

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0298

基于时延预测的遥操作机器人预测显示方法

魏青^{1,2}, 崔龙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, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解决大时变时延遥操作系统的预测显示问题, 提出了一种基于时延预测的预测显示算法, 该算法把时变时延在时间维度上对主从控制信号的拉伸和压缩作用看作是系统扰动, 并利用时延在线预测结果对该扰动进行前馈补偿. 首先, 对基于预测显示的遥操作系统进行动力学建模, 并计算出了包含时延扰动的预测显示机器人的期望控制量. 然后, 以时延组成最为复杂的空间遥操作系统为例, 分析了遥操作系统通讯时延的产生机理, 并根据其产生机理、模型和统计规律对通讯时延进行在线预测. 最后, 本文在理论上分析了利用时延预测结果对上述扰动进行补偿的可行性和有效性, 并在理论验证遥操作平台上进行了对比实验. 实验结果表明, 在大时变时延下该算法的速度预测相对误差和接触力预测相对误差在误差峰值处分别比无时延预测的预测显示方法降低了 30.9% 和 56%.

关键词: 大时变时延; 遥操作; 预测显示; 时延预测

中图分类号: TP872.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-03-0298-09

Predictive Display for Telerobot Based on Time-delay Prediction

WEI Qing^{1,2}, CUI Long¹

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

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

Abstract: In order to solve the predictive display problem of teleoperation system with large time-varying delay, a predictive display method based on time delay prediction is proposed. In this method, the tensile and compressive effects of the varying communication delay on the master-slave control signal in the time dimension are considered as system disturbance, and the on-line delay prediction result is used to perform feedforward compensation on this disturbance. Firstly, the dynamic model of the predictive display based teleoperation system is presented, and the expected control variable of the predictive robot with disturbance is calculated. Then, the mechanism of the communication delay of the space teleoperation system which has the most complex delay composition is analyzed, and the delay is predicted on line according to its generation mechanism, model and statistical law. Finally, the feasibility and effectiveness of disturbance compensation by delay prediction results are analyzed theoretically, and a contrast test is conducted on the theoretical verification teleoperation system. Experimental results show that compared with predictive display method without time-delay prediction, the proposed method's relative errors of the velocity prediction and the contact force prediction decrease 30.9% and 56% at the peak of errors respectively, under large time-varying delay.

Keywords: large time-varying delay; teleoperation; predictive display; time-delay prediction

1 引言 (Introduction)

主从遥操作系统作为人机协作系统, 既能够充分发挥机器人完成远端任务的优势, 又可以结合人的智能执行复杂任务和处理意外事件, 一直是机器人领域的研究热点. 在主从遥操作任务中, 操作者对从端环境的感知至关重要^[1], 但通讯时延使操作者无法实时获取远端作业现场的反馈信息, 这不仅

降低了操作效率和操作质量, 还会威胁操作安全. 为了克服通讯时延的影响, 科学家们提出了多种保证遥操作系统稳定的控制策略^[2-8], 其中预测显示技术可以同时提高系统的稳定性和透明性, 被认为是目前解决遥操作时延问题最具潜力的方法^[7]. 视觉和触觉是操作者感知环境的主要手段, 在非接触任务中, 视觉对总感知信息的贡献超过 70%; 在接触任务中, 力觉是精确感知环境的主体, 占总感知

信息的 70% 以上^[9]. 因此, 视觉和力觉预测算法一直是机器人预测显示系统的研究重点.

在图形预测方面, 美国、日本^[6]、德国以及国内的哈尔滨工业大学^[10]、华中科技大学^[11]和中国科学院沈阳自动化研究所^[12]等都进行了大量研究, 并将其应用到实际或理论验证遥操作系统中. 相对视觉预测, 目前对力觉预测算法的研究还较少, 但也已取得了不少成果^[7,13-14]. 通过分析已有文献发现, 目前对机器人预测显示系统的研究主要集中在环境几何建模与视觉渲染算法、环境动力学建模与力觉渲染算法和模型误差在线矫正算法这 3 个方面, 且其研究成果基本都是建立在固定时延甚至不考虑时延的基础之上的. 但是实际遥操作系统的通讯时延总是时变的, 此时主从控制信号会在时间维度上被拉伸和压缩, 并造成虚、实机器人的控制信号不完全对应. 因此, 即使虚拟模型非常精确, 也会因为时延的抖动而引起预测误差. 此时若再将该误差归结为由模型误差引起, 并利用回归方法对其进行矫正, 反而可能会增大预测误差. 而在刚性接触任务中, 微小的速度和位置预测误差便可能造成很大的接触力, 并威胁操作安全. 因此, 研究大时变时延遥操作机器人的预测显示算法对于提高实际遥操作系统的透明性和安全性具有重要意义.

基于此, 本文提出一种基于时延预测的预测显示算法. 该算法把时变时延在时间维度上对遥操作系统的影响作用看作是未知扰动, 并利用在线时延预测结果在整个遥操作系统中对该扰动进行前馈补偿. 实验结果表明, 该算法在大时变时延下可显著提高对从端机器人速度和接触力的预测精度.

2 算法 (Algorithm)

本文构建的遥操作系统如图 1 所示, 在主从遥

操作任务中, 操作者通过力反馈主手给出机器人的参考位置和参考速度, 主端控制器根据主手给出的参考量计算出从端机器人在关节空间下的期望状态, 并发送给从端控制器, 从端控制器接收到主端指令后立即把机器人的当前状态发送回主端. 主端控制器根据反馈数据包上的时间戳和指令编号测量通讯时延, 并通过时延预测模块进行时延预测, 时延预测结果会被打包到下条遥操作指令中. 从端控制器根据主端指令中的期望状态和时延预测结果规划从端机器人的轨迹, 并计算机器人控制量. 主端控制器根据从端反馈状态、时延预测结果和指令缓存计算预测显示系统的控制量. 预测显示系统根据主端控制器给出的控制量进行运动, 并把计算出的预测力发送给力反馈主手和操作者. 预测显示系统发送给主端控制器的位姿用于校准虚拟机器人位姿, 从端的反馈力用于辨识环境动力学参数.

