一种基于预测显示的时变大时延空间遥操作控制方法

阳方平^{①②*}, 李洪谊^①, 王越超^①, 崔龙^①, 陈鹏^{①②}, 王雪竹^{①②}

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 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: yangfangping@sia.cn

2013-08-28 收稿, 2013-11-01 接受

国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项(2012GB102005)资助

摘要 提出一种基于预测显示的时变大时延空间遥操作控制方法. 将空间遥操作系统分为多个交互的子系统, 首先设计一种无源-滤波算法保证通讯环节子系统的无源稳定性. 然后对主端虚拟现实机器人和从端真实机器人动力学的重力项进行补偿, 并对从端机器人的关节力矩控制设计了一种 PD 控制律. 最后从理论上证明了整个遥操作互联系统的 Lyapunov 稳定性. 该稳定性不依赖于系统动力学建模精度. 搭建了空间遥操作地面仿真实验平台, 通过实验证明了该方法在时变大时延条件下保证系统稳定性, 提高操作者视觉临场感方面的有效性.

关键词

时变大时延
预测显示
空间遥操作

时延一直是影响空间遥操作机器人系统正常工作的突出问题^[1]. 根据克服通信时延的方式, 遥操作控制系统基本上可以划分为三大类^[2]: 双边控制、遥编程和基于预测显示的预测控制. 从目前文献上看, 双边控制对于时延小于 1 s 能够取得较好的控制性能^[3]. 遥编程主要应用于天地传输带宽有限的超远距离遥操作任务, 控制命令采用较为占用带宽较少的抽象形式^[4]. 基于预测显示的预测控制通过在本地建立远端机械手的操作模型, 以图形显示的方法给出远端机械手的伪实时响应, 从而克服时延带给操作人员操作错觉^[5]. 该方法逐渐成为解决空间遥操作机器人系统时延问题的有力手段之一^[6].

基于预测显示的遥操作系统主要由操作主手、虚拟系统、时延通讯环节、从端机器人和环境等多个交互的子系统构成. 针对时延通信环节稳定性, 文献[7~13]中提出了很多的方法, 但是对基于预测显示的遥操作系统整体稳定性的分析与证明还有待进一步研究. 此外, 基于预测显示的遥操作系统只有在模型很精确的情况下才能很好地工作. 特别是在非结构化环境的情况下, 精确的几何建模和动力学建模

更是难以实现的^[14]. 文献[15~17]中提出了多种对建模误差具有鲁棒性的控制方法, 然而, 这些算法对建模误差的鲁棒性是有限的, 只能在建模误差较小的情况下才能正常工作^[18]. 因此, 降低对建模精度的依赖性成为研究中亟待解决的关键问题.

本文对基于预测显示的时变大时延空间遥操作方法展开研究. 将基于预测显示的遥操作系统分为多个交互的子系统. 首先提出一种无源-滤波算法保证时延通讯环节的无源稳定性. 然后对主端虚拟现实机器人和从端真实机器人动力学的重力项进行补偿, 并对从端机器人的关节力矩控制设计了一种 PD 控制率. 最后对基于预测显示的空间遥操作系统整体构造了 Lyapunov 函数, 分析得到系统的稳定性定理: 如果通信环节子系统无源稳定, 则空间遥操作系统整体上是 Lyapunov 稳定的. 该系统的稳定性允许主从端动力学存在建模误差, 从而降低了遥操作系统对建模精度的依赖性. 为验证方法的有效性, 在空间遥操作地面仿真实验平台上进行了实验. 实验结果表明该方法既能保证系统稳定性, 又能大幅度改善操作者的视觉临场感.

引用格式: 阳方平, 李洪谊, 王越超, 等. 一种基于预测显示的时变大时延空间遥操作控制方法. 科学通报, 2013, 58(增刊 II): 128–134

Yang F P, Li H Y, Wang Y C, et al. Prediction display based control law for space tele-operation with large time-varying delays (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58(Suppl. II): 128–134, doi: 10.1360/972013-933

1 方法

包含时变时延环节的遥操作系统基本框架如图1所示,文献[7]表明该系统是非无源稳定的.传统的无源性与波变量算法不适应于时变时延环节,因此提出如图2所示的无源-滤波算法保证时变大时延条件下的通信环节和系统的稳定性.

