

doi: 10.7690/bgzd.2013.08.017

## 遥操作系统的控制结构与控制方法综述

刘霞

(西华大学电气信息学院, 成都 610039)

**摘要:** 遥操作系统广泛应用于各种人类难以进入的或者危险的环境, 是机器人领域内最具挑战性的研究方向之一, 但目前缺乏对遥操作系统控制结构和控制方法的系统研究。笔者以确保透明性和稳定性为遥操作系统的主要目标, 采用对比的方法介绍了各种控制结构以及控制方法的基本原理, 分别指出了各种方法的优点和不足, 并提出了遥操作领域内进一步的研究方向, 从而实现了遥操作系统现有控制结构和控制方法的系统分析。

**关键词:** 遥操作系统; 控制结构; 控制方法; 透明性; 稳定性

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Survey of Control Architectures and Control Method of Tele-Operation System

Liu Xia

(School of Electrical & Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Tele-operation systems are widely applied to the environments that are inaccessible or too hazardous for the human to be in. Tele-operation systems have been one of the most challenging topics in robotic fields. However, there are few systematic researches on the control architectures and control approaches of tele-operation systems. In this paper, the main goals are to ensure the stability and transparency of tele-operation systems. The basic principles of various control architectures and control approaches are comparatively introduced. The advantages and disadvantages of each architecture and approach are pointed out. Finally, the possible future research topics in tele-operation are presented. This paper realizes systematic analysis of the existing control architectures and control approaches of tele-operation systems.

**Key words:** tele-operation system; control architecture; control method; transparency; stability

### 0 引言

遥操作系统(teleoperation systems)<sup>[1-6]</sup>是指操作者操纵主机器人进行相应的动作, 该动作指令通过通信通道传输到从机器人, 从而指挥机器人在人们难以接近或危险的环境中完成比较复杂操作任务的一种作业系统。

遥操作系统的研究距今已经有 60 多年的历史。20 世纪 40 年代, Argonne 国家实验室(ANL)为处理放射性极强的核废料而开发了世界上第一个主-从机器人遥操作系统<sup>[7]</sup>。如今, 遥操作系统在太空<sup>[8]</sup>和海底探索<sup>[9]</sup>、人体内腔微创手术<sup>[10]</sup>、建筑和林业中的挖掘<sup>[11]</sup>、核废弃物管理<sup>[12]</sup>、远程康复训练<sup>[13]</sup>等领域中都有着广泛的应用前景。遥操作技术早已在国外引起了广泛的关注, 美国、日本、加拿大等国家已就遥操作系统的应用开展了研究, 取得了相当丰富的研究成果<sup>[14-19]</sup>。近些年来, 国内众多研究机构也开始加大对遥操作系统的研究, 2003 年由中国人民解放军海军总医院神经外科中心与沈阳医学院附属中心医院联合完成的一例远程遥控机器人颅腔穿刺手术, 以及 2006 年由北京专家和延安大学附属医院完成的首例遥操作胫骨髓内钉手术, 都充分

显示了国内在遥操作技术领域取得的重要发展。

然而, 目前国内对遥操作系统从理论上进行系统研究的工作并不多见, 尤其缺乏对遥操作系统控制结构和控制方法进行系统研究的工作; 因此, 笔者针对透明性和稳定性 2 个目标, 对遥操作系统现有的控制结构和控制方法进行了系统地分析, 提出了该领域今后值得进一步研究的方向。

### 1 遥操作系统概述

如图 1 所示, 典型的遥操作系统主要由操作者(Operator)、主机器人(Master)、通信通道(Channel)、从机器人(Slave)和环境(Environment)等组成。其中:  $x_m, x_s$  分别为主机器人和从机器人的位置;  $f_m, f_s$  分别为主机器人和从机器人的控制输入力;  $f_h$  为操作者与主机器人之间的作用力;  $f_e$  为环境与从机器人之间的作用力。当遥操作系统工作时, 操作者对主机器人施加力, 并将其位置指令通过通信通道发送给远程的从机器人, 使从机器人可以完成某项任务(如在环境中抓取一个物体), 与此同时, 从机器人又将其与环境之间的作用力返回给操作者, 使得操作者有触摸感(称为力反馈或触觉反馈), 从而使得操作者施加正确的力。

收稿日期: 2013-02-10; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 西华大学重点科研基金项目(Z1220934); 四川省科技支撑计划项目