2.1 预测显示算法

基于预测显示的主从遥操作系统, 其主端和从端的动力学模型如下:

$$\begin{aligned} M_m(\theta_m)\ddot{\theta}_m + V_m(\theta_m, \dot{\theta}_m) + G_m(\theta_m) &= \tau_m + \tau_h - \tau_{vp} \\ M_s(\theta_s)\ddot{\theta}_s + V_s(\theta_s, \dot{\theta}_s) + G_s(\theta_s) &= \tau_s - \tau_e \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 等式的左侧分别为力反馈主手和从端机器人的动力学参数, 下标 m 和 s 分别表示主端和从端. 等式右侧的 τ_m 是力反馈主手的关节力矩, τ_h 是操作者对力反馈主手施加的力矩, τ_{vp} 是预测显示系统计算的预测力矩, τ_s 是从端机器人的关节力矩, τ_e 是环境对从端机器人的反作用力矩.

由于力反馈主手对其自身具有良好的动态力矩补偿能力, 也即操作者可以直接感知到预测的接触力 ($\tau_h = \tau_{vp}$), 因此本文不再对主端深入研究.

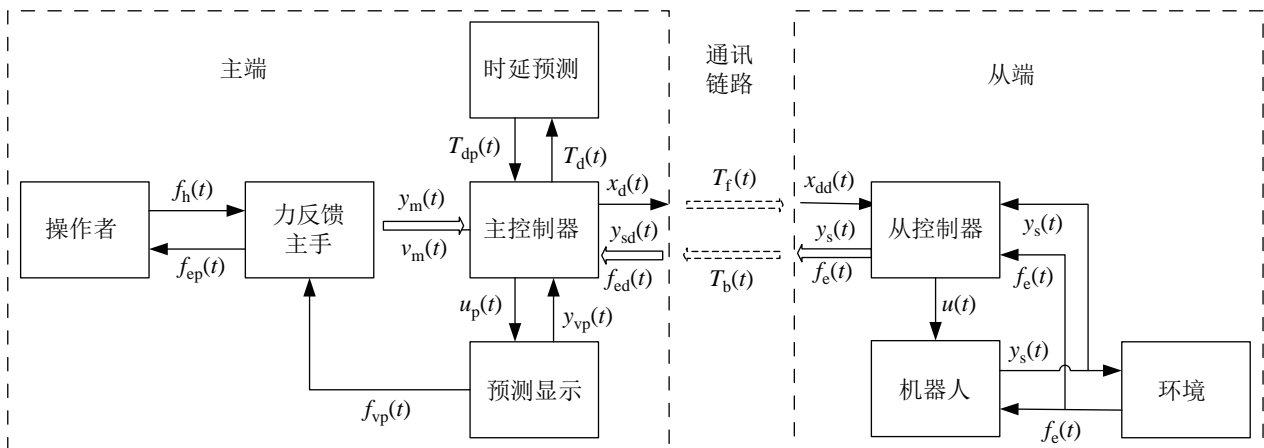


图 1 本文构建的遥操作系统框图

Fig.1 The proposed teleoperation system

定义从端机器人在关节空间下的状态向量为 $\mathbf{x}(t) = [\boldsymbol{\theta}_s^T(t) \ \dot{\boldsymbol{\theta}}_s^T(t)]^T$, 则其动力学方程可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(f(\mathbf{x}(t))) + \mathbf{M}_s^{-1}(\mathbf{x}(t))\boldsymbol{\tau}_s(t) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} \\ \mathbf{I}_{n \times n} \end{bmatrix}_{2n \times n}$, \mathbf{A}_{21} 和 \mathbf{A}_{22} 为负定对角阵, $f(\mathbf{x}(t))$ 包含了从端所有非线性部分和环境的反作用力, 即

$$f(\mathbf{x}(t)) = -\mathbf{M}_s^{-1}(\mathbf{x}(t))(\mathbf{V}_s(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{G}_s(\mathbf{x}(t)) + \boldsymbol{\tau}_e(\mathbf{x}(t))) - [\mathbf{A}_{21} \ \mathbf{A}_{22}]\mathbf{x}(t)$$

定义从端机器人的控制输入 $\mathbf{u}(t)$ 和输入转矩 $\boldsymbol{\tau}_s(t)$ 的关系如下:

$$\boldsymbol{\tau}_s(t) = -\mathbf{M}_s(\mathbf{x}(t))f(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{M}_s(\mathbf{x}(t))\mathbf{u}(t) \quad (3)$$

受时变时延的影响, 从端机器人不可能完全跟踪主手的轨迹, 为了保证主从操作的因果关系和遥操作系统的安全性, 需要优先保证从端机器人对主端位置的准确跟踪, 设置从端机器人的控制输入为 $\mathbf{u}(t) = -[\mathbf{A}_{21} \ \mathbf{0}_{n \times n}]\mathbf{x}_{dd}(t)$. 其中, $\mathbf{x}_{dd}(t) = \mathbf{x}_d(t - T_f)$, 为主端计算出的期望状态的时延量, T_f 是前向时延. 构造李亚普诺夫函数:

$$v = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\theta}}_s^T \dot{\boldsymbol{\theta}}_s - \frac{1}{2}\mathbf{E}^T \mathbf{A}_{21} \mathbf{E} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{E} = \boldsymbol{\theta}_{dd} - \boldsymbol{\theta}_s$. 由于矩阵 \mathbf{A}_{21} 负定, 很容易证明从端系统闭环渐近稳定.

此时, 状态空间下的闭环方程可表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (5)$$

定义从端机器人的输出为 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{x}(t)$, 并对其进行离散化可得:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{x}(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

其中, \mathbf{G} 和 \mathbf{H} 分别为矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的离散化结果, $\mathbf{u}(k) = -[\mathbf{G}_{21} \ \mathbf{0}_{n \times n}]\mathbf{x}_d(k - d_f)$, $d_f = T_f/T_s$ 为前向时延拍数, T_s 为采样周期.

