X_m(t - \tau(t)) + F_m(t - \tau(t)) \quad (4)$$

从而可得:

$$\dot{X}_m(t) = (A_m + B_m K_m) X_m(t) + B_m R_m X_s(t - \tau(t)) + B_m F_m \quad (5)$$

$$\dot{X}_s(t) = (A_s + B_s K_s) X_s(t) + B_s R_s X_m(t - \tau(t)) + B_s G_2 F_m(t - \tau(t)) \quad (6)$$

选择合适的参数,使下面的式子成立:

$$\begin{aligned} A_m + B_m K_m &= A_s + B_s K_s \\ B_m R_m &= B_s R_s \\ B_m &= B_s G_2 \end{aligned}$$

可以得到系统的状态方程和误差动态为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m + B_m K_m & 0 \\ 0 & A_m + B_m K_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m R_m & -B_m R_m \\ 0 & -B_m R_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m(t - \tau(t)) \\ E(t - \tau(t)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

2 网络时延建模

参考文献[18],利用马尔可夫跳变参数方法,可以建立网络时延的概率分布模型,首先给出定义 1。

定义 1:令 (Ω, Γ, P) 是一个概率空间,且 $\{r_i, t \geq 0\}$ 是随机过程,它在 $S = \{1, 2, \dots, N\}$ 中取值。如果对所有 $0 \leq s \leq t$ 和 $i \in S$ 满足下面的条件:

$$P(r(t) = i | r(w) : w \leq s) = P(r(t) = i | r(s)) \quad (8)$$

那么 $\{r_t, t \geq 0\}$ 称作基于状态空间 S 的马尔可夫过程。

根据双边遥操作系统的特点,定义有限状态空间,包含9个状态:

$$S = \{0, 1, 2, \dots, 8\} = \{LL, LM, LH, \dots, HH\}$$

$r(t) = 0$,则表示双边遥操作系统的前向通道和反向力反馈通道都没有时延。令状态模式的切换由连续时间马尔可夫过程 $\{r_t, t \geq 0\}$ 在状态空间 S 中的取值决定。状态转移率矩阵定义为:

$$\Lambda = [\lambda_{ij}], i, j \in S$$

其中: $\lambda_{ij} > 0, \forall j \neq i, \lambda_{ii} = -\sum_{i \neq j} \lambda_{ij}$

那么,模式转移概率可描述为:

$$P\{s_{t+h} = j | s_t = i\} = \begin{cases} \lambda_{ij}h + o(h), & i \neq j \\ 1 + \lambda_{ii}h + o(h), & i = j \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\lim_{h \rightarrow \infty} o(h)/h = 0$ 。

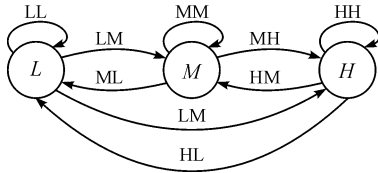


图2 马尔可夫链状态转换图

时延分布的概率图如图3所示。其目的是给出一定时延大小下,网络处于某一种模态 (L, M, H) 的概率,由此概率可以进一步求解出马尔可夫跳变参数的转移矩阵。由图3可以看出,时延越小,网络处于 L 状态的概率就越大,时延越大,网络处于 H 状态的概率就越大。这里时延的最大值取为 5 s,表示只考虑随机时延为 5 s 以下的情况。

3 模式切换控制器设计

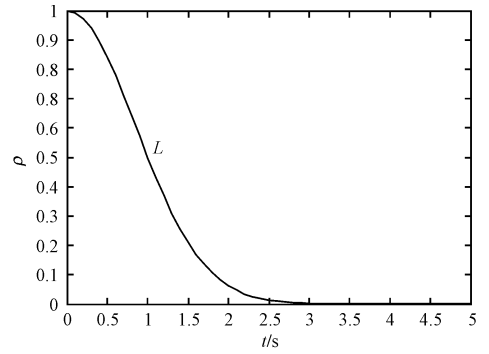
根据式(7)和马尔可夫过程 $\{r_t, t \geq 0\}$,可以得到闭环系统的动态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m + B_m K_m(r_t) & 0 \\ 0 & A_m + B_m K_m(r_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m R_m(r_t) & -B_m R_m(r_t) \\ 0 & -B_m R_m(r_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m(t-T) \\ E(t-T) \end{bmatrix} \quad (10)$$