作者简介: 刘霞(1980—), 女, 四川人, 工学博士, 讲师, 从事非线性控制理论、遥操作系统研究。

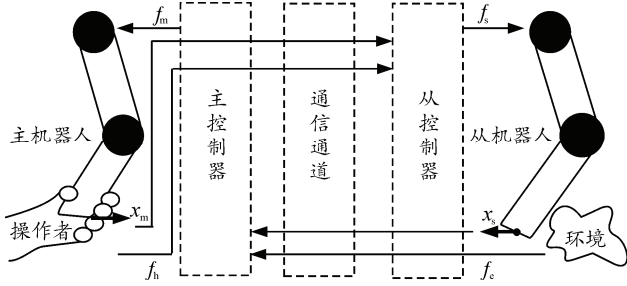


图 1 典型遥操作系统结构

实际遥操作系统中，机器人往往是多自由度且非线性的。当主机器人与操作者且从机器人与环境接触时， $n$ -自由度的主机器人和  $n$ -自由度的从机器人关节空间一般的非线性动力学模型可描述<sup>[1-6]</sup>为：

$$M_{qm}(q_m)\ddot{q}_m + C_{qm}(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_{qm}(q_m) = \tau_m + J_m^T f_h \quad (1)$$

$$M_{qs}(q_s)\ddot{q}_s + C_{qs}(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + G_{qs}(q_s) = \tau_s - J_s^T f_e \quad (2)$$

其中：下标  $m, s$  分别表示主机器人和从机器人； $q_m, q_s \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  为关节角位置； $M_{qm}(q_m), M_{qs}(q_s) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  为惯量矩阵； $C_{qm}(q_m, \dot{q}_m), C_{qs}(q_s, \dot{q}_s) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  为离心力和哥氏力项； $G_{qm}(q_m), G_{qs}(q_s) \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  为重力项； $\tau_m, \tau_s \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  为控制力矩输入； $J_m(q_m), J_s(q_s) \in \mathcal{R}^{n \times n}$  为雅可比矩阵； $f_h \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  为操作者作用于主机器人的力； $f_e \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  为从机器人作用于环境的力。

从控制工程的角度来看，遥操作控制系统主要有 2 个目标<sup>[1]</sup>：1) 稳定性(Stability)。在遥操作系统中，确保系统的稳定性就是确保无论操作者和环境的行为如何，整个闭环系统都是稳定的。2) 透明性(Transparency)。透明性是遥操作系统最重要的性能要求，即从机器人可以在其工作的环境中精确地复制主机器人的位置轨迹，同时，主机器人又可以将从机器与环境之间的作用力精确地再现给操作者。在一个透明的遥操作系统中，操作者可以真实地感觉到从机器人与环境之间的交互，具有身临其境的感觉。透明性具体包括以下 2 个方面：1) 从机器人的位置  $x_s$  跟踪主机器人的位置  $x_m$ ，即  $x_m = x_s$ ；2) 从机器人与环境间的作用力  $f_e$  跟踪操作者与主机器人之间的作用力  $f_h$ ，即  $f_h = f_e$ 。

## 2 遥操作系统的控制结构

为了取得透明性，学者们提出了不同的遥操作控制结构：基于位误差的结构、直接力反馈结构、共享柔顺控制结构以及四通道结构。下面对这些控制结构的原理进行介绍，并对这些结构之下系统的透明性进行比较。

首先，为了评价遥操作系统的透明性，可以采

用如下定义的混合矩阵：

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ f_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

当且仅当混合矩阵具有如下形式时，可取得理想的透明性：

$$H_{ideal} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中，混合参数  $h_{11} = f_h/x_m$  ( $f_e = 0$ ) 为自由运动条件下的输入阻抗，非零值的  $h_{11}$  意味着当从机器人处于自由空间时，操作者将得到一些力反馈，因此有自由运动的“粘黏”感。参数  $h_{12} = f_h/f_e$  ( $x_m = 0$ ) 用于度量当主机器人在运动状态下锁定时力跟踪性能（力跟踪完美时  $h_{12} = 1$ ）；参数  $h_{21} = -x_s/x_m$  ( $f_e = 0$ ) 用于度量当从机器人在自由空间下位置或速度的跟踪性能（位置或速度跟踪完美时  $h_{21} = -1$ ）；参数  $h_{22} = -x_s/f_e$  ( $x_m = 0$ ) 为当主机人在运动状态下锁定时的输出容差，非零值的  $h_{22}$  意味着即使主机器人在某个地方锁定时，从机器人也会运动。

