

互联网上机器人的遥控理论与方法综述

王世华¹, 胥布工¹, 刘云辉², 席 宁³

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院 基于网络和现场总线实时控制实验室, 广东 广州 510640;

2. 香港中文大学 机械与自动化工程学系, 香港 新界 沙田; 3. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 给出了系统的研究模型, 指出系统控制和设计必须考虑的3个关键问题: 稳定性、透明性和时延处理. 阐述了4个主要的稳定性分析方法: Lyapunov稳定性、输入输出稳定性、无源稳定性和基于事件的稳定性, 总结了这些方法的优势和局限性. 接着, 给出了几种主要的控制策略, 指出了现有控制方法的优缺点. 最后, 提出了进一步的主要研究方向.

关键词: 网络机器人; 遥操作; 稳定性; 控制策略

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A review of the remote-control theories and methods for internet-based robots

WANG Shi-hua¹, XU Bu-gong¹, LIU Yun-hui², XI Ning³

(1. Laboratory of Real-Time Control through Internet and Fieldbuses, College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Shatin New Territories HongKong;

3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: This review describes the system models and the three key problems to be concerned with. They are the stability, transparence and network delay process. It also elaborates on the four main techniques for stability analysis, which are Lyapunov stability, input-output stability, passivity and event-based stability. Their advantages and restrictions are summarized. Various control schemes are briefly reviewed. Future trends of development are indicated

Key words: internet robot; teleoperation; stability; control scheme

1 引言(Introduction)

伴随着信息技术的快速发展和互联网的迅速普及, 研究基于Internet遥操作机器人系统已成为机器人学领域的一个前沿课题. 1994年, 美国南加州大学Goldberg等人第1次建立了基于Internet机器人系统Mercury Project^[1], 网络上的远程控制机器人由此诞生. 随之, 大量机器人连接上互联网, 允许用户访问并控制机器人完成某些特定任务^[2~7], 其应用涉及工业、服务、教育、医疗、核工业、太空操作等领域. 为了完成更复杂的控制任务, 出现了多机器人网络遥操作系统^[8]. 为了解决多机器人之间的协调控制, 动态投票机制、分布式控制等控制策略^[9,10]相继被提出或应用. 目前, 遥操作者多是使用力反馈操纵杆, 但也有少量使用如: 骨骼机械设备^[11]、肌电运

动感应设备^[12]或人手的三维视觉^[13]等. 随着计算机性能的提高, 需要图象处理和大量计算的视觉伺服控制也被应用到网络遥操作系统中^[14].

较早的网络遥操作机器人系统一般属于远程规划^[15](teleprogramming)控制, 机器人运动是自主或半自主的, 仅有现场视频图像反馈^[2~6]. 虽然, 通过多行为的远程监控减少了人机交互的复杂度^[16], 通过人机协作和交互控制辅助了机器人的感知^[17], 但系统控制的实时性、知觉感受和操作性较差. 于是, 引入信号反馈尤其是力反馈, 形成了网络双向遥操作系统这种闭环控制方式. 然而, 由于网络特殊的信号传递方式和控制机制, 通讯时延是随机可变的, 存在数据丢包、乱序、带宽等问题. 所以, 网络遥操作系统的稳定性、透明性等性能难以保证, 系统的

控制非常复杂和困难。

2 系统模型(System models)

2.1 一般模型(General model)

考虑系统的一般性,网络遥操作系统可以简化为如下系统模型,见图1。

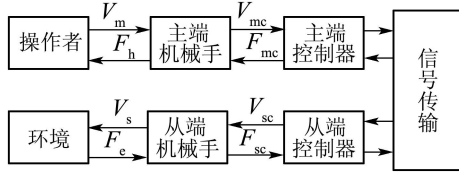


图1 遥操作系统一般模型

Fig. 1 General model for teleoperation systems

根据图1,系统动力学模型可分别简单地表示为:

$$H_m(q_m)\ddot{q}_m + C(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) = \tau_m + F_h + \hat{F}_e, \quad (1)$$

$$H_s(q_s)\ddot{q}_s + C(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + G_s(q_s) = \tau_s - F_e, \quad (2)$$