假设主端在 kT_s 时刻接收到的从端状态反馈量为 $\mathbf{x}_m(k) = \mathbf{x}(k - d_b)$, 则 j 步后从端的状态如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_m(k+j|k) &= \mathbf{G}^j \mathbf{x}(k - d_b) + \sum_{i=1}^j \mathbf{G}^{j-i} \mathbf{H}\mathbf{u}(k - d_b + i - 1) \\ &= \mathbf{G}^j \mathbf{x}(k - d_b) + \sum_{i=1}^j \mathbf{G}^{j-i} \mathbf{H}\hat{\mathbf{u}}(k - d_b + i - 1) + \\ &\quad \sum_{i=1}^j \mathbf{G}^{j-i} \mathbf{H}\mathbf{w}(k - d_b + i - 1) \end{aligned}$$

其中, $d_b = T_b/T_s$, 为反向时延拍数, $\hat{\mathbf{u}}(k)$ 为根据指令缓存对 $\mathbf{u}(k)$ 的估计, $\mathbf{w}(k) = \mathbf{u}(k) - \hat{\mathbf{u}}(k)$ 为时变时延对整个遥操作系统的未知扰动.

取 $j = d_f + d_b$, 可以根据遥操作指令缓存和从端机器人的状态反馈估计出从端机器人的理论状态. 对于预测显示系统, 不仅需要预测从端机器人的位置, 还需要准确预测从端机器人的速度、加速度以及接触力, 根据状态预测结果设置预测显示机器人的控制输入如下:

$$\mathbf{u}_p(k) = \ddot{\boldsymbol{\theta}}_p(k) - [\mathbf{G}_{21} \ \mathbf{G}_{22}]\mathbf{x}_m(k + d_f + d_b|k) \quad (7)$$

由于机器人的加速度不能直接获取, 文中利用相邻采样点速度的差分来计算.

当不进行时延预测时, 时变时延对系统的扰动不可预知, 因此估计出的从端机器人状态如下:

$$\begin{aligned} &\hat{\mathbf{x}}_m(k+j|k) \\ &= \mathbf{G}^j \mathbf{x}(k - d_b) + \sum_{i=1}^j \mathbf{G}^{j-i} \mathbf{H}\hat{\mathbf{u}}(k - d_b + i - 1) \end{aligned}$$

此时, 遥操作系统对时延扰动没有任何补偿作用, 预测误差会随着时延的抖动而增大.

由于机器人末端工具和操作目标的刚度都很大, 接触过程中可以忽略两者的形变, 即位置约束方向上的速度为 0. 在接触过程中, 设机器人当前采样周期的关节角为 $\boldsymbol{\theta}$, 期望关节角为 $\boldsymbol{\theta}_d$, 根据系统控制输入求出的机器人期望速度和期望加速度分别为 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_d$ 和 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d$. 定义转矩 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}_s(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d + \mathbf{V}_s(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_d)$, 则机器人末端与环境的接触力 $\mathbf{f} = \mathbf{n}^T \mathbf{J}^{-T}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\tau}$, 其中 \mathbf{n} 为笛卡儿坐标系下位置约束的单位方向向量, 其位置约束法向上的接触力按照库仑摩擦力计算.

2.2 时延预测算法

为了提高算法的通用性, 本节选择时延组成最为复杂的空间遥操作系统的通信时延进行分析和预测. 典型的空间遥操作系统的传输时延包括地面控制中心与地面基站间的地面网络传输时延、地面基站与空间设备间的天地传输时延及信息回路中各节点的信息处理时延, 而普通地面遥操作系统的通信时延只是其中的一部分.

地面通信的通信介质为因特网, 已有的研究表明其近似服从平移伽马分布, 并且其参数可以通过实测时延进行在线估计. 利用平移伽马分布的长程相关性, 采用基于稀疏矩阵的多元线性回归算法^[15]对地面传输时延进行一步预测, 该算法只选用和当前时延相关性足够大的实测时延值来预测当前时延, 详细算法如下.

假设已测得的时延序列为 x_1, x_2, \dots, x_n , 首先选定滑动窗口 m ($m < n$, 时延抖动越剧烈, 窗口长度越短). 构造回归向量 $\mathbf{X}_i = [x_{i-m+1}, x_{i-m+2}, \dots, x_i]^T$ 和矩阵 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_m, \mathbf{X}_{m+1}, \dots, \mathbf{X}_{n-1}]$. 计算矩阵 \mathbf{X} 中的所有列与 \mathbf{X}_n 的相关系数, 选择与其相关系数最大的 k 列构成回归矩阵 $\mathbf{R} = [\mathbf{1}_{m \times 1}, \mathbf{X}_p, \dots, \mathbf{X}_q, \dots, \mathbf{X}_r]_{m \times (k+1)}$, 其中, $m \leq p < q < r < n$, k 的选法与 m 类似.

定义回归方程 $\mathbf{X}_n = b_0 \mathbf{R}_1 + b_1 \mathbf{R}_2 + \dots + b_k \mathbf{R}_{k+1}$, 其中 b_i ($i = 0, 1, \dots, k$) 为回归系数, 通过上述回归矩阵和回归向量计算回归系数的最小二乘估计值 $\hat{\mathbf{B}}$.

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \\ \vdots \\ \hat{b}_k \end{bmatrix} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{X}_n \quad (8)$$

利用前面已经构建的回归向量构造新的回归矩阵 $\mathbf{R}' = [\mathbf{1}_{m \times 1}, \mathbf{X}_{p+1}, \dots, \mathbf{X}_{q+1}, \dots, \mathbf{X}_{r+1}]_{m \times (k+1)}$, 则下一个数据包的通讯时延可根据 $\hat{\mathbf{X}}_{n+1} = \mathbf{R}' \hat{\mathbf{B}}$ 进行预测. 其中, $\hat{\mathbf{X}}_{n+1} = [\hat{x}_{n-m+2}, \hat{x}_{n-m+3}, \dots, \hat{x}_{n+1}]_{m \times 1}^T$, 为时延预测值. 计算时, 由于矩阵求逆的时间复杂度较高, 可通过求解方程 $(\mathbf{R}'^T \mathbf{R}') \hat{\mathbf{B}} = \mathbf{R}'^T \mathbf{X}_n$ 计算回归系数的估计值.