### 2.1 基于位置误差的结构

基于位置误差(position error based, PEB)的遥操作结构<sup>[20-21]</sup>，也称为位置-位置结构，如图 2。阻抗  $Z_m(s)$  和  $Z_s(s)$  分别表示主机器人和从机器人的动力学， $C_L$  和  $C_R$  分别为主机器人和从机器人的 PD 控制器， $f_h^*$  和  $f_e^*$  分别表示操作者和环境的外力。

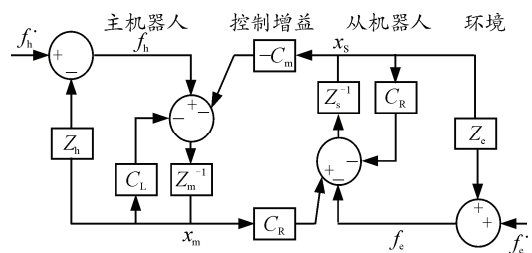


图 2 PEB 结构

从图 2 可以看出，PEB 结构简单，且不采用任何力传感器，当从机器人与物体接触时，力争使主机器人和从机器人之间的位置误差最小，从而将这个位置误差的一个比例作为力反馈到操作者。PEB 结构的混合矩阵为：

$$H = \begin{bmatrix} Z_m + C_L & \frac{Z_s}{Z_{ts}} & \frac{C_L}{Z_{ts}} \\ -\frac{C_R}{Z_{ts}} & \frac{1}{Z_{ts}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中， $Z_{tm} = Z_m + C_L$ ,  $Z_{ts} = Z_s + C_R$ 。因此，除了非理想的力跟踪 ( $h_{12} \neq 1$ )，PEB 结构在自由运动条

件下 ( $h_{11} \neq 0$ ) 可能会出现失真感。这就意味着在从机器人端没有力传感器的情形下, 控制的不精确性 (即非零的位置误差) 使得即使当从机器人没有与环境接触时仍然有力反馈给操作者。

### 2.2 直接力反馈结构

直接力反馈 (direct force reflection, DFR) 遥操作结构<sup>[22]</sup>, 也称为力-位置结构, 如图 3 所示。

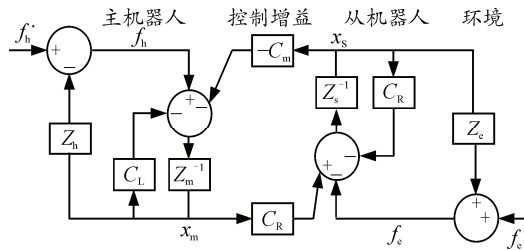


图 3 DFR 结构

该方法需要力传感器测量从机器人和环境之间的作用力。DFR 结构的混合矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} Z_m & 1 \\ -C_R & 1 \\ Z_{ts} & Z_{ts} \end{bmatrix} \quad (6)$$

尽管 DFR 的自由运动感仍然不理想 ( $h_{11} \neq 0$ ), 但是可取得完美的力跟踪性能 ( $h_{12} = 1$ )。且与 PEB 方法相比, 此时的  $h_{11}$  更加接近于零, 且当从机器人处于自由运动时, 操作者只感觉到主机器人接口的惯量。尽管 DFR 方法的透明性比 PEB 方法更好些, 但是 2 种方法之下  $h_{21}$  的值和  $h_{22}$  的值都不够理想。

### 2.3 共享柔顺控制结构

共享柔顺控制 (shared compliant control, SCC) 遥操作结构<sup>[23]</sup>, 也称阻抗控制结构, 如图 4 所示。

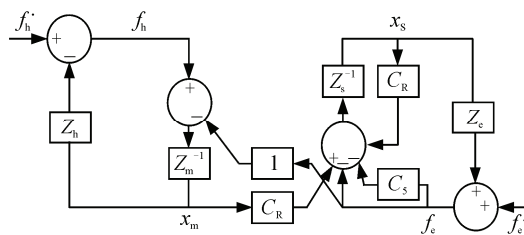


图 4 SCC 结构

在这种方法中, 对于主机器人而言, 其控制与 DFR 中相同, 但对于从机器人而言, 其控制包括位置控制项以及从机器人和环境之间所测量到的作用力。SCC 结构的混合矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} Z_m & 1 \\ C_R & 1+C_5 \\ Z_{ts} & Z_{ts} \end{bmatrix} \quad (7)$$