1.1 无源-滤波算法

由图2可知,通信环节的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_s(t) &= d_1(t) \dot{\mathbf{x}}_m(t-T_1(t)) \\ &+ \frac{1}{b} \left\{ d_1(t) \mathbf{F}_m(t-T_1(t)) - \mathbf{F}_s(t) \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_m(t) &= d_2(t) \mathbf{F}_s(t-T_2(t)) \\ &+ b \left\{ \dot{\mathbf{x}}_m(t) - d_2(t) \dot{\mathbf{x}}_s(t-T_2(t)) \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

进一步可得到

$$\frac{1}{\sqrt{2b}} [\mathbf{F}_s + b \dot{\mathbf{x}}_s](t) = \frac{1}{\sqrt{2b}} [\mathbf{F}_m + b \dot{\mathbf{x}}_m](t-T_1(t)) d_1(t), \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2b}} [\mathbf{F}_m - b \dot{\mathbf{x}}_m](t) = \frac{1}{\sqrt{2b}} [\mathbf{F}_s - b \dot{\mathbf{x}}_s](t-T_2(t)) d_2(t). \quad (4)$$

定义

$$\begin{cases} \mathbf{u}_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (\mathbf{F}_m + b \dot{\mathbf{x}}_m), \\ \mathbf{v}_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (\mathbf{F}_m - b \dot{\mathbf{x}}_m), \\ \mathbf{u}_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (\mathbf{F}_s + b \dot{\mathbf{x}}_s), \\ \mathbf{v}_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (\mathbf{F}_s - b \dot{\mathbf{x}}_s), \end{cases} \quad (5)$$

得到

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s(t) = d_1(t) \mathbf{u}_m(t-T_1(t)), \\ \mathbf{v}_m(t) = d_2(t) \mathbf{v}_s(t-T_2(t)), \\ d_i(t) = L^{-1}(D_i(s)); i=1, 2, \\ D_i(s) = \frac{l_i}{s^2 + m_i s + n_i}; i=1, 2, \end{cases} \quad (6)$$

式中, $T_1(t)$ 和 $T_2(t)$ 分别是前向传输通道和逆向传输通道的时延; $D_1(s)$ 和 $D_2(s)$ 是滤波器的拉氏变换, 对应的时域表达式分别是 $d_1(t)$ 和 $d_2(t)$.

假设

$$\frac{dT_i}{d\tau} < 1; i=1, 2. \quad (7)$$

图1 无时延控制算法的遥操作系统框架

文献[19]中已证明若滤波器的参数满足

$$\begin{cases} n_i - \frac{m_i^2}{4} \geq 0, \\ \frac{l_i^2}{n_i - \frac{m_i^2}{4}} \leq 1 - T_i', \end{cases} \quad (8)$$

则可得到式(9)成立, 从而时延通信环节是无源稳定的.

$$\begin{aligned} \int_0^t P_m(\tau) d\tau = \\ \int_0^t \left\{ \dot{\mathbf{x}}_m(t)^T \mathbf{F}_m(t) - \dot{\mathbf{x}}_s(t)^T \mathbf{F}_s(t) \right\} d\tau \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

分析可知, 采用基于无源-滤波算法的遥操作方法, 从端机器人关节采用速度控制模式, 并在机器人末端安装腕力传感器, 让操作者感受从端真实力反馈. 这种算法能消除通信环节时变时延给系统的稳定性带来的影响. 但由于时延存在, 操作者看着视频图像进行操作, 会有很大的滞后性. 对于接触任务, 操作者若不能及时看到碰撞场景, 会带来一定的危险性. 为进一步提高操作者的视觉临场感, 提出基于预测显示的遥操作机器人系统控制方法.