天地传输时延是数据在天地之间传输时产生的时延, 可以用传输距离除以光速获取. 但在实际系统中, 单个地面基站能捕获到目标的时间比较短, 所以天地通信一般要借助于中继卫星实现, 故天地通信中需要经过电磁波的多次反射, 其实际时延也会远大于理论值. 考虑到在短时间内天地通信链路的中继方式不变, 运行轨道不变, 因而可用3次多项式对通信时延进行拟合和预测. 每次预测时, 选择前面几秒的实测时延对多项式参数进行最小二乘辨识, 然后根据辨识出的模型外推出未来时延.

信息节点的指令处理时延主要取决于指令队列的长度, 其影响因素较多, 通过分析其产生机理可认为其近似服从于正态分布. 节点处理时延具有一定的平稳周期, 在同一个平稳周期内变化幅度较小^[16], 根据其统计规律, 设计了一种自适应滑动平均方法对其进行预测. 假设其一个平稳周期长度为 n , $x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-2n+1}$ 为最近测得的 $2n$ 个时延值, x_{i+1} 为要预测的下一个时延, 则有 $\hat{x}_{i+1} = \sum_{j=1}^{2n} w_j x_{i-j+1}$, 其中 w_j 为自适应加权系数. 判定 x_i 在该平稳周期的位置 k ($k = 1, 2, \dots, n$), 如果 $k = n$, 所有的加权系数均为 $1/n$, 否则加权系数取

法如下:

$$\begin{cases} w_j = 1/k, & j = 1, \dots, k \\ w_j = 0, & j = k+1, \dots, 2n-1 \end{cases} \quad (9)$$

基于稀疏矩阵的多元线性回归算法和该算法都是一步预测算法, 当需要进行长程预测时, 只需把当前预测值当作实测时延继续向后预测.

2.3 扰动补偿算法

受通信带宽和时延抖动的限制, 主端与从端控制器的通讯频率一般不高, 为了保证机器人的平稳运动需要对遥操作指令进行插值. 设主从通信周期为 T_{ms} , 从端机器人的控制周期为 T_{sc} , 基于时延预测得到的上条、本条和下条遥操作指令到达从端控制器的时刻分别为 \hat{T}_{n-1} 、 \hat{T}_n 和 \hat{T}_{n+1} , 则主端估计的从端控制量的增量为 $\Delta \hat{\mathbf{u}}_n(k) = -\mathbf{G}_{21} \Delta \boldsymbol{\theta}_n / \hat{d}_n$, 其中 $\hat{d}_n = (\hat{T}_{n+1} - \hat{T}_n) / T_{sc}$, 为本条遥操作指令的预计插值个数, $\Delta \boldsymbol{\theta}_n$ 为本条指令包含的关节角增量. 如果一段时间后从端控制器接收到上条、本条和下条指令的实际时刻为 T_{n-1} 、 T_n 和 T_{n+1} , 由于遥操作指令中已经包含了时延预测结果, 从端控制器会按照时延预测结果对遥操作指令进行插值, 则 T_n 时刻时前面还没执行的控制量增量 $\Delta \mathbf{u}_{n-1}$ 和本条指令执行期间从端机器人的实际控制量增量 $\Delta \mathbf{u}_n(k)$ 如下:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}_{n-1} &= \sum_{i=d_{n-1}}^{\hat{d}_{n-1}} (\Delta \mathbf{u}_{n-1}(i) + \Delta \mathbf{w}_{n-1}(i)) \quad (10) \\ \Delta \mathbf{u}_n(k) &= \begin{cases} (-\mathbf{G}_{21} \Delta \boldsymbol{\theta}_n + \Delta \mathbf{u}_{n-1}) / \hat{d}_n, & k \in [0, \hat{d}_n] \\ 0, & k \in (\hat{d}_n, d_n) \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

其中 $d_n = (T_{n+1} - T_n) / T_{sc}$, 则时变时延在本条指令执行周期内对系统的扰动增量 $\Delta \mathbf{w}_n$ 如下:

$$\Delta \mathbf{w}_n(k) = \begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{n-1} / \hat{d}_n, & k \in [\hat{d}_{n-1} - d_{n-1}, \hat{d}_n] \\ \mathbf{G}_{21} \Delta \boldsymbol{\theta}_{n+1}, & k \in (\hat{d}_n, d_n) \end{cases} \quad (12)$$

当 $k \in [0, \hat{d}_{n-1} - d_{n-1})$ 时, 本条指令对上条指令执行周期的扰动如下:

$$\Delta \mathbf{w}_n(k) = -\mathbf{G}_{21} (\Delta \boldsymbol{\theta}_{n-1} / \hat{d}_{n-1} - \Delta \boldsymbol{\theta}_n / \hat{d}_n) + \Delta \mathbf{u}_{n-1} / \hat{d}_n \quad (13)$$

从式 (11) ~ (13) 可以看出, 当在遥操作指令中利用时延预测结果对时延扰动进行前馈补偿时, 其补偿效果取决于时变时延的在线预测精度. 当时延预测完全准确时有 $\hat{d}_{n-1} = d_{n-1}$ 和 $\hat{d}_n = d_n$, 此时可以完全补偿时变时延的扰动.

而当没有时延预测结果对时变时延进行补偿时, 从端机器人控制器和预测显示系统只能认为时延是固定的, 即 $\hat{d}_n = T_{ms}/T_{sc}$. 此时, 时变时延对系统扰动的大小完全取决于时延的抖动程度, 且不可预知, 因此预测显示结果会有较大误差.

3 实验与分析 (Experiments and analysis)

本文构建的实验平台如图 2 所示, 包括 1 台 3 自由度力反馈主手 Omega.3 (Force Dimension 公司)、1 台虚拟 6 自由度机器人、1 套虚拟现实头盔系统 (Oculus DK2). 此外, 还有运行预测显示系统和虚拟机器人的图形工作站以及运行遥操作主控程序的服务器, 除了力反馈主手与服务器间通过 USB 通信外, 其他设备间均采用 UDP 协议进行网络通信. 主从控制器软件和预测显示软件均采用 C++ 语言开发, 开发环境为 VS2008 和 VS2010.