可以看出, SCC 控制方法中  $h_{21}$  的值和  $h_{22}$  的值

仍然不理想。

### 2.4 四通道结构

Lawrence<sup>[24]</sup>, Yokokohji<sup>[25]</sup>和 Zaad<sup>[26]</sup>提出了四通道 (4-Channel, 4-CH) 遥操作结构。1993 年, Lawrence 提出了四通道双边控制结构, 将主从机器人的力和速度作为控制信号相互传递, 并用 Nyquist 方法对闭环系统的鲁棒性进行了分析, 首次揭示了稳定性与透明性之间所存在的冲突问题。1994 年, Yokokohji 提出了一般的 4-CH 结构。1999 年, Zaad 提出了本地力反馈的概念, 通过在主、从机器人上加入本地力反馈, 得到了一个高级的并行的位置/力控制结构。

在 4-CH 结构中, 传感器所测量到的力和位置在主机器人和从机器人双方之间分别进行交换。图 5 描述了 4-CH 双向遥操作控制结构。

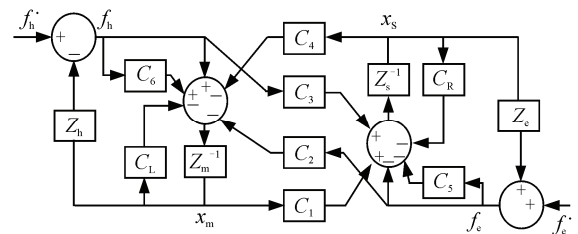


图 5 4-CH 结构

该结构通过选择合适的控制器  $C_1$  到  $C_6$  可以表示前面的几种控制结构。图 5 中的补偿器  $C_5$  和  $C_6$  分别为从机器人和主机器人的局部力反馈。SCC 结构的混合矩阵参数为:

$$\begin{aligned} h_{11} &= (Z_{ts}Z_{tm} + C_1C_4)/D \\ h_{12} &= (Z_{ts}C_2 - (1+C_5)C_4)/D \\ h_{21} &= -(Z_{tm}C_3 + (1+C_6)C_1)/D \\ h_{22} &= -(C_2C_3 - (1+C_5)(1+C_6))/D \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $D = -C_3C_4 + Z_{ts}(1+C_6)$ 。

与 PEB, DFR 和 SCC 结构相比, 4-CH 结构中充足的参数个数使得其可以取得理想的透明性。事实上, 通过选择如下  $C_1$  到  $C_6$ :

$$C_1 = Z_{ts}, C_2 = 1+C_6, C_3 = 1+C_5, C_4 = -Z_{tm} \quad (9)$$

便可以取得理想透明性的条件, 即:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

## 3 遥操作系统的控制方法

为了更加清晰、直观地对比遥操作系统的不同控制结构, 表 1 将上面各种结构之下系统的透明性进行了总结。

除控制结构外, 控制方法的研究也是遥操作系

统的另一个研究重点。近年来, 遥操作系统控制方法的研究已取得了相当丰富的成果, 这些控制方法主要包括基于无源性的方法、滑模控制、 $H_\infty$  控制、模型预测控制和自适应控制等。下面就几种主要的控制方法进行介绍, 包括各种方法的基本原理、相关的文献工作以及其优缺点。

表 1 遥操作系统不同控制结构的比较

遥操作结构	透明性	遥操作结构	透明性
PEB	力跟踪不理想	SCC	力跟踪理想, 但不能取得理想透明性
DFR	力跟踪理想, 但不能取得理想透明性	4-CH	可以取得理想透明性

### 3.1 基于无源性的方法

无源性理论是关于动力系统的输入-输出性质, 最初起源于网络理论且主要是关于互联系统之间的能量交换问题。而遥操作系统也可以看作图 6 所示的一个两端口的网络。

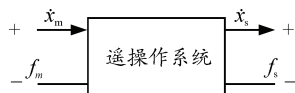


图 6 遥操作系统两端口网络

在遥操作系统中, 如果假设操作者和环境是无源的, 即  $\int_0^t [f_h^T(\sigma)\dot{x}_m(\sigma) - f_e^T(\sigma)\dot{x}_s(\sigma)]d\sigma \geq 0$ , 则输入为  $[f_m, f_s]^T$  且输出为  $[\dot{x}_m, \dot{x}_s]^T$  的系统关于如下存储函数是无源的:

$$V = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_m & 0 \\ 0 & M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于一系列无源两端口的级联是无源的, 一系列两端口和一端口网络的级联仍然是无源的。如果将 Lyapunov 函数看作是所有组成块的存储函数之和, 则无源性可以建立起整个系统的稳定性。因此, 假设环境和操作者是无源的, 如果主机器人和从机器人是无源的, 则可以保证闭环系统是无源的。