其中: m 表示主端, s 代表从端, $H(q)$ 是 $n \times n$ 对称惯量矩阵, $C(q, \dot{q})$ 表示哥氏力和离心力矢量, $G(q)$ 表示重力矢量, τ_l , $l \in \{m, s\}$ 为主从端控制输入. F_h 是操作者施加的力矩, F_e 为环境施加给从端的力矩, $\hat{F}_e$ 为从端反馈的环境力矩。

2.2 双端口网络模型 (Two-port network model)

可将遥操作系统映射为两端口网络模型(见图2),假定操作者和环境与主从端作用分别描述为线性时不变阻抗 Z_h 和 Z_e , 且满足:

$$F_h = F_h^* - Z_h V_m, F_e = F_e^* - Z_e V_s, \quad (3)$$

其中 V_m , V_s , F_h , F_e , F_h^* , F_e^* 分别为主端速度和从端速度,操作者和环境作用力,主端和环境对系统的外力输入. 由此,可得系统的混合矩阵模型为:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ F_e \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 h_{ij} , $i, j = 1, 2$ 是系统主从端动力学模型及相应控制器参数的函数。

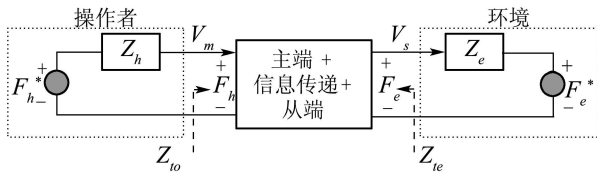


图2 遥操作系统双端口网络模型

Fig. 2 Two-port network model for teleoperation systems

在此基础上,引入透明性概念.透明性是反映遥操作系统动觉耦合效果好坏的一种描述.定性来说,

如果主操作端命令能在从端等效执行并等效反馈从端信息,如同操作者直接作用在从端环境一样,则透明性高,反之则低.基于式(4),如果系统是透明的,则 $V_m = V_s$, 且满足阻抗匹配条件 $Z_{to} = Z_{te}$, 其中:

$$Z_{te} = \frac{F_e}{-V_s} \Big|_{F_h^*} = \frac{h_{11} + Z_h}{(h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}) + h_{22}Z_h}, \quad (5)$$

$$Z_{to} = \frac{F_h}{-V_m} \Big|_{F_e^*} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e}, \quad (6)$$

进一步地,如果:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \\ F_e \end{bmatrix}, \quad (7)$$

根据式(5)(6),显然系统是完全透明的。

2.3 基于事件模型(Event-based model)

基于事件系统模型由图3所示,图中各参数以事件 s 为参考变量.在该模型中,系统被划分为3层控制方式:控制决策、运动规划、底层控制,其中,控制参考事件 s 由操作者通过规划器产生。

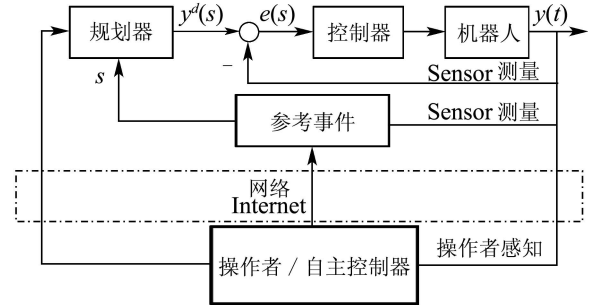


图3 网络遥操作系统基于事件模型

Fig. 3 Event-based model for telerobotic systems via Internet

3 关键问题(Key problems)

3.1 稳定性(Stability)

对于有信号反馈的双向遥操作系统,虽然力反馈等信号反馈能够增加系统临场感(tele-presence)等操作性能,但由于网络不确定时延的存在,系统的稳定性将受到很大的影响.对于一个原本稳定的双向遥操作系统,很小的信号时延都可能严重破坏其稳定性^[18].同时原本在常时延下稳定的时滞系统,当时延可变时,系统也将变得不稳定^[19].进一步地,由于机器人的非线性和强耦合,加上网络时延的不确定变化,解决网络遥操作系统的稳定性问题仍然是困难重重。