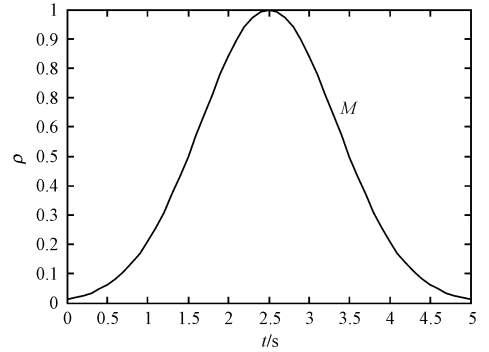
式中: T —某一模态下的时延。

本研究需要设计一个控制器,根据马尔可夫概率转移矩阵将遥操作系统从一个模式转换为另一个模式。下面的定理给出了充分条件。

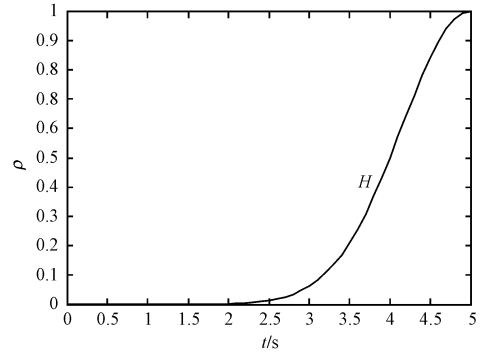
定理1:对于适当的加权矩阵 $P(1), \dots, P(N), S$ 和 $\varepsilon > 0$,如果:



(a) 状态一



(b) 状态二



(c) 状态三

图3 时延分布概率

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \varepsilon_1 B_m R_m R_m^T B_m^T & x & 0 \\ * & A_{11} & 0 & x \\ * & * & -\varepsilon_1 S & \\ * & * & * & -\varepsilon_1 S \end{bmatrix} < 0$$

则闭环系统式(10)渐近稳定。

其中:

$$A_{11} = (A_m x + B_m N) + (A_m x + B_m N)^T + 2\varepsilon B_m R_m R_m^T B_m^T$$

$$x = P(i)^{-1}, N = K_m x,$$

证明:

$$\text{令 } P = (P(1), \dots, P(N)), A = \begin{bmatrix} A_m + B_m k_m & 0 \\ 0 & A_m + B_m k_m \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} B_m R_m & -B_m R_m \\ -B_m R_m & B_m R_m \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & P \end{bmatrix}, P = P^T > 0$$

则式(10)可简单地表示为:

$$\dot{\zeta}(t) = A\zeta(t) + B\zeta(t-T)$$

取下面的李雅普诺夫函数:

$$V = \zeta^T L \zeta + \int_{t-T}^t \varepsilon^{-1} \zeta^T M \zeta dt$$

其中: $0 < M < I$ 。

将 V 对时间求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \zeta(t)^T L A \zeta(t) + \zeta(t)^T A^T L \zeta(t) + \zeta(t)^T L B \zeta(t-T) + \\ & \zeta(t-T)^T B^T L \zeta(t) + \varepsilon^{-1} \zeta(t)^T M \zeta(t) - \\ & \varepsilon^{-1} \zeta(t-T)^T M \zeta(t-T) \end{aligned}$$

可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \zeta(t)^T L A \zeta(t) + \zeta(t)^T A^T L \zeta(t) + \\ & \varepsilon \zeta(t)^T L B B^T L \zeta(t) + \varepsilon^{-1} \zeta(t)^T M \zeta(t) + \\ & \varepsilon^{-1} \zeta(t-T)^T \zeta(t-T) - \varepsilon^{-1} \zeta(t-T)^T M \zeta(t-T) \end{aligned}$$

$$\dot{V} < \zeta(t)^T L A \zeta(t) + \zeta(t)^T A^T L \zeta(t) +$$

$$\varepsilon \zeta(t)^T L B B^T L \zeta(t) + \varepsilon^{-1} \zeta(t)^T M \zeta(t)$$

要使 $\dot{V} < 0$ 等价于 LMI, 则:

$$\begin{bmatrix} LA + A^T L + \varepsilon L B B^T L & I \\ I & -\varepsilon M^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

令 $S = P^T M^{-1} P$, 可得:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \varepsilon_1 B_m R_m R_m^T B_m^T & x & 0 \\ * & A_{11} & 0 & x \\ * & * & -\varepsilon S & \\ * & * & * & -\varepsilon S \end{bmatrix} < 0$$

4 仿真实验

仿真参数设置如下:

主手: $J_m = 1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, B_m = 11 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$;

从手: $J_s = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, B_s = 15 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$;

环境: $k_e = 100 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s}), b_e = 1 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$;

力反馈增益: $k_f = 0.1$, 接触力: $F_m = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