1989 年, Anderson<sup>[27]</sup>利用散射算子分析法提出了一种无源性的控制算法, 该算法可以保证系统在具有时延下的稳定性。1991 年, Niemeyer<sup>[28]</sup>研究了通信时延对系统的影响, 提出了波变量(wave variables)的概念, 并通过设计控制器保证系统的耗能, 从而保证系统的稳定性。1993 年, Lawn<sup>[29]</sup>通过实验指出, Anderson 无源控制算法的稳定性实际上是牺牲了系统的性能为代价, 只适用于通信时延小于 2 s 的情形。1997 年, 国内东南大学宋爱国教

授<sup>[30]</sup>在 Anderson 的基础上提出了阻抗匹配的思想, 并导出操作性能最优的无源控制算法, 可以同时保证小时延下系统的稳定性和力觉临场感效果。

基于无源性的方法为遥操作系统的分析和设计提供了一种有力的手段。然而, 利用无源性来确保遥操作系统的稳定性过于保守, 而过于保守的稳定性可能会牺牲系统的透明性。

### 3.2 滑模控制

滑模控制对不确定性具有鲁棒性, 也可以用于处理遥操作系统中的时延问题。在遥操作系统中, 滑模控制的基本思想是考虑一个由主机器人和从机器人的位置误差和速度误差组成的滑动面, 即  $s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x}$ , 其中,  $\tilde{x}$  为主机器人和从机器人的位置误差,  $\dot{\tilde{x}}$  为主机器人和从机器人的速度误差,  $\lambda$  为常数。标准的滑模方法就是获取控制律, 以使得系统的状态轨迹在有限的时间内到达滑动面, 并保证以后在该滑动面上的运动是稳定的。

1991 年, Buttolo<sup>[31]</sup>针对 1-自由度的无通信时延的力反馈遥操作系统应用了滑模控制, 取得了良好的性能。1999 年, Park<sup>[32]</sup>将滑模控制应用到了具有时变时延的遥操作系统中, 对从机器人采用滑模控制, 以消除时变时延对系统的影响。2012 年, Moreau<sup>[33]</sup>针对气动遥操作系统提出了一种称之为“three-mode”的滑模控制方案, 以取得高精度的位置和力跟踪。

由于滑动模态可进行设计且与对象参数及外部干扰无关, 这使得变结构控制具有快速响应、对参数变化及干扰不敏感、无需系统在线辨识等优点。然而, 滑模控制中存在的高频抖振不仅会影响遥操作系统中控制的精确性而且会增加系统的能量消耗; 另一方面, 控制律的不连续性将影响主机器人和从机器人控制输入的连续性, 从而影响系统性能。

### 3.3 $H_\infty$ 控制

$H_\infty$  控制是在 Hardy 空间通过某些性能指标的无穷范数优化而获得具有鲁棒性能的控制器的方法。在遥操作系统中,  $H_\infty$  控制的设计目标是保证整个系统的鲁棒稳定性, 减小主机器人和从机器人之间的位置/速度误差, 从而减小力跟踪误差, 控制力矩在允许范围内。

1995 年, Leung<sup>[34]</sup>将通信时延建模为系统扰动, 并根据  $\mu$ -综合设计控制器使得系统对时延具有鲁棒性, 同时使系统具有良好的性能。1996 年, Yan<sup>[35]</sup>

对双向遥操作系统提出了统一的  $H_\infty$  控制框架以取得系统性能准则和鲁棒性之间的平衡。1998年, Sano<sup>[36]</sup>基于  $H_\infty$  理论和增益调度结构, 设计了时变的控制器以适应时延的变化对系统的影响。2008年, Kamran<sup>[37]</sup>针对遥操作系统中操作者和环境阻抗中的不确定性提出了非线性  $H_\infty$  控制方案, 该方案可以对主机器人和从机器人的位置和力跟踪误差函数的权值进行调节。

$H_\infty$  控制可以对有界时延情形下遥操作系统进行稳定控制, 并对系统的扰动等不确定性具有较好的鲁棒性, 同时能够满足系统已定的性能要求。然而,  $H_\infty$  设计问题都需要解适当的偏微分方程或不等式, 在非线性遥操作系统中, 解这些偏微分方程或不等式是极其困难的。

### 3.4 模型预测控制

模型预测控制对主机器人和从机器人所涉及到的相位和输入空间都没有限制。由于其预测的本质, 模型预测控制可通过扩展最优化水平来包含时延的最大可能值, 从而自然地处理固定的或时变的时延。