图 2 实验平台

Fig.2 Experiment platform

基于虚拟现实头盔 Oculus DK2 的机器人预测显示软件的图形界面如图 3 所示, 通过编写顶点着色语言程序, 在显卡上配合预测显示程序实现了对镜片光学畸变和颜色散射的实时补偿.

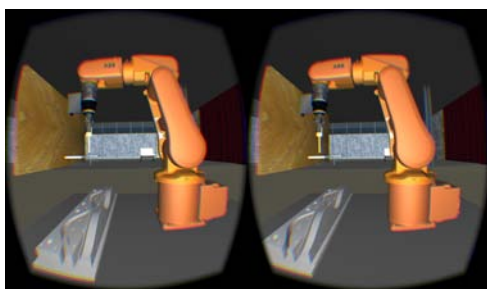


图 3 基于 Oculus DK2 的预测显示界面

Fig.3 Predictive display interface based on Oculus DK2

仿照实际的天地遥操作系统, 设置主端与从端的通讯周期为 $T_{ms} = 0.25$ s, 为了保证从机器人平稳运行, 从机器人的控制周期设置为 $T_{sc} = 0.01$ s, 主端与预测显示系统的通信周期为 $T_{mp} = 0.01$ s, 从端机器人和预测显示系统的采样时间为 $T_s = 0.001$ s.

预测显示系统和从端机器人都采用相同的虚拟模型, 机器人连杆的惯量和质心都采用数值积分的方法计算. 为了让闭环系统具有较高的刚度, 且工作在临界阻尼状态, 控制器参数选择为 $A_{21} = \text{diag}\{-1600, -1600, -1600, -1600, -1600, -1600\}$, $A_{22} = \text{diag}\{-80, -80, -80, -80, -80, -80\}$. 实验开始之前先发送 10 s 的零增量数据包, 用于同步主从位置并测量时延预测所需要的初始时延数据.

利用文 [16] 给出的时延模拟方法和参数生成模拟时延 (前向通信时延值如图 4 所示), 并把其加入到本文构建的半实物遥操作系统中.

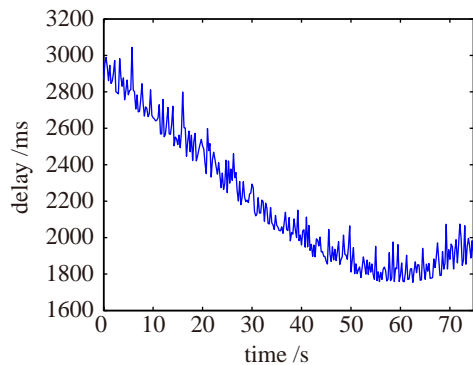


图 4 遥操作系统前向时延

Fig.4 The forward delay of the teleoperation system

操作者操纵力反馈主手进行遥操作实验, 当不进行时延预测时, 预测显示系统和从端机器人控制器只能默认指令到达时间间隔与其发送时间间隔一致, 估计的从端控制量增量 $\Delta\hat{u}_n(k) = -G_{21}\Delta\theta_n/25$, 其中, $\Delta\theta_n$ 为本条指令对应的关节角增量, 此时对从端机器人位置、速度和接触力的预测显示结果分别如图 5、图 6 和图 8 所示, 速度和接触力的预测误差分别如图 7 和图 9 所示.

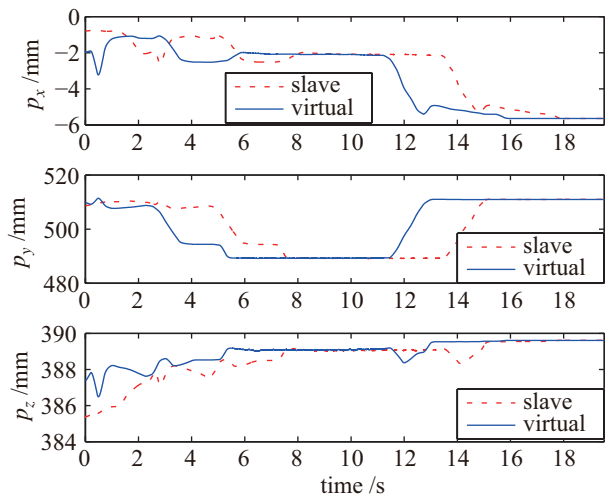


图 5 无时延预测时的位置预测结果

Fig.5 Position prediction results without time delay prediction

从图 5 可以看出, 该方法在不进行时延预测时也能对从端机器人的最终位置作出准确预测.