3.2 透明性(Transparency)

透明性给系统操作性能的好坏提供了一个评价准则,也给系统设计提供了一个可以参考的优化指标.系统透明性和系统无源(passivity)稳定性是一对矛盾,提高系统稳定性必然牺牲系统透明性,反之亦然^[20].实际上由于系统时延的存在,完全的系统透

明性是不能保证的, 虽然已经证明在主从端加入局部力反馈或引入三通道(three-channel)控制结构能够增加系统的透明性^[21]. 如何平衡系统稳定性和透明性, 仍然是一个待解决的问题.

3.3 网络时延(Network delay)

由于网络是开放和共享的, 网络结构的动态变化和流量数据的不均衡性, 导致时延是不确定和动态变化的. 目前作者通过端对端的网络时钟同步算法^[22], 结合多尺度的时延预测方法, 利用预估控制已经取得了一定的控制效果^[23], 但处理抖动或突变时延, 其操作性能仍然难以令人满意.

4 稳定性分析(Stability analysis)

4.1 Lyapunov稳定性(Lyapunov stability)

传统的频域稳定性分析方法只能获得线性常时滞操作系统的稳定性条件^[24]. 对于遥操作系统线性状态空间模型, 虽然文献^[25]通过Lyapunov函数法讨论了一般状态反馈下系统的收敛性和控制器设计方法, 但是结果是在假设 $x(t+T) = x(t) + T\dot{x}(t)$ 且时延为定常下得到的. 对于基于Internet遥操作机器人系统, 由于机器人的高度非线性及快变网络时延的存在, 常规方法得到系统的Lyapunov稳定性是相当困难的, 据作者了解, 目前还没有这方面的文献. 近年来, 基于Lyapunov函数法的新型稳定性定理以及新的稳定性分析方法在文献^[26~28]中逐步得到发展, 该方法的优点在于不必假设系统时延为定常, 同时改变了传统的Lyapunov函数由定号到定号的模式. 由于其在快变时滞系统分析上的优势, 如何利用该新型定理对网络遥操作系统进行稳定性分析和控制器设计, 将是我们努力的一个新方向.

4.2 输入-输出稳定性 (Input-output stability)

在有限输入-输出反馈连接的框架下, 引入动力学系统的稳定性概念:

定理 1^[29] 如图4所示, 图中有两个系统 $L_e^m \rightarrow L_e^q$ 和 $L_e^q \rightarrow L_e^m$, 其中空间 L_e^p , $p \in \{m, q\}$ 的下标 e 表示定义空间 e 范数的类型, 而上标 p 表示信号 u 的维数. 假设这两个系统都是有限增益 L 稳定的, 即存在非负常数 $\gamma_1, \gamma_2, \beta_1, \beta_2$ 使得

$$\|y_{1\tau}\|_L \leq \gamma_1 \|e_{1\tau}\|_L + \beta_1, \forall e_1 \in L_e^m, \forall \tau \in [0, \infty), \quad (8)$$

$$\|y_{2\tau}\|_L \leq \gamma_2 \|e_{2\tau}\|_L + \beta_2, \forall e_2 \in L_e^q, \forall \tau \in [0, \infty), \quad (9)$$

且每对输入 $u_1 \in L_e^m$ 和 $u_2 \in L_e^q$ 都存在唯一的输入 $e_1, y_2 \in L_e^m$ 和 $e_2, y_1 \in L_e^q$, 如果 $\gamma_1 \gamma_2 < 1$, 则此反馈连接是有限增益 L 稳定的.

文献^[30]在主从端分别设计了自适应力/运动控制器, 当主端机械手及从端机器人参数均有界, 选择适当的反馈控制增益, 则系统是 L_2 和 L_∞ 稳定的.