1.2 基于预测显示的空间遥操作控制方法

建立基于预测显示的遥操作机器人系统框架如图所示. 该方法在主端通过建立机器人及其环境的虚拟图形, 并通过动力学进行驱动. 从端机器人采用力矩控制模式. 定义主端虚拟现实机器人和从端机器人的动力学模型为

$$\begin{cases} \mathbf{D}_m(\boldsymbol{\theta}_m) \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{C}_m(\boldsymbol{\theta}_m, \dot{\boldsymbol{\theta}}_m) \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{G}_m(\boldsymbol{\theta}_m) = \bar{\boldsymbol{\tau}}_h - \boldsymbol{\tau}_m, \\ \mathbf{D}_s(\boldsymbol{\theta}_s) \ddot{\boldsymbol{\theta}}_s + \mathbf{C}_s(\boldsymbol{\theta}_s, \dot{\boldsymbol{\theta}}_s) \dot{\boldsymbol{\theta}}_s + \mathbf{G}_s(\boldsymbol{\theta}_s) = \bar{\boldsymbol{\tau}}_s - \boldsymbol{\tau}_e, \end{cases} \quad (10)$$

式中下标 m 表示主端, 下标 s 表示从端, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_h$ 表示主端施加给主手的作用力, $\boldsymbol{\tau}_m$ 表示主端接收并处理后的从端反馈力, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_s$ 表示从手控制器对应的力, $\boldsymbol{\tau}_e$ 表示从手与环境的作用力, D 是惯量, C 是离心和哥氏力项.

图 2 基于无源-滤波算法的遥操作系统框架图

图 3 基于预测显示的遥操作机器人控制方法框架图

在空间失重环境下,重力项一般为零或者可以忽略.因此,在地面仿真环境下,在主从端分别添加一项重力补偿项,以抵消重力的影响.从而有

$$\begin{cases} \bar{\tau}_h = \tau_h + G_m(\theta_m), \\ \bar{\tau}_s = \tau_s + G_s(\theta_s). \end{cases}$$

代入式(11),得到

$$\begin{cases} D_m(\theta_m)\ddot{\theta}_m + C_m(\theta_m, \dot{\theta}_m)\dot{\theta}_m = \tau_h - \tau_m, \\ D_s(\theta_s)\ddot{\theta}_s + C_s(\theta_s, \dot{\theta}_s)\dot{\theta}_s = \tau_s - \tau_e. \end{cases} \quad (11)$$

设计从端关节力矩的 PD 控制率如下:

$$\tau_s(t) = K_s \int_0^t (\dot{\theta}_{sd} - \dot{\theta}_s) dt + B_s (\dot{\theta}_{sd} - \dot{\theta}_s). \quad (12)$$

为分析该系统的稳定性,先将该系统分为 5 个交互的子系统:操作者、主端虚拟现实机器人、时延通信环节、从端真实机器人、从端环境五个子系统.得到系统稳定性定理 1.

定理 1 若 $B_s > 0$ 且时延通信环节子系统无源稳定,则图 3 构造的空间遥操作互联系统整体上也是

Lyapunov 稳定的.

证明

定义: $\Delta\theta = \theta_{sd} - \theta_s$, 则得到系统的 Lyapunov 函数如下:

$$V = \frac{1}{2} \left\{ \dot{\theta}_m^T D_m \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_s^T D_s \dot{\theta}_s + \Delta\theta^T K_s \Delta\theta \right\} + \int_0^t \dot{\theta}_s^T \tau_e d\tau - \int_0^t \dot{\theta}_m^T \tau_h d\tau + \int_0^t (\dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_s) d\tau. \quad (13)$$

操作者和远端环境是无源的,所以

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{\theta}_s^T \tau_e d\tau &\geq 0, \\ -\int_0^t \dot{\theta}_m^T \tau_h d\tau &\geq 0. \end{aligned}$$

从上文的讨论知,选取参数满足式(8),即可保证通讯环节的无源稳定性,所以

$$\int_0^t (\dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_s) dt \geq 0. \quad (14)$$