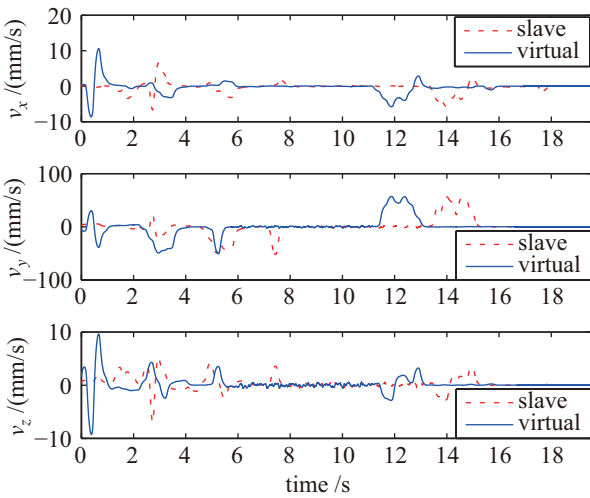


图 6 无时延预测时的速度预测结果

Fig.6 Velocity prediction results without time delay prediction

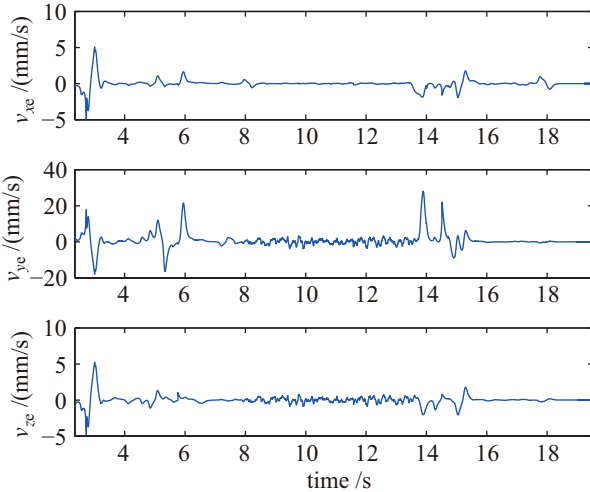


图 7 无时延预测时的速度预测误差

Fig.7 Velocity prediction errors without time delay prediction

从图 6 和图 7 可以看出, 当不利用时延预测结果对时延抖动进行补偿时, 预测显示系统没有对从端机器人的速度作出准确的预测, 这是因为受时变时延的影响, 本条指令可能会在上条指令还没执行结束时便已到达, 此时从端控制器会把前面指令的未执行部分合并到当前指令执行以保证位置跟踪的准确性. 此时, 前面还没执行完的控制量增量和指令的超前滞后到达时间便形成了对系统的实际扰动. 当不进行时延预测时, 系统对时延扰动没有任何补偿作用, 扰动全部反映到预测误差上. 而且当下条指令与当前指令的到达间隔大于 0.25 s 时, 本条指令和下条指令之间会有一段时间控制量增量为 0, 此时机器人速度会迅速减小, 而当收到新指令

后机器人又会快速加速以实现位置跟踪, 经常如此冲击则会加快从端机器人的磨损.

受力反馈主手行程的限制, 当进行大范围主从操作时需要反复对主手执行“锁定—复位—解锁”操作, 其中“锁定—复位”阶段主端向从端发送的控制量增量为 0, 忽略该阶段和稳定接触阶段, 对速度预测误差进行量化分析. 为了评价准确性和安全性, 选择绝对平均相对误差 (误差绝对值的均值与实际速度绝对值的均值之比) 和主运动方向上误差极值点处的相对误差来评价速度预测显示效果. 根据图 6 和图 7, 3 个方向上的绝对平均相对误差分别为 35.24%、20.33% 和 39.50%; 在主运动方向, 3 个主手操作周期内, 其速度误差极值点处的相对预测误差分别为 73.5%、40.7% 和 49.8%.

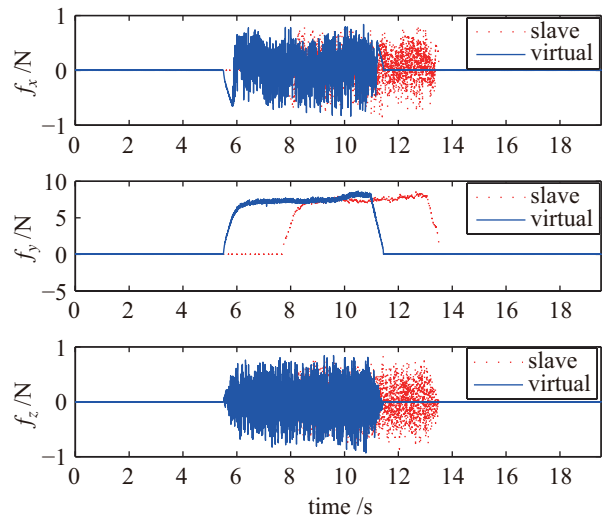


图 8 无时延预测时的接触力预测结果

Fig.8 Contact force prediction results without delay prediction

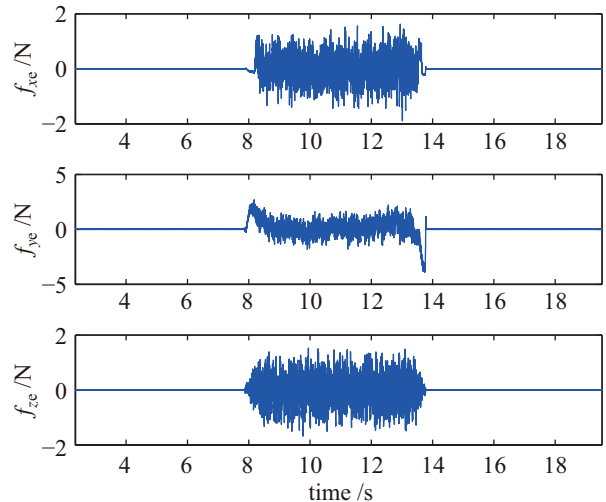


图 9 无时延预测时的接触力预测误差

Fig.9 Contact force prediction errors without delay prediction

从图 8 和图 9 可以看出, 接触力的预测误差主

要体现在碰撞发生和分离阶段,误差极值点处的相对误差分别达到了69%和72%。这是因为在稳定接触阶段机器人不会在刚性位置约束上发生穿透运动,操作者可以感知到稳定的接触力,为了操作安全,操作者在位置约束方向给出的位置增量基本为0,因而从端机器人和预测显示机器人在位置约束上的控制量增量也基本为0,此时接触力主要取决于机器人的闭环刚度和已有的位置误差。但是在碰撞发生和分离这2个非稳定接触阶段,受操作者反应时间的影响,操作者给出的位置增量不会立即为0,因而接触力会受时变时延的影响。同时,这两个阶段也是操作者最容易误判和误操作的时候,因此对这两个阶段接触力的准确预测最为重要。

利用2.2节提出的时延预测方法对前向时延进行在线预测,超前10步(超前2.5s,为需要预测的最长步数)的时延预测结果如图10所示。

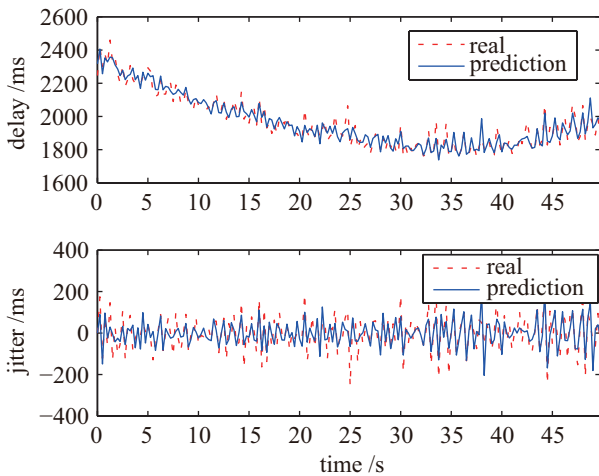


图10 时延和时延抖动的预测结果(超前10步)