文献^[31]假设时延是Lebesgue测度函数, 在从端引入Dirty-derivative滤波, 使得子系统“滤波+从端+环境”是有限增益 L 稳定的, 进而, 选择适当小的非负常数 γ_m , 使得主端子系统也是有限增益 L 稳定的, 从而满足了定理1的稳定性条件.

然而, 由于通讯通道快变时延的存在, 输入-输出稳定性难以具体给出控制器增益大小的上下界, 这对控制器的设计来说是相当保守的.

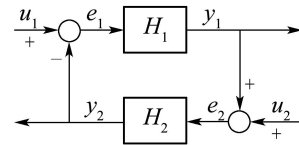


图4 输入-输出反馈连接

Fig. 4 Input-output feedback connection

4.3 无源稳定性(Passivity)

系统如果是无源的或严格无源的, 则系统是稳定的或时间稳定的, 同时两个无源系统的反馈连接仍然是无源系统.

定理 2^[32] 由式(4)描述的线性双端口网络是绝对稳定的充要条件是(Llewellyn稳定性):

- 1) h_{11} 和 h_{22} 没有在 s -右半平面的极点;
- 2) h_{11} 和 h_{22} 在虚轴上的极点不是对称的, 且具有正实留数;
- 3) 有下列不等式成立:

$$\operatorname{Re}(h_{11}) > 0, \operatorname{Re}(h_{22}) > 0,$$

$$2\operatorname{Re}(h_{11})\operatorname{Re}(h_{22}) - \operatorname{Re}(h_{11}h_{22}) - |h_{11}h_{22}| > 0. \quad (10)$$

若遥操作系统是Llewellyn稳定的, 则系统的阻尼系数不能很大, 要求满足一定的条件^[33]. 1989年, Anderson引入了散射理论的相关概念来分析力觉临场感遥操作系统, 从理论上指出, 导致系统不稳定的原因在于通讯环节的时延造成了系统的有源性^[18]. 一个不满足无源性的系统也可以通过一定的方法将其化为无源的系统. 如图5所示, 引入波变量:

$$u_l = \frac{B\dot{x}_l + F_l}{\sqrt{2B}}, v_l = \frac{B\dot{x}_l - F_l}{\sqrt{2B}}, \quad (11)$$

其中 $x_l, F_l, l \in \{m, s\}$ 分别表示速度和力反馈, 同时, 在速度和力反馈之间引入波变量比例因子即特征阻抗(characteristic impedance) B , 则系统通讯是无损耗的, 系统是无源稳定的.

Niemeyer等人^[34]指出, 在此波变换下, 特征阻抗失配导致了通讯通道的有源性, 进一步分析了波过滤、波变量预估等控制策略下系统无源性问题. 从时域角度出发, Ryu等人^[35]设计了PO/PC(passivity observer/passivity controller)来动态调节该参数, 保证

系统的无源性. 从能量平衡角度分析, Yokokohji等人^[36]证明, 时变时延在某些条件下会让系统产生极大的能量, 从而导致系统不稳定, 由此, 该文引入了输入/输出能量平衡调节的方法.

由无源性定义可以看出, 不满足无源性条件的系统也可能是稳定的. 因此, 它对系统的稳定性来说是十分保守的.

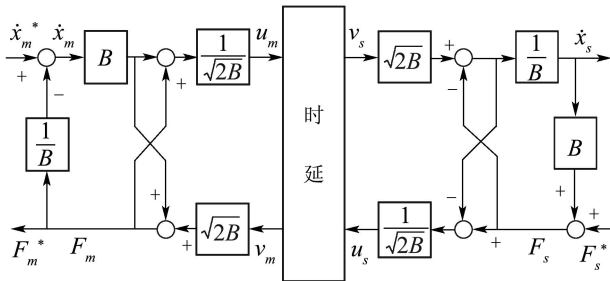


图5 末端阻抗匹配下的波变换

Fig. 5 Wave transmission with matched terminal

4.4 基于事件稳定性 (Event-based stability)

针对基于事件模型, 得到基于网络遥控操作机器人系统稳定性:

定理 3^[37] 在时间 t 为参考变量的情况下, 如果原系统(不包括遥操作者/远程控制器)是渐近稳定的, 假定新的非时间参考变量 $s = \Pi(y)$ 是系统输出的函数, 且是时间变量 t 的非减(或单调递增)函数, 则在该非时间参考变量 s 下, 系统仍是稳定的(渐近稳定的).