对系统的 Lyapunov 函数的求导得到

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= \dot{\theta}_m^T D_m \ddot{\theta}_m + \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \dot{D}_m \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_s^T D_s \ddot{\theta}_s + \frac{1}{2} \dot{\theta}_s^T \dot{D}_s \dot{\theta}_s \\
 &\quad + (\dot{\theta}_{sd}^T - \dot{\theta}_s^T) K_s \Delta \theta + \dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_s + \dot{\theta}_s^T \tau_e - \dot{\theta}_m^T \tau_h \\
 &= \dot{\theta}_m^T (-C_m \dot{\theta}_m + \tau_h - \tau_m) + \dot{\theta}_s^T (-C_s \dot{\theta}_s + \tau_s - \tau_e) + \dot{\theta}_m^T \tau_m \\
 &\quad + (\dot{\theta}_{sd}^T - \dot{\theta}_s^T) K_s \Delta \theta - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_s + \dot{\theta}_s^T \tau_e - \dot{\theta}_m^T \tau_h + \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \dot{D}_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{2} \dot{\theta}_s^T \dot{D}_s \dot{\theta}_s \\
 &= -\dot{\theta}_m^T C_m \dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s^T C_s \dot{\theta}_s + (\dot{\theta}_{sd}^T - \Delta \dot{\theta}^T) \tau_s \\
 &\quad + \Delta \dot{\theta}^T (\tau_s - B_s \Delta \theta) - \dot{\theta}_m^T \tau_s + \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \dot{D}_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{2} \dot{\theta}_s^T \dot{D}_s \dot{\theta}_s \\
 &= -\dot{\theta}_m^T C_m \dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s^T C_s \dot{\theta}_s - \Delta \dot{\theta}^T B_s \Delta \theta + \frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \dot{D}_m \dot{\theta}_m + \frac{1}{2} \dot{\theta}_s^T \dot{D}_s \dot{\theta}_s.
 \end{aligned} \tag{15}$$

利用 $\dot{D}_m - 2C_m$ 和 $\dot{D}_s - 2C_s$ 的斜对称性知 $\frac{1}{2} \dot{\theta}_m^T \dot{D}_m \dot{\theta}_m =$

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta}_m^T C_m \dot{\theta}_m \text{ 和 } \frac{1}{2} \dot{\theta}_s^T \dot{D}_s \dot{\theta}_s &= \dot{\theta}_s^T C_s \dot{\theta}_s, \text{ 则} \\
 \dot{V} &= -B_s \Delta \dot{\theta}^T \Delta \theta \leq 0,
 \end{aligned} \tag{16}$$

式中, $\Delta \dot{\theta} = (\dot{\theta}_{sd} - \dot{\theta}_s)$, 若选取 $B_s > 0$, 则 Lyapunov 函数是非负且正定的, 所以系统满足 Lyapunov 稳定性条件。

证毕

从以上分析还可以看出, 当主从端动力学建模存在误差, 即矩阵 D_m 和 D_s , C_m 和 C_s 内部参数不严格对应相等时, 系统依然满足 Lyapunov 稳定性条件, 说明系统的稳定性不依赖于系统的建模精度。

2 实验

2.1 实验平台

为验证方法的有效性, 本实验室搭建了面向空间大时延遥操作方法研究的模拟实验平台。该平台由模拟从端暴露实验平台, 模拟主端地面控制中心, 模拟天地通信环节三部分组成。

模拟从端暴露实验平台包括两部分: (i) IRB120 机器人基于任务板的遥操作实验系统, 配备一个任务板; (ii) 自制机械臂更换标准在轨模块实验装置 (配套悬臂减重装置) 配备两个相同的 ORU 接口。在钢板台上放置 ORU。在暴露平台的四周放置 4 个位姿可调的相机用于监控机械臂末端位置。

系统还配备一个地面控制中心由操作台、虚拟现实与显示系统组成。虚拟现实与显示建立了一套基于虚拟现实技术的地面可视化仿真系统、提供同步预测仿真算法及高真实性仿真显示的建模方法。操作台包括监视控制台、遥操作台、中央控制台。模拟天

地通信环节提供天地通信的时延模型, 模拟的天地通信时延曲线如图 4。时延的变化率如图 5 所示。由图可知模拟时延的变化率小于 0.5, 因此能满足式(7)的条件。

2.2 无源-滤波时延算法实验

为验证无源滤波时延算法的有效性, 利用 ABB 公司生产的 IRB 120 机器人进行了对比实验。该机器人的重复定位精度为 0.01 mm, 可支持机器人关节的位置与速度跟踪控制。