Fig.10 Prediction results of time delay and delay jitter (10 steps ahead)

当利用在线时延预测结果对时延抖动进行前馈补偿时,对从端机器人位置、速度和接触力的预测显示结果如图11、图12和图14所示,对速度和接触力的预测误差如图13和图15所示。

从图12和图13可以看出,当利用时延预测结果对时延抖动进行补偿时,除了个别时间点因时延预测误差较大造成速度预测不准确外,大部分时间预测显示系统都可以对从端速度作出比较准确的预测。3个方向上的绝对平均相对误差分别为5.72%、6.27%和14.86%,相对无时延预测补偿的情况,分别降低了29.52%、14.06%和24.64%;主运动方向上速度预测误差极值点处的相对误差分别为36.5%、9.8%和11.67%,相对无时延预测补偿的情况,分别降低了37%、30.9%和38.13%。

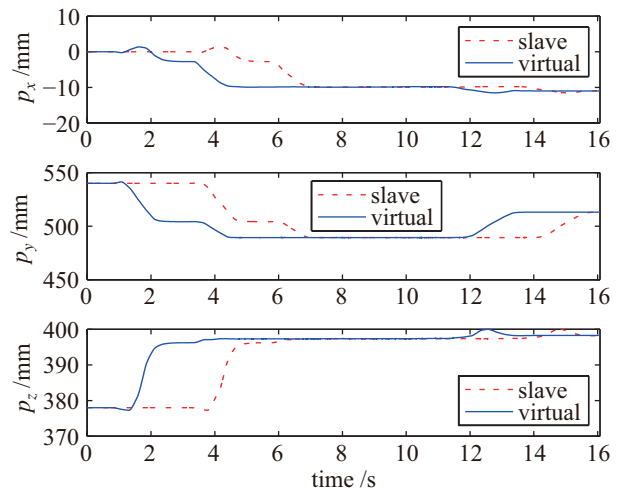


图11 有时延预测补偿时的位置预测结果

Fig.11 Position prediction results with delay prediction

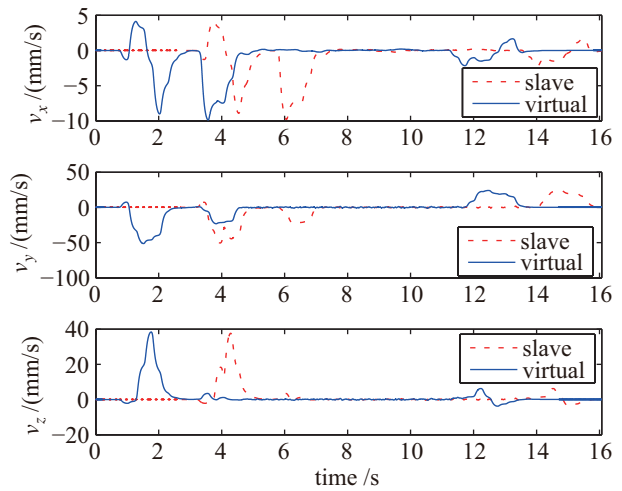


图12 有时延预测补偿时的速度预测结果

Fig.12 Velocity prediction results with time delay prediction

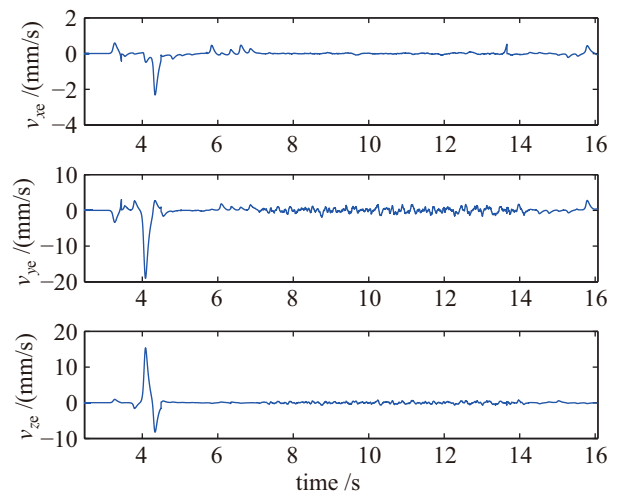


图13 有时延预测时的速度预测误差

Fig.13 Velocity prediction errors with time delay prediction

通过图14和图15可以看出,当利用在线时延预测结果对时变时延进行补偿时,碰撞发生和分离

阶段的接触力预测准确性有了明显的提高, 误差极值点处的相对误差分别为 13% 和 15%, 相比无时延预测补偿的情况, 分别降低了 56% 和 57%。

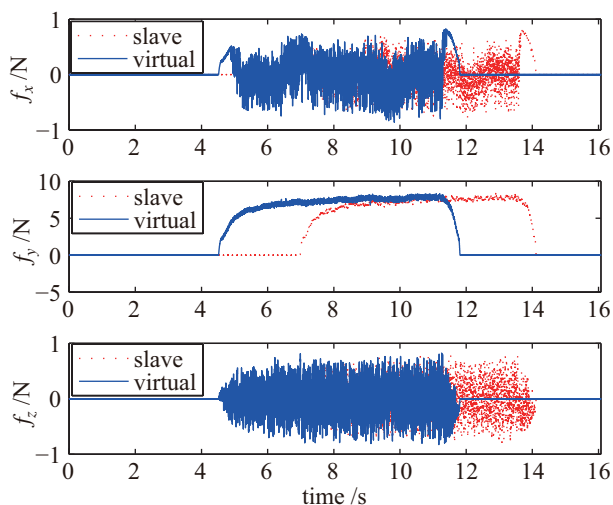


图 14 有时延预测补偿时的接触力预测结果

Fig.14 Contact force prediction results with delay prediction

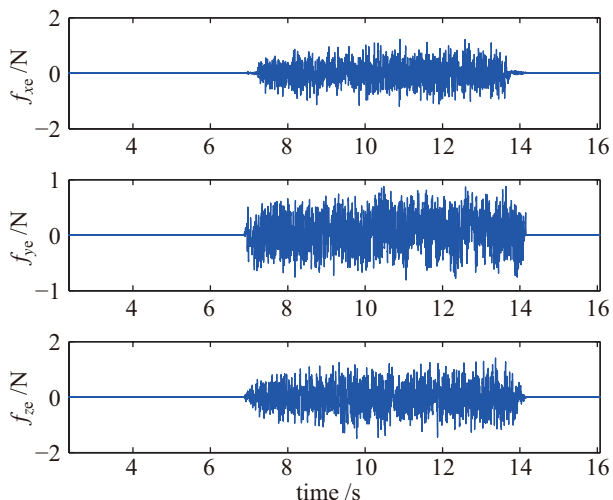


图 15 有时延预测时的接触力预测误差

Fig.15 Contact force prediction errors with delay prediction

4 结论 (Conclusion)

预测显示可同时提高遥操作系统的透明性和稳定性, 被认为是解决遥操作时延问题最具潜力的方法。但是在时变时延遥操作系统中, 主从控制信号会在时间维度上被拉伸和压缩, 此时若再向预测显示系统和从端机器人发送相同的控制信号, 则会造成虚实信号不对应, 从而造成速度预测和接触力预测的不准确, 且预测误差和时延的抖动程度正相关。实际遥操作系统的通信时延总是时变的, 为了提高时变时延下预测显示的精度, 本文提出一种基于时延预测的预测显示算法, 该算法把时变时延对遥操作系统的影响看作是未知扰动, 然后用时延预

测结果对该扰动进行前馈补偿, 从而减弱了时延扰动对基于预测显示的遥操作系统的影响。本文首先对基于预测显示的遥操作系统进行动力学分析, 并计算出了包含从端反馈状态、指令缓存和未知扰动的预测显示机器人的控制量。然后以时延组成最为复杂的空间遥操作系统为例, 分析了通讯时延的产生机理, 并根据时延产生机理、时延模型和时延统计规律选定预测算法。时延预测结果表明, 所提算法在长程预测时仍可对时变时延进行较为准确的在线预测。最后, 本文从理论上分析了利用时延预测结果对时延扰动进行前馈补偿的可行性和有效性, 并在理论验证遥操作平台上进行了对比实验。实验结果表明, 本文提出的预测显示算法可在大时变时延遥操作系统中显著提高速度和接触力的预测精度。相比无时延预测的预测显示算法, 该算法速度预测的绝对平均相对误差降低了 14% 以上, 主运动方向上速度预测误差极值点处的相对误差降低了 30% 以上。在碰撞发生和分离阶段, 接触力预测误差极值点处的相对误差降低了 56% 以上。

参考文献 (References)

- [1] Song A G. Force telepresence telerobot (1): Review of the history and development[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology, 2013, 5(1): 1-19.
- [2] Hokayem P F, Spong M W. Bilateral teleoperation: An historical survey[J]. Automatica, 2006, 42(12): 2035-2057.
- [3] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(5): 494-501.
- [4] Polushin I G, Dashkovskiy S N, Takhmar A, et al. A small gain framework for networked cooperative force-reflecting teleoperation[J]. Automatica, 2013, 49(2): 338-348.
- [5] Polat I, Scherer C W. Stability analysis for bilateral teleoperation: An IQC formulation[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(6): 1294-1308.