通过Lyapunov函数法很容易给出该定理的证明. 对原系统, 选择Lyapunov函数 $V(x(t)) > 0$, 有 $\dot{V}(x(t)) < 0$. 如果 $s = \Pi(y)$ 是时间变量 t 的非减(或单调递增)函数, 则 $\dot{V}(x(t)) = \frac{dV(x(t))}{dt} = \frac{dV(x(s))}{ds} \frac{ds}{dt} \geq 0$ ($\frac{ds}{dt} < 0$). 显然, $\frac{dV(x(t))}{ds} \leq 0$ ($\frac{dV(x(t))}{ds} < 0$), 系统在新的参考变量 s 下是稳定的(渐近稳定的).

虽然, 选择非时间参考变量 s 避免了系统的稳定性问题, 而实际上, 基于网络的遥操作系统难以满足渐近稳定性, 而且, 该参考变量的存在也影响了系统控制的实时性.

5 控制策略(Control schemes)

5.1 预估控制(Predictive control)

如何克服时延对系统带来的影响, 预估控制无疑是一个很好的控制策略. 1959年, Smith^[38]针对常时滞下线性系统, 提出了基于模型的Smith预估器. 早在遥操作控制应用上, 预估控制已经有许多成功的应用^[39]. 针对网络遥操作系统, 基于模型的预估控制主要可以分为两类, 第1类是将操作者排除在系统

控制闭环外, 模型的控制输出反馈给主端控制器, 达到系统输出能够跟踪期望输入^[40,41]. 第2类是将操作者包括在系统控制闭环内, 对从端的运动状态等通过虚拟现实等方法反馈给操作者感知, 是一种基于视觉的预测控制^[17,42,43]. 这种基于视觉的预测控制可以辅助操作者完成任务规划、监控、控制评估等, 增强了系统控制的实时性和临场感.

预估控制基本都是采用Smith预估器的原理补偿时延对系统的影响. 应用此方法的前提是系统模型已知且时延为定常, 所以, 除了需要缓冲策略克服时延抖动外, 必须增加其他的控制方法来解决此问题. 为了克服抖动时延对系统控制误差的影响, Casavola等人^[44]利用模型的预估输出, 在轨迹跟踪误差和力反馈误差的指标约束下, 增加了一个CG(command governor)来使得误差代价最小. 为了避免动态模型的不可预测性, 文献^[17]基于预先标定的全局地图模型, 结合动态变化的局部信息, 实现了远程移动机器人的交互控制. 文献^[45]则避开从端模型, 利用系统输出和图像反馈, 重构远端模型并虚拟显示该重构信息.

通过模型的精确标定结合模型同步可以使得模型一致, 缓冲策略可以使得网络时延近似为定常, 如果能够处理系统的扰动和突变时延的影响, 则预估控制能够很好地解决由于时延所带来的稳定性、透明性、实时性和任务一致性问题.

5.2 网络处理(Network process)

从网络协议的控制机制看, 由于拥塞控制算法的作用, TCP的时延抖动剧烈. 为此, Liu等人^[46]修改了这种拥塞控制算法, 提出了基于三项式的控制新算法. 虽然该算法需要调节3个参数 α, β, γ , 但是, 在适当的参数选择下, 发送窗口大小和数据发送速率变化较平缓. 从程序处理时序的角度, 文献^[47]采用了优先中断机制的RTNP(real time network protocol), 即该机制下发送的数据包, 比其它TCP/UDP协议具有更高的中断级别.