实验中, 保持机器人的姿态不变, 只考虑机器人对末端位置的及末端力的跟踪效果。采用如图 2 所示的控制框架, 但当通信环节采用波变量算法时, 主从端速度与力跟踪曲线如图 6 和图 7 所示。从曲线可以看出, 系统震荡严重, 说明时变大时延条件下, 通信环节采用波变量算法时, 系统是不稳定的, 实验结果与理论相符合。

当通信环节采用无源滤波算法时, 选取参数如下:

$$\begin{aligned}
 l_1 = l_2 = 1, m_1 = m_2 = 16, \\
 n_1 = n_2 = 100, b = 100.
 \end{aligned} \tag{17}$$

图 4 模拟的天地回路时延曲线

图 5 模拟天地回路时延变化率曲线

图 6 波变量算法时 Z 方向主从端速度跟踪曲线

图 7 波变量算法时 Z 方向主从端力跟踪曲线

图 8 无源-滤波算法 Z 方向主从端速度跟踪曲线

主从端速度与力跟踪曲线如图 8 和 9 所示。由图可以看出,主从端能实现对位置或者力信号的跟踪而没有振荡等不稳定现象,说明该方法能消除时延给稳定性带来的影响。但主从端的信号跟踪存在时

图 9 无源-滤波算法 Z 方向主从端力跟踪曲线

滞现象,图 9 中主从端力的最大值出现时刻主端比从端晚大约 4 s $((688-672) \times 0.25)$,而且操作者看着视频图像进行操作,视频图像也存在滞后性,说明操作者不能获得很好的视觉临场感。特别是对于接触任务,操作者若不能及时看到碰撞场景,会带来一定的危险性。

2.3 基于预测显示的空间遥操作方法实验

为验证天地通信时变时延预测显示方法的有效性,利用自制空间机械臂进行了实验。如图 10,自

图 10 虚拟现实机械臂与从端真实机械臂对照

(a) 主端虚拟现实机械臂; (b) 从端真实机械臂

制机械臂采用德国生产的(型号: SCHUNK PRL120)模块化关节,可支持机器人关节的力矩控制。

实验中,令 $K_s=500$, $B_s=10$, 用 Omega 3 手柄控制机械臂第四、五、六关节进行运动. 得到主端虚拟现实机械臂和从端真实机械臂的关节角轨迹图如图 11 所示. 图中 AngM4, AngM5, AngM6 分别表示主端虚拟现实机械臂的第四,五,六关节的轨迹曲线, AngS4, AngS5, AngS6 分别表示从端虚拟现实机械臂的四,五,六关节的轨迹曲线. 由图可以看出,主端虚拟现实机械臂的轨迹和从端真实机械臂间不存在延迟现象. 主从端关节角误差如图 12 所示,由图可知跟踪误差小于 0.004 rad,说明系统是稳定的,且跟踪性能较好. 实验中,操作者观看主端虚拟现实机械手的伪实时响应进行操作,在主从端关节角轨迹误差较小的情况下,操作者能够获得较真实的视觉临场感,从而很大程度上提高了系统性能和操作效率。

3 结论

本文设计了一种基于预测显示的时变大时延空间遥操作控制方法. 该方法在主端建立机器人及其环境的虚拟图形,并通过动力学进行驱动. 从端机器人采用力矩控制模式. 首先,为保证系统中通信环节

图 11 主从端机器人关节角轨迹对照图

图 12 主从端机器人关节角轨迹误差图

的稳定性,设计了一种无源-滤波算法. 然后对主从端动力学模型进行了重力补偿,为从端机器人的关节力矩控制设计了一种 PD 控制率. 最后从理论上证明了整个遥操作系统的 Lyapunov 的稳定性,且主从端动力学存在建模误差时,系统依然是稳定的。

搭建空间遥操作地面仿真平台,设计实验验证方法的有效性. 实验结果表明,时变大时延条件下,采用基于波变量算法的双边遥操作控制方法,系统是不稳定的. 采用基于无源-滤波算法的双边遥操作控制方法,可保证系统和稳定性,但主从端信号跟踪存在时滞现象,使操作者不能获得良好的视觉临场感. 采用基于预测显示的遥操作控制方法,在保证系统稳定性的同时也克服了时滞现象对操作者带来的影响,使操作者能够获得良好的视觉临场感. 说明该方法具备实际工程应用价值。