且:

$$X_m = \begin{bmatrix} 6 \\ -2 \end{bmatrix}, X_s = \begin{bmatrix} -5 \\ 3 \end{bmatrix}。$$

控制参数可通过利用 Matlab 工具箱解所设计的不等式而得:

$$K_m = [-107.6604 \quad -56.5155],$$

$$K_s = [-143.6189 \quad -75.0657],$$

$$R_s = [13.334 \quad 0.1334],$$

$$G_2 = 1.334, \varepsilon = 0.0663。$$

马尔可夫概率转移矩阵为:

$$M_t = \begin{bmatrix} 0.093 & 0.671 & 0.236 \\ 0.371 & 0.329 & 0.300 \\ 0.236 & 0 & 0.764 \end{bmatrix}$$

则跳变模态图和系统响应曲线分别如图 4、图 5 所示。

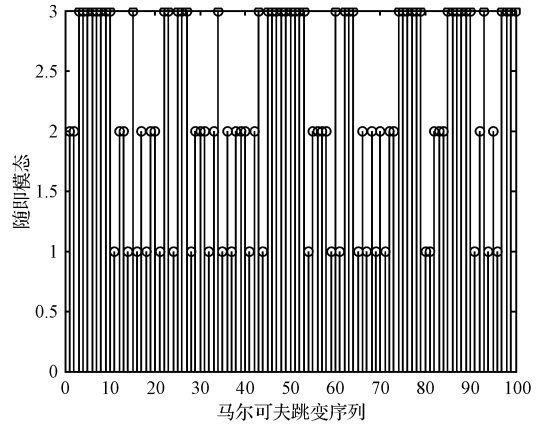


图 4 马尔可夫跳变模态图

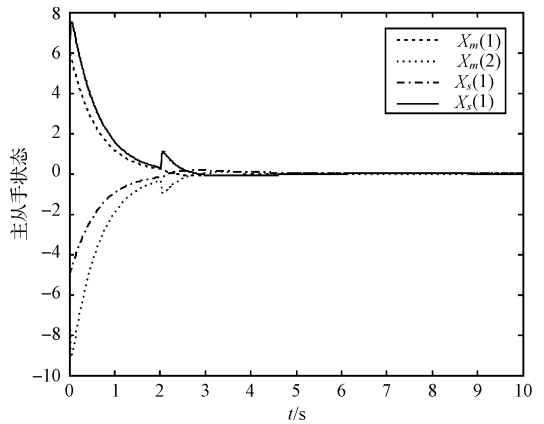


图 5 系统的状态响应

马尔可夫概率转移矩阵为:

$$M_t = \begin{bmatrix} 0.493 & 0.471 & 0.036 \\ 0.671 & 0.229 & 0.100 \\ 0.636 & 0 & 0.364 \end{bmatrix}$$

则仿真曲线分别如图 6、图 7 所示。

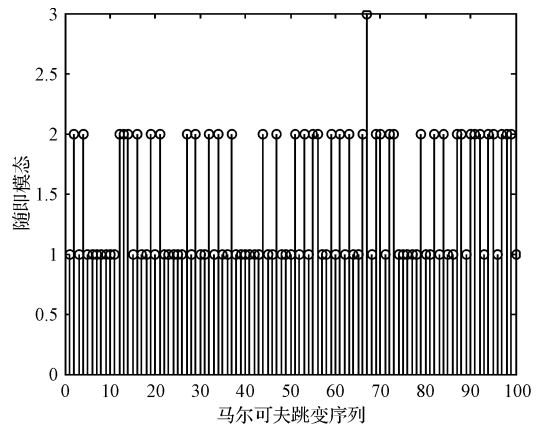


图 6 马尔可夫跳变模态图

图 4、图 6 为不同转移矩阵条件下的马尔可夫跳变模态图, 横轴表示跳变的序列, 设定每秒钟跳变 10

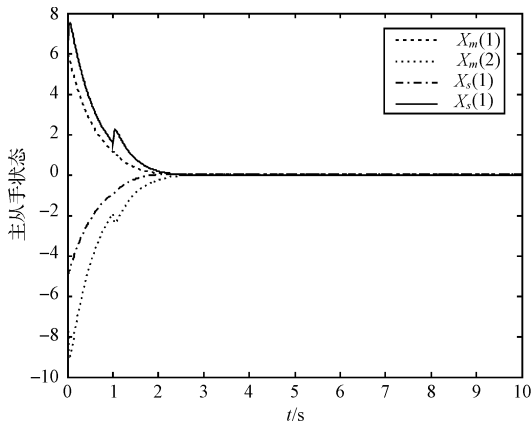


图7 系统的状态响应

次,纵轴为随机跳变到的模态。纵轴上的1,2,3分别对应模态 L, M, H 。从仿真结果可以看出,随着仿真进行,模态随机地在3种模态之间跳变,完成对时延的建模。图5、图7为相应转移矩阵下,主从手状态(位移、速度)的收敛曲线。可以看出:在不同的转移矩阵,即不同的时延特征下,状态收敛的速度不同,但采用所提供的方法都可以实现遥操作系统的稳定控制。