1993年, Sheridan<sup>[38]</sup>提出, 在精确知道从机器人和环境模型的前提下, 主机器人用 Smith 预估器来预测从机器人的状态, 从机器人用 PD 控制器进行调节, 可显著提高系统性能。1998年, Bemporad<sup>[39]</sup>针对传输通道具有无界时延且受输入或状态约束的遥操作系统设计了一种预测控制器, 该控制器能提供命令序列以应付通信中断。1999年, Burdea<sup>[40]</sup>针对从机器人和环境模型往往是未知的, 甚至是时变的问题, 提出了一种对建模误差具有鲁棒性的遥操作机器人预测控制系统。2001年, Munir<sup>[41-42]</sup>提出了一种将波变量和 Smith 预测相结合的方法来抑制时变时延对系统的影响。2004年, Sheng<sup>[43]</sup>等在具有时延的双向遥操作系统中应用模型预测技术, 采用测量信息和反馈测量信息及其预测误差的更正信号, 提出了一种修改的模型预测方案。

然而, 在模型预测控制中, 稳定性是隐式的而非显示的问题, 换句话说, 稳定性需要以准则或是约束为代价。

### 3.5 自适应控制

自适应控制器本质上是一种随着过程动态特性和环境特点的变化而不断修正自己特性的控制器。自适应控制的研究对象是具有一定程度的不确定性

的系统, 它不需要知道不确定性的界, 而是对未知参数进行在线估计, 并根据估计值对控制策略进行修正, 以降低不确定性的影响, 从而使闭环系统满足性能要求。

2000年, Zhu<sup>[44]</sup>将操作者模型融入主机器人动力学, 并将弹性的或者刚性的环境模型融入从机器人动力学, 然后分别为主机器人和从机器人设计自适应运动/力控制器。2001年, Ryu<sup>[45]</sup>针对动力学不确定的主机器人和从机器人, 利用主机器人和从机器人具有相似闭环动力学的特性, 设计了一种自适应控制器来取得位置和力的跟踪。2003年, Hung<sup>[46]</sup>通过引入“虚拟主机器人”的概念, 设计自适应控制器, 以取得遥操作系统的稳定性和运动跟踪性能。2008年, Chopra<sup>[47]</sup>对基于无源性的方法进行基本地扩展, 针对具有常数时延的遥操作系统, 设计了自适应控制器以确保主机器人和从机器人在自由运动时的位置和速度同步。随后, Nuño<sup>[48]</sup>对Chopra的方案进一步改善, 解决了Chopra控制方案只仅适用于不涉及重力问题的遥操作系统的问题。2009年, Malysz<sup>[49]</sup>以机器人手术为应用背景, 以透明性为目标, 在主机器人和从机器人的位置和力信号间引入了滤波映射。其中自适应控制部分可以处理主机器人、从机器人、操作者以及环境的动力学不确定性。2010—2011年, 笔者<sup>[50-52]</sup>在四通道结构基础上, 研究了动力学参数、运动学参数、线性化参数、非线性化参数不确定的遥操作系统的自适应控制方案。

自适应控制系统具有学习特性, 需要很少的或者不需要有关未知参数的先验信息, 因此在处理定常或渐变参数的不确定性问题时, 自适应控制具有明显的优势。但是, 自适应控制不能有效地处理扰动、快变参数和未建模的动力学问题。

为了更加清晰、直观地对比遥操作系统的不同控制方法, 表2将上面各种控制方法的优点和不足进行了总结。

表2 遥操作系统不同控制方法的比较

控制方法	优点	不足
无源性的方法	可确保遥操作系统稳定性	过于保守
滑模控制	可处理遥操作系统中的各种不确定性	会产生抖振现象
$H_\infty$ 控制	可保证遥操作系统的鲁棒稳定性	偏微分方程求解困难
模型预测控制	可处理遥操作系统中的时延问题	稳定性以准则或是约束为代价
自适应控制	可处理遥操作系统中的参数不确定性	难于处理扰动和未建模动力学

在遥操作系统中, 还有其他一些控制方法, 如

智能控制、监督控制、阻抗控制、LQG 控制等, 这里不再逐一介绍。

#### 4 研究展望

为了确保操作系统的稳定性和透明性, 尽管上述已有的控制结构和控制方法在很大程度上解决了问题, 笔者认为还有以下问题值得进一步研究:

1) 通信时延。时延会导致位置前馈被延迟(即操作者的行为被延迟)及力反馈被延迟(即环境行为被延迟), 从而对系统的稳定性和透明性会产生影响。

2) 关节柔性。关节柔性问题在从机器人用于太空操作和手术时尤其特出, 如何消除关节柔性对操作系统稳定性和性能的影响也需要进一步研究。

3) 典型非线性特性。死区、间隙等非线性特性广泛存在于操作系统的不同部件中, 尤其是从机器人中。因此需要设计有效的控制器对这些典型的非线性特性进行补偿, 以消除对系统稳定性和透明性的影响。