为了降低网络时延和提高系统Qos品质, 文献^[48]基于控制事件的优先程度, 设计了一个模糊控制器来管理分配网络带宽, 合理传输超媒体数据; 文献^[49]按照控制事件的时延灵敏度设计了一种动态监控机制, 使得优先级高的数据流选择最短路径或最小数据流量路径, 并通过分布式网络PlanetLab验证了算法的有效性.

5.3 智能控制(Intelligent control)

近年来, 智能控制在许多领域获得应用, 典型的有模糊控制、神经网络控制等, 由于智能控制无需对象的精确数学模型, 对参数具有较强的鲁棒性, 因而被引入网络遥操作系统中.

为了提高系统控制品质, 增加系统安全性, 前已述及, 一个很好的办法就是增加从端机器人的自主性. Sim等人^[50]正是基于此, 在从端设计了两层模糊控制器2LFC(two-layer fuzzy controller), 一层用来产生机器人距离和方位信息, 一层用来产生完成目标跟踪、避障任务的控制输出. 遥操作系统中, “机器人+环境”模型往往是不确定的, 故而可以利用神经网络良好的学习和自适应能力, 在预估控制框架下在线辨识和仿真从端系统模型^[51].

智能控制为遥操作系统开辟了另一条控制途径, 但由于其实现非常复杂, 据笔者了解, 目前仍处于理论分析和探讨阶段.

6 研究展望(Research perspective)

随着研究的深入, 本文认为网络遥操作系统研究可以集中在以下几个方面:

网络时延: 在现有网络硬件架构下, 研究更适合网络实时控制系统的数据传输控制协议, 实现时延抖动小、连续有序和可靠的数据传输, 无疑具有很高的应用价值.

虚拟现实: 时延的存在使得操作者控制远程机器人始终会有延迟感, 而虚拟现实技术无疑能够提高系统的操作性能和透明性.

机器人和操作者的智能交互: 把操作者包括在控制闭环外, 并与机器人的智能结合起来, 让二者之间能够进行相互感知、交流、互动等, 无疑是提高系统控制性能的一个重要手段.

多机器人协调控制: 由于网络时延的存在, 多机器人之间的模型难以被辨识和确定, 机器人之间采用何种方式进行信息交互, 采用何种控制结构进行相互之间的协调, 这是一个难以回避的问题.

新技术的应用: 由于网络遥操作机器人系统涉及到计算机、输入控制设备、网络通讯和机器人等领域的研究成果, 这些领域中相关技术的深入发展, 都将给网络遥操作研究注入崭新的活力.

7 总结(Conclusion)

本文主要选取近10年来国际上在遥操作领域发表的一些杂志和重要会议文献, 针对系统理论和控制方法, 详细综述了网络遥操作机器人系统研究所取得的最新成果和存在的问题. 对一些结果做了必要的推论和评价, 指出了现有的理论分析和控制方法的优势和特点; 对其存在的问题, 从个人的角度提出了一些控制上的解决方案, 并指出了下一步的研究方向.

参考文献(References):