5 结束语

网络时延要受到网络流量的影响,当网络流量变化时,时延也会随之变化。本研究通过建立与之相对应的马尔可夫跳变参数,从而建立了网络随机分布时延的概率分布模型。利用LMI方法求解使系统稳定的控制器参数,并结合Matlab工具箱,可使得计算简便,易于实现,十分适用于因环境和模型参数较多而导致的计算量递增和参数摄动频繁需实时推演计算的情况。本研究所提供的方法在随机分布时延条件下保证了系统的稳定。不过未对时延进行弱化处理,如时延预测、补偿等。所以,所得到的稳定性条件有一定的保守性。下一步将研究随机分布时延的预测问题,并考虑在末端环境为不确定情况时,如何提高系统的操作性能。

参考文献(References):

[1] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperation with time delay[J]. **IEEE Transaction on Automation Control**, 1989, 34(5):494-501.

[2] 邓乐,赵丁选.一种新的力觉临场感遥操作机器人系统的控制方法[J]. **机电工程**, 2005, 22(7):26-29.

[3] HASHTRUDI K, SALCUDEAN S. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation[J]. **IEEE Transaction on Robotics and Automation**, 2002, 18(1):108-114.

[4] 古军保,负今天,董旭,等.具有力-位补偿的触感装置

控制体系结构[J]. **机电工程**, 2009, 26(9):73-76.

[5] 王永,谢圆,周建亮.空间机器人大时延遥操作技术研究综述[J]. **宇航学报**, 2010, 31(2):299-306.

[6] LASNIERI A, MURAKAMI T. Workspace Based Force Sensorless Bilateral Control with Multi-Degree-of-Freedom Motion Systems[C]//The 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Magaoka, Japan: [s. n.], 2010: 583-588.

[7] 邓启文,韦庆,李泽湘.力反馈时延遥操作系统的时延相关稳定性分析[J]. **控制理论与应用**, 2007, 24(5):815-818.

[8] GASPARETTO A, VIDONI R, ZANOTTO V, et al. Delayed force reference control for master-slave robotic systems[J]. **Mechatronics**, 2009(19):639-646.

[9] 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 Transactions on Industrial Electronics**, 2008, 55(9):3290-3299.

[10] SIROUSPOUR S, SHAHDI A. Discrete-time linear quadratic gaussian control for teleoperation under communication timedelay[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2006(25):187-202.

[11] SHAHDI A, SIROUSPOUR S. Adaptive robust control for time-delay teleoperation[J]. **IEEE Transactions on Robotics**, 2009, 25(1):196 - 205.

[12] SMITH A C, HASHTRUDI-ZAAD K. Smith predictor type control architectures for time delayed teleoperation[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2006, 25(8):797-818.

[13] SHAHDI A, SIROUSPOUR S. Improved Transparency in Bilateral Teleoperation with Variable Time Delay[C]//The International Conference on Intelligent Robots and Systems. S-t. Louis, USA: [s. n.], 2009:4616-4621.

[14] AZORIN J M, REINOSO O, SABATER J M. Dynamic Analysis for a Teleoperation System with Time Delay[C]//Proceedings of IEEE Conference on Control Applications. Istanbul, Turkey: [s. n.], 2003:1170-1175.

[15] AZORIN J M, REINOSO O, SABATER J M, et al. Generalized control method by state convergence for teleoperation systems with time delay[J]. **Automatica**, 2004(40):1575-1582.

[16] SHE J, JIAO S J, LUO X Y, et al. Controller design for a teleoperation system with time delay[J]. **Journal of Electronic Science Technology of China**, 2005(1):248-253.

[17] SADEGHI M S, MOMENI H R, AMIRFAR R. H_{infinite} and L_{one} control of a teleoperation system via LMIs[J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2008(206):669-677.

[18] SHEN W M, GU J, MILOS E. Robust Design for Bilateral Teleoperation System with Markov Jumping Parameters[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego: [s. n.], 2007:2679-2684.