但在实验中,操作者采用手柄控制机器人的关节运动的方式. 显然这种控制方式是不直观的,并不利于完成具体任务. 因此,在进一步的研究中应可考虑控制机器人末端位姿. 此外,实验中,并没有设置虚拟现实系统给操作者的反馈力. 因此,应对基于预测显示的遥操作方法中力反馈及力觉临场感问题展开更深入的研究。

参考文献

- 1 Nagatomo M, Harada C, Hisadome Y. Operation of crew-tended space robot in MFD. In: Proceeding of the 41th Space Sciences and Technology Conference, Japan, 1997. 11-15
- 2 李宽. 基于绝对稳定性的空间机器人遥操作算法研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- 3 董德尊. 大时延遥操作机器人接触作业的遥编程技术研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2004
- 4 李炎. 大时延遥操作技术及虚拟现实技术研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2002
- 5 Mirfakhrai T, Payandeh S. A delay prediction approach for teleoperation over the internet. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002. 2178-2183

- 6 Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J. Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features. *IEEE Trans Robot Automat*, 1993, 9: 649–663
- 7 Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Trans Automat Contr*, 1989, 34: 494–501
- 8 Hokayem P F, Spong M W. Bilateral teleoperation: An historical survey. *Automatica*, 2006, 42: 2035–2057
- 9 Niemeyer G, Slotine J J E. Towards force-reflecting teleoperation over the Internet. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998. 1909–1915
- 10 Chopra N, Spong M W, Hirche S, et al. Bilateral teleoperation over the internet: The time varying delay problem. In: *Proceedings of the American Control Conference*, 2003. 155–160
- 11 Lawn C A, Hannaford B. Performance testing of passive communication and control in teleoperation with time delay. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993. 776–783
- 12 陈宜滨, 席宁, 李洪谊, 等. 混杂半量子网络遥操作系统分析及其控制. *信息与控制*, 2013, 42: 281–288
- 13 于振中, 惠晶, 许胜, 等. 多自由度遥操作系统控制的波变量法. *信息与控制*, 2012, 41: 147–152
- 14 Hirata W, Sato M. 3D interface devices for virtual workshop. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, 1992. 889–896
- 15 Tsumaki Y, Hoshi Y, Naruse H. Virtual reality based teleoperation which tolerates geometrical modeling errors. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996. 1023–1030
- 16 Tsumaki Y, Uchiyama M. A model-based space teleoperation system with robustness against modeling errors. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997. 1594–1599
- 17 Ambrose R, Savely R T, Michael S. Mobile manipulation using NASA's robonaut. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004. 2104–2109
- 18 李会军. 空间遥操作机器人虚拟预测环境建模技术研究. 博士学位论文. 南京: 东南大学, 2005
- 19 Yang F P, Li H Y, Wang Y C. Wave-transform-based on control law for teleoperation with time-varying delays. In: *Proceedings of the 2012 IEEE international conference on Robotics and Biomimetics*, 2012. 1610–1614

Prediction display based control law for space tele-operation with large time-varying delays

YANG FangPing^{1,2}, LI HongYi¹, WANG YueChao¹, CUI Long¹, CHEN Peng^{1,2} & WANG XueZhu^{1,2}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

A control method based on prediction display for space tele-operation under large time-varying delays is presented. The space tele-operation system is divided into several subsystems. First, design a passivity-filter algorithm to guarantee the stability of the communication channel subsystem. Then, compensate the dynamics of the master visual-reality robot and the slave real robot for the gravity, and propose a PD control law for joint torque control of the slave robot. Finally, the Lyapunov stability of the entire tele-operation interconnected system, which does not depend on system dynamics modeling accuracy, is proved theoretically. A space teleoperation simulation experiment platform is built. Under the condition of large time-varying delays, experiments are taken to verify the effectiveness of the method to guarantee the stability of the system, and improve vision telepresence of operators.

large time-varying delays, prediction display, space tele-operation

doi: 10.1360/972013-933