4) 各种类型参数不确定性并存的情形。实际的操作系统中存在着各种各样的参数不确定性, 如动力学参数、运动学参数、一些线性化参数和非线性化参数等, 这些不同类型的参数不确定性都会降低系统的稳定性和透明性; 因此, 需要提出一种可行的方法, 以系统地消除各种类型参数不确定性并存时对系统的影响。

#### 参考文献:

- [1] Hokayem P, Spong M. Bilateral teleoperation: An historical survey[J]. *Automatica*, 2006, 42(12): 2035-2057.
- [2] Salcudean S E. Control Problems in Robotics and Automation[M]. Eds. New York: Springer-Verlag, 1998: 16-20.
- [3] Melchiorri C. Robotic telemanipulation systems: An overview on control aspects[C]. Poland: Proceeding of 7th IFAC Symposium on Robot Control, Sept., Wroclaw, 2003: 707-716.
- [4] Cui J, Tosunoglu S, Roberts R, et al. A review of teleoperation system control[C]. Florida: Proceedings of the Florida Conference on Recent Advances in Robotics, 2003: 1-12.
- [5] Arcara P, Melchiorri C. Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 38(1): 49-64.
- [6] Lichiardopol S. A Survey on Teleoperation. DCT report [R]. Eindhoven, Holland: Technische Universiteit Eindhoven, Department Mechanical Engineering, Dynamics and Control Group, December, 2007: 1-34.
- [7] Hashtrudi-Zaad. Design, implementation and evaluation of stable bilateral teleoperation control architectures for enhanced telepresence[D]. Columbia: The University of British Columbia, 2000: 45-50.
- [8] 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.
- [9] Hirabayashi T, Akizono J, Yamamoto T, et al. Teleoperation of construction machines with haptic information for underwater applications[J]. *Automation in Construction*, 2006, 15(5): 563-570.
- [10] Tavakoli M, Aziminejad A, Patel R V, et al. Methods and mechanisms for contact feedback in a robot-assisted minimally invasive environment[J]. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 2006, 10(20): 1570-1579.
- [11] Parker N R, Salcudean S E, Lawrence P D. Application of force feedback to heavy duty hydraulic machines[C]. USA: Proceeding of the IEEE International Conference on Robot Automation, Atlanta, GA, 1993: 375-381.
- [12] Wang W, Yuan K. Teleoperated manipulator for leak detection of sealed radioactive sources[C]. LA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, 2004: 1682-1687.
- [13] Kuttuva M, Boian R., Merians A, et al. The Rutgers Arm, a rehabilitation system in virtual reality: A pilot study[J]. *Cyberpsychology Behavior*, 2006, 9(2): 148-151.
- [14] Hirzinger G. Robot in space: A survey[J]. *Advanced Robotics*, 1995, 9(6): 625-651.
- [15] Hirzinger G, Landzettel K, Fagerer C. Telerobotics with large time delays-the ROTEX experience[C]. Munich, Germany: Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994: 571-578.
- [16] Rovetta A, Cosmi F, Tosatti L M. Teleoperator response in a touch task with different display conditions[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, 25(5): 878-881.
- [17] Penin L F, Matsumoto K, Wakabayashi S. Force reflection for time-delayed teleoperation of space robots [C]. San Francisco, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000: 3120-3125.
- [18] 宋长会. 移动机器人操作系统稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 3-5.
- [19] Reinkensmeyer D J, Pang C T, Nessler J A, et al. Web-based telerehabilitation for the upper extremity after stroke[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2002, 10(2): 102-108.
- [20] Kim W S. Developments of new force reflecting control schemes and an application to a teleoperation training simulator[C]. Ottawa, Canada: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992: 1412-1419.
- [21] Polushin I G, Liu P X, Lung C H, et al. Position-error based schemes for bilateral teleoperation with time delay: theory and experiments[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2010, 132(3): 1-11.