- [6] Yoon W K, Goshozono T, Kawabe H, et al. Model-based space robot teleoperation of ETS-VII manipulator[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 602-612.
- [7] Li H J, Song A G. Virtual-environment modeling and correction for force-reflecting teleoperation with time delay[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1227-1233.
- [8] Mollet N, Chellali R, Brayda L. Virtual and augmented reality tools for teleoperation: Improving distant immersion and perception[M]//Lecture Notes in Computer Science, vol.5660. Berlin, Germany: Springer, 2009: 135-159.
- [9] 马云飞, 王爱民, 宋爱国, 等. 基于 Internet 力觉临场感遥操作控制系统现状 [J]. 测控技术, 2002, 21(3): 1-3. Ma Y F, Wang A M, Song A G, et al. Prospects of Internet-based force telepresence teleoperation control system[J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21(3): 1-3.
- [10] 马良, 闫继宏, 赵杰, 等. 基于虚拟环境的多操作者多机器人协作遥操作系统 [J]. 机器人, 2011, 33(2): 169-173.

- Ma L, Yan J H, Zhao J, et al. Virtual environment-based multi-operator multi-robot cooperative teleoperation system[J]. Robot, 2011, 33(2): 169-173.
- [11] 赵迪. 变时延环境下的任务级遥操作关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Zhao D. Research on key technologies of time-vary delay teleoperation to robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [12] Wei Q, Liu N L, Cui L. Predictive display for telerobot under unstructured environment[C]//14th International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Berlin, Germany: Springer, 2016: 1027-1036.
- [13] Xu X, Cizmeci B, Al-Nuaimi A, et al. Point cloud-based model-mediated teleoperation with dynamic and perception-based model updating[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(11): 2558-2569.
- [14] Daly J M, Wang D W L. Time-delayed output feedback bilateral teleoperation with force estimation for n-DOF nonlinear manipulators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 299-306.
- [15] Chen D, Fu X H, Ding W, et al. Shifted gamma distribution and long-range prediction of round trip timedelay for Internet-based teleoperation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1261-1266.
- [16] 阳方平. 天地遥操作系统的预测显示控制方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
Yang F P. Predictive display control for space teleoperation system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

作者简介:

魏 青 (1988-), 男, 博士生. 研究领域: 人机交互, 虚拟现实, 接触力控制.

崔 龙 (1980-), 男, 博士, 副研究员. 研究领域: 机器人及其遥操作技术, 智能机构与振动控制, 先进工业机器人及其控制, 机电一体化技术.