- [1] GOLDBERG K, MASCHA M, GENTNER S. Desktop teleoperation via the World Wide Web[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE Press, 1995: 654 – 659.
- [2] SIMMONS R, FERNANDEZ J L, GOODWIN R. Lessons learned from Xavier[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2000, 7(2): 33 – 39.
- [3] STEIN M R. Interactive internet artistry[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2000, 7(2): 28 – 32.
- [4] CHURMS C L, PROZESKY V M, SPRINGHORN K A. The remote control of nuclear microprobes over the Internet[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1999, 158(1/4): 124 – 128.
- [5] SAUCY P, MONDADA F. Open access to a mobile robot on the Internet[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2000, 7(1): 41 – 47.
- [6] SCHILLING K, ROTH H, LIEB R. Remote control of a “Mars Rover” via Internet—to support education in control and teleoperations[J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(3): 173 – 178.
- [7] PREUSCHE C, ORTMAIER T, HIRZINGER G. Teleoperation concepts in minimal invasive surgery[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(11): 1245 – 1250.
- [8] LUO R C, SU K L, SHEN S H. Networked intelligent robots through the internet: issues and opportunities[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(3): 371 – 382.
- [9] GOLDBERG K, DEZHEN S, LEVANDOWSKI A. Collaborative teleoperation using networked spatial dynamic voting[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(3): 430 – 439.
- [10] LO W T, LIU Y H, ELHAJJ I H. Cooperative teleoperation of a multi-robot system with force reflection via internet[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(4): 661 – 670.
- [11] CHANG S, KIM J, KIM I. KIST teleoperation system for humanoid robot[C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE Press, 1999: 1198 – 1203.
- [12] ARTEMIADIS P K, KYRIAKOPOULOS K J. EMG-based teleoperation of a robot arm in planar catching movements using ARMAX model and trajectory monitoring techniques[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE Press, 2006: 3244 – 3249.
- [13] KOFMAN J, WU X H, LUU T J. Teleoperation of a robot manipulator using a vision – based human – robot interface[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1206 – 1219.
- [14] WIRZ R, MARIN R. Remote programming of an Internet tele – lab for learning visual servoing techniques: A case study[C] // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. New York: IEEE Press, 2004: 4414 – 4419.
- [15] GORADIA A, XI N, ELHAJJ I H. Internet based robots: Applications, impacts, challenges and future directions[C] // *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. New York: IEEE Press, 2005: 73 – 78.
- [16] LUO R C, CHEN T M. Development of a multibehavior – based mobile robot for remote supervisory control through the Internet[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(4): 376 – 385.
- [17] WANG M, LIU J N K. Interactive control for Internet – based mobile robot teleoperation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 52(2/3): 160 – 179.
- [18] ANDERSON R J, SPONG M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(5): 494 – 501.
- [19] HIRAI K, SATOH Y. Stability of a system with variable time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(3): 552 – 554.
- [20] LAWRENCE D. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 624 – 637.