- [22] Ferrell W R. Delayed force feedback[J]. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, 1996, 8(5): 449-455.
- [23] Kim W S. Shared compliant control: A stability analysis and experiments[C]. Los Angeles, USA: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1990: 620-623.
- [24] Lawrence D A. Stability and transparency in bilateral teleoperation[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 624-637.
- [25] Yokokohji Y, Yoshikawa T. Bilateral control of master-slave manipulator for ideal kinesthetic coupling-formulation and experiment[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 605-619.
- [26] Hashtrudi-Zaad, Salcudean S E. On the use of local force feedback for teleoperation[C]. Detroit, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999: 1863-1869.
- [27] Anderson R J, Spong M W. Bilateral control of teleoperators with time delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(5): 494-501.
- [28] Niemeyer G, Slotine J J E. Stable adaptive teleoperation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(1): 152-162.
- [29] Lawn C A, Hannaford B. Performance testing of passive communication with time delay[C]. Atlanta, USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993: 776-783.
- [30] 宋爱国, 黄惟一. 空间遥控作业系统的自适应无源控制[J]. 宇航学报, 1997, 18(3): 26-32.
- [31] Buttolo P. La riflessione di forza nella telemanipolazione [D]. Italy: Universita' di Padova, Mar. 1991: 103-109.
- [32] Park J H, Cho H C. Sliding- mode controller for bilateral teleoperation with varying time delay[C]. Atlanta: Proceeding of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1999: 311-316.
- [33] Moreau R, Pham M T, Tavakoli M, et al. Sliding-mode bilateral teleoperation control design for master-slave pneumatic servo systems[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(6): 584-597.
- [34] Leung G M H, Francis B A, Apkarian J. Bilateral controller for teleoperators with time delay via  $\mu$  synthesis[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(1): 105-116.
- [35] Yan J, Salcudean S E. Teleoperation controller design using  $H_\infty$  optimization with application to motion-scaling [J]. IEEE Transactions on Control System and Technology, 1996, 4(3): 244-258.
- [36] Sano A, Fujimoto H, Tanaka M. Gain-scheduled compensation for time delay of bilateral teleoperation system[C]. Leuven, Belgium: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998: 1916-1923.
- [37] Kamran R, YazdanPanah M J, Shiry Ghidary S. Nonlinear  $H_\infty$  control of a bilateral nonlinear teleoperation system[C]. Seoul: The International Federation of Automatic Control, 2008: 12727-12731.
- [38] Sheridan T B. Space teleoperation through time delay: review and prognosis[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 592-606.
- [39] Bemporad A. Predictive control of teleoperated constrained systems with unbounded communication delays[C]. Tampa, FL: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, 1998: 2133-2138.
- [40] Burdea G C. Synergy between virtual reality and robotics[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(3): 406-411.
- [41] Munir S, Book W J. Internet based teleoperation using wave variables with prediction[C]. Como, Italy: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001: 43-50.
- [42] Munir S, Book W J. Wave-based teleoperation with prediction [C]. Arlington, USA: American Control Conference, 2001: 4605-4611.
- [43] Sheng J, Spong M W. Model predictive control for bilateral teleoperation systems with time delays[C]. Calgary, Canada: Canada Conference on Electrical and Computer Engineering, 2004: 1877-1880.
- [44] Wen-Hong Zhu, Salcudean S E. Stability guaranteed teleoperation: An adaptive motion/force control approach[J]. IEEE transactions on automatic control, 2000, 45(11): 1951-1969.
- [45] Ryu J H, Kwon D S. A novel adaptive bilateral control scheme using similar closed-loop dynamic characteristics of master/slave manipulators[J]. Journal of Robotic Systems, 2001, 18(9): 533-543.
- [46] Hung N V Q, Narikiyo T, Tuan H D. Nonlinear adaptive control of master-slave system in teleoperation[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(1): 1-10.
- [47] Chopra N, Spong M W, Lozano R. Synchronization of bilateral teleoperators with time delay[J]. Automatica, 2008, 44(8): 2142-2148.
- [48] Nuño E, Ortega R, Basañez L. An adaptive controller for nonlinear teleoperators[J]. Automatica, 2010, 46(1): 155-159.
- [49] Malysz P, Sirouspour S. Nonlinear and filtered force/position mapping in bilateral teleoperation with application to enhanced stiffness discrimination[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(5): 1134-1149.
- [50] Liu Xia, Mahdi Tavakoli, Huang Qi. Nonlinear adaptive bilateral control of teleoperation systems with uncertain dynamics and kinematics[C]. Taipei: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 4244-4249.
- [51] Liu Xia, Mahdi Tavakoli. Adaptive inverse dynamics 4-channel control of uncertain nonlinear teleoperation systems[J]. Advanced Robotics, 2011, 25(14): 1729-1750.
- [52] Liu Xia, Mahdi Tavakoli. Adaptive control for linearly and nonlinearly parameterized dynamic uncertainties in bilateral teleoperation systems[C]. Shanghai: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011: 1329-1334.