- [21] HASHTRUDI K Z, SALCUDEAN S E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(1): 108 – 114.
- [22] 王世华, 胥布工, 刘云辉. 网络实时系统端对端的时钟同步研究及算法实现[J]. 信息与控制, 2007, 36(3): 352 – 356.
(WANG Shihua, XU Bugong, LIU Yunhui. Research and algorithm of end-to-end time synchronization for real-time systems over Internet[J]. *Information and Control*, 2007, 36(3): 352 – 356.)
- [23] 王世华, 胥布工, 刘云辉. 预估控制下的实时网络遥操作移动机器人[J]. 机器人, 2007, 29(4): 305 – 312.
(WANG Shihua, XU Bugong, LIU Yunhui. Real-time mobile telerobot over IP network based on predictive control[J]. *Robot*, 2007, 29(4): 305 – 312.)
- [24] NICULESCU S I, TAOUTAOU D, LOZANO R. On the closed – loop stability of a teleoperation control scheme subject to communication time – delays[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 2002: 1790 – 1795.
- [25] AZORIN J M, REINOSO O, ARACIL R. Generalized control method by state convergence for teleoperation systems with time delay[J]. *Automatica*, 2004, 40(9): 1575 – 1582.
- [26] XU B G. Stability Criteria for linear time-invariant systems with multiple delays[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2000, 252(1): 484 – 494.
- [27] XU B G. Stability criteria for linear systems with uncertain delays[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2003, 284(2): 455 – 470.
- [28] 胥布工. 一个新型充要指数稳定性定理及其初步应用[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 7 – 13.
(XU Bugong. A new-type exponential necessary and sufficient stability theorem and its simple applications[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 7 – 13.)
- [29] JIANG Z P, TEEL A R, PRALY L. Small gain theorem for ISS systems and applications[J]. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1994, 7: 95 – 120.
- [30] ZHU W H, SALCUDEAN S E. Stability guaranteed teleoperation: An adaptive motion/force control approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(11): 1951 – 1969.
- [31] POLUSHIN I G, LIU P X, LUNG C H. A control scheme for stable force-reflecting teleoperation over IP networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part B: Cybernetics*, 2006, 36(4): 930 – 939.
- [32] LLEWELLYN F B. Some fundamental properties of transmission systems[J]. *Proceedings of the IRE*, 1952, 40(3): 271 – 283.
- [33] HYUN C C, JONG H P. Impedance controller design of Internet – based teleoperation using absolute stability concept[C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE Press, 2002: 2256 – 2261.
- [34] NIEMEYER G, SLOTLINE J J E. Stable adaptive teleoperation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1991, 16(1): 152 – 162.
- [35] RYU J H, KWON D S, HANNAFORD B. Stable teleoperation with time-domain passivity control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 20(2): 365 – 373.
- [36] YOKOKOHJI Y, IMAIDA T, YOSHIKAWA T. Bilateral control with energy balance monitoring under time-varying communication delay[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE Press, 2000: 2684 – 2689.
- [37] XI N, TARN T J. Stability analysis of non-time referenced Internet-based telerobotic systems[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 32(2/3): 173 – 178.
- [38] SMITH O J. A controller to overcome dead time[J]. *ISA Journal*, 1959, 6(2): 28 – 33.
- [39] SHERIDAN T B. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(5): 592 – 606.
- [40] KHEDDAR A. Teleoperation based on the hidden robot concept[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 2001, 31(1): 1 – 13.
- [41] ANDREU D, FRAISSE P, SEGOVIA DE LOS RIOS J A. Teleoperation over an IP network: from control to architectural considerations[C] // *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. New York: IEEE Press, 2004: 765 – 770.
- [42] RAMOS J J G, MAETA S M, MIRISOLA L G B. Internet-based solutions in the development and operation of an unmanned robotic airship[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2003, 91(3): 463 – 474.
- [43] BRUEMMER D J, FEW D A, WALTON M C. "Turn off the television!": Real-world robotic exploration experiments with a virtual 3 – D display[C] // *Proceedings of the 38th Annual Hawaii Int Conf on System Science*. New York: IEEE Press, 2005: 1 – 8.
- [44] CASAVOLA A, MOSCA E, PAPINI M. Predictive teleoperation of constrained dynamic systems via Internet-like channels[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(4): 681 – 694.
- [45] ITOH T, YUDATE K, ITO S. New predictive display method of motion and force information for network teleoperation without using virtual environment model[C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*. New York: IEEE Press, 2003: 2815 – 2822.
- [46] LIU P X, MENG M Q H, LIU P R. An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over IP networks[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(5): 560 – 570.
- [47] UCHIMURA Y, YAKOH T. Bilateral robot system on the real – time network structure[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(5): 940 – 946.
- [48] FUNG W K, XI N, LO W T. Task driven dynamic QoS based bandwidth allocation for real-time teleoperation via the Internet[C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE Press, 2003: 1094 – 1099.
- [49] CEN Z W, MUTKA M, LIU Y. QoS management of supermedia enhanced teleoperation via overlay networks[C] // *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE Press, 2005: 1630 – 1635.
- [50] SIM K B, BYUN K S, HARASHIMA F. Internet-based teleoperation of an intelligent robot with optimal two-layer fuzzy controller[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(4): 1362 – 1372.
- [51] SMITH A C, HASHTRUDI Z K. Neural network-based teleoperation using Smith predictors[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. New York: IEEE Press, 2005: 1654 – 1659.

作者简介:

王世华 (1979—), 男, 博士, 研究领域为机器人学、网络控制系统理论与应用, E-mail: wsh188881@163.com;

胥布工 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究领域为时滞和不确定控制系统的分析与综合、网络化控制系统理论及应用, E-mail: aubgxu@scut.edu.cn;

刘云辉 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究领域为机器人学、机电系统、视觉伺服, E-mail: yhliu@mae.cuhk.edu.hk;

席宁 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院沈阳自动化所特聘研究员, 美国密歇根大学教授, 研究领域为机器人学、纳米机器人技术、多机器人技术, E-mail: xin@egr.msu